



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica & Escola de Química

Programa de Engenharia Ambiental

Rone Felipe Amaral da Silva

A PRECIFICAÇÃO DE CARBONO DIANTE O PANORAMA DAS EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR ENERGÉTICO: PERSPECTIVAS PARA
A UNIÃO EUROPEIA E O PARA O BRASIL

Rio de Janeiro
2024



UFRJ

Rone Felipe Amaral da Silva

A PRECIFICAÇÃO DE CARBONO DIANTE O PANORAMA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR ENERGÉTICO: PERSPECTIVAS PARA A UNIÃO EUROPEIA E O PARA O BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Bettina Susanne Hoffmann, DSc.

Rio de Janeiro
2024

Silva, Rone Felipe Amaral.

A precificação de carbono diante o panorama das emissões de gases de efeito estufa no setor energético: perspectivas para a União Europeia e para o Brasil. / Rone Felipe Amaral da Silva. - 2024.

145 f.: 31 il. 30 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2024.

Orientador: Bettina Susanne Hoffmann.

1. Mudanças climáticas. 2. Energia. 3. Precificação de carbono. I. Hoffmann. Bettina Susanne. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Título.



A PRECIFICAÇÃO DE CARBONO DIANTE O PANORAMA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR ENERGÉTICO: PERSPECTIVAS PARA A UNIÃO EUROPEIA E O PARA O BRASIL

Rone Felipe Amaral da Silva

Orientador: Bettina Susanne Hoffmann, DSc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof. Bettina Susanne Hoffmann, DSc, UFRJ

Prof. Diego Cunha Malagueta, DSc, UFRJ

Prof. Estevão Freire, DSc, UFRJ

Prof. Joana Correia de Oliveira de Portugal Pereira, DSc, UFRJ

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Ao Deus criador, que me trouxe e me manteve aqui, que nunca falhou e esteve presente nos momentos mais difíceis da minha existência.

À espiritualidade que me guia e se comunica comigo constantemente.

À minha mãe pelos exemplos de amor e dedicação, e por mostrar diariamente que a fé é capaz de tornar alguém imbatível e vencedor, ao demonstrar o valor da humildade e fidelidade.

Ao meu pai pela serenidade e exemplo de homem digno, por manter vivo em mim o bom caráter de um ser humano.

Ao Luis, meu companheiro, que compartilha comigo tantos planos de vida.

Aos amigos de hoje e sempre, não pelas semelhanças, mas pelas diferenças que somam companhia, emoções e descobertas.

Sou grato e sinto-me abençoado por Deus pelo vigor e calor da presença dos que cercam minha vida.

Aos excelentes e brilhantes mestres da UFRJ, pela oportunidade de continuar os meus estudos mantendo o impecável padrão de qualidade do ensino público federal.

Um agradecimento especial para a minha orientadora, professora Susanne, por me apoiar em um momento desafiador da minha vida pessoal e acadêmica com tratamento humanizado e empatia.

“Cada sonho que você deixa para trás,
é um pedaço do seu futuro que deixou de existir.”

Steve Jobs

RESUMO

SILVA, Rone Felipe Amaral. A precificação de carbono diante o panorama das emissões de gases de efeito estufa no setor energético: perspectivas para a União Europeia e para o Brasil. Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A energia é um recurso fundamental para a sobrevivência humana e para o progresso social e econômico. Contudo, a utilização de combustíveis fósseis na geração de energia e as consequentes emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente o dióxido de carbono (CO₂), surgem como um desafio crítico no contexto das mudanças climáticas; além disso, o setor energético é a principal fonte de poluição do ar, afetando mais de 90% da população mundial e resultando em mais de 6 milhões de mortes prematuras anualmente. Em 2022, as emissões globais de GEE atingiram mais de 53 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), sendo 1,31 Gt de CO₂e referentes ao Brasil e 3,58 Gt de CO₂e originárias da União Europeia (UE). Além disso, comparado aos anos anteriores, 2023 foi o ano mais quente já registrado. Nesse cenário, a discussão sobre a precificação de carbono, como estratégia para a redução das emissões de CO₂, ganha relevância, impulsionada pelo desenvolvimento de programas e políticas específicas. Este trabalho dedica-se à apresentação das perspectivas da precificação de carbono no Brasil e na UE, explorando suas tendências e abordagens para enfrentar os desafios da descarbonização da economia, especialmente no que tange às exigências do mercado regulado de carbono que impactam o setor energético. A metodologia empregada consistiu em pesquisa exploratória, envolvendo levantamento bibliográfico; os objetivos foram direcionados para o levantamento de informações, delimitando-se à verificação, preferencialmente no escopo das emissões de CO₂, e concentrando os esforços na análise do setor de energia, tanto no Brasil quanto na UE. Os resultados da pesquisa indicam que, na comparação entre Brasil e UE, o continente europeu apresenta um avanço mais significativo nas políticas de precificação de carbono. Tal avanço está correlacionado com a tendência de redução nas emissões de CO₂ oriundas do setor de energia observada na UE. Adicionalmente, constatou-se que, apesar da comprovada eficácia das políticas reguladas de carbono na diminuição das emissões, essas políticas enfrentam resistências relacionadas à implementação de novos custos. Por outro lado, no Brasil, observou-se que a adoção dessas políticas tem sido um processo lento e complexo ainda que muitos avanços tenham ocorrido no ano de 2023.

Palavras-chave: mudanças climáticas, energia, precificação de carbono.

ABSTRACT

SILVA, Rone Felipe Amaral. **Carbon pricing in the context of greenhouse gas emissions in the energy sector: perspectives for the European Union and Brazil**. Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Energy is a fundamental resource for human survival and social and economic progress. However, the use of fossil fuels in energy generation and the consequent emissions of greenhouse gases (GHG), mainly carbon dioxide (CO₂), emerge as a critical challenge in climate change; moreover, the energy sector is the main source of air pollution, affecting over 90% of the global population and resulting in more than 6 million premature deaths annually. In 2022, global GHG emissions reached more than 53 gigatonnes (Gt) of carbon dioxide equivalent (CO₂e), with 1,31 Gt of CO₂e attributable to Brazil and 3,58 Gt of CO₂e originating from the European Union (EU). Furthermore, 2023 was the hottest year ever recorded compared to previous years. In this scenario, the discussion on carbon pricing as a strategy for reducing CO₂ emissions gains relevance, driven by the development of specific programs and policies. This work is dedicated to presenting the perspectives of carbon pricing in Brazil and the EU, exploring their trends and approaches to addressing the challenges of decarbonizing the economy, especially regarding the requirements of the regulated carbon market that impact the energy sector. The methodology employed consisted of exploratory research involving a bibliographic survey; the objectives were directed towards gathering information, preferably within the scope of CO₂ emissions, and focusing efforts on analyzing the energy sector, both in Brazil and the EU. The research results indicate that, in comparison between Brazil and the EU, the European continent shows a more significant advance in carbon pricing policies. Such progress is correlated with the trend of reduction in CO₂ emissions from the energy sector observed in the EU. Additionally, it was found that, despite the proven effectiveness of regulated carbon policies in reducing emissions, these policies face resistance related to the implementation of new costs. On the other hand, in Brazil, it has been observed that the adoption of these policies has been a slow and complex process, even though many advancements have occurred in the year 2023.

Keywords: climate change, energy, carbon pricing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Impactos das mudanças climáticas para ecossistemas..... | 8 |
| Figura 2 - Impactos das mudanças climáticas para sistemas humanos..... | 9 |
| Figura 3 - Componentes do modelo global de energia..... | 15 |
| Figura 4 - Oferta e demanda global de energia por setor, cenário e combustível..... | 17 |
| Figura 5 - Emissões globais de CO ₂ provenientes da combustão de energia..... | 17 |
| Figura 6 - Oferta interna de energia do Brasil no ano de 2022 (%)..... | 19 |
| Figura 7 - Emissões de CO ₂ e nas atividades dos setores de energia e PIUP | 21 |
| Figura 8 - Emissões de CO ₂ e no setor de energia brasileiro (1970-2020)..... | 23 |
| Figura 9 - Emissões brutas de CO ₂ e por estado em 2020 | 23 |
| Figura 10 - Oferta interna de energia por fonte na EU no período 1990-2020 | 25 |
| Figura 11 - Intensidade de emissões de CO ₂ e no consumo de energia na UE | 27 |
| Figura 12 - Emissões de CO ₂ e no setor de energia europeu no período 1990-2020 | 29 |
| Figura 13 - Emissões de CO ₂ e do setor de energia por país na EU em 2022 | 30 |
| Figura 14 - Dinâmica geral da precificação de carbono | 34 |
| Figura 15 - Diferenças entre os três tipos de precificação de carbono..... | 35 |
| Figura 16 - Mapa resumido das iniciativas de precificação de carbono regionais, nacionais e subnacionais..... | 36 |
| Figura 17 - Iniciativas ativas de precificação de carbono e o percentual de emissões globais de GEE | 37 |
| Figura 18 - Esquema de funcionamento do tributo sobre carbono e do SCE | 43 |
| Figura 19 - Cobertura das emissões de GEE pelo mercado regulado de carbono ... | 46 |
| Figura 20 - Histórico das NDC do Brasil | 55 |
| Figura 21 - Principais marcos para emissão de carbono com balanço líquido neutro | 58 |
| Figura 22 - Projeções de reduções de CO ₂ e do <i>roadmap</i> da IEA | 59 |
| Figura 23 - Emissões setoriais que limitam o aquecimento terrestre a 1,5°C | 59 |
| Figura 24 - Emissões e remoções de CO ₂ e do Brasil, por setor, 2020-2050 | 61 |
| Figura 25 - Demanda nacional de derivados de petróleo | 64 |
| Figura 26 - Investimentos previstos no parque de refino nacional | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 - Uso primário de bioenergia por setor e agrupamento econômico no cenário de carbono neutro da IEA, 2010-2050 | 67 |
| Figura 28 - Projeção da oferta total de etanol..... | 68 |
| Figura 29 - Potencial de biogás com biomassa residual de cana-de-açúcar | 68 |
| Figura 30 - Demanda de biodiesel..... | 69 |
| Figura 31 - Consumo final de energia no transporte por combustível para modais selecionados, 2022-2050..... | 71 |
| Figura 32 - Comparação das emissões médias de GEE na avaliação do ciclo de vida “berço ao túmulo” (g CO ₂ e/km)..... | 72 |
| Figura 33 - Evolução das vendas de eletrificados leves no período 2021-2023 | 73 |
| Figura 34 - Emissões históricas e projetadas de instalações estacionárias cobertas pelo EU ETS na área econômica europeia..... | 75 |
| Figura 35 - Mudanças nas emissões cobertas pelo EU ETS por setor | 75 |
| Figura 36 - Evolução de preços no EU ETS no período 2017-2022..... | 77 |
| Figura 37 - Top 10 emissores da UE, 2017-2022..... | 79 |
| Figura 38 - Metas de redução de emissões dos Estados-Membro da EU | 86 |
| Figura 39 - Projeção de progresso setorial 2030 na UE..... | 87 |
| Figura 40 - Trajetória de emissões de CO ₂ e num cenário de 1,5 °C na EU..... | 88 |
| Figura 41 - Consumo de energia final por combustível na UE até 2050 | 89 |
| Figura 42 - Bioenergia e energias renováveis produzidas na UE (2005-2020) | 91 |
| Figura 43 - Evolução da produção de bioenergia na EU a partir de diferentes matérias-primas (2005-2020)..... | 91 |
| Figura 44 - Venda de veículos elétricos (2016-2023*) *Primeiro quadrimestre..... | 93 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Movimentos climáticos relevantes | 11 |
| Quadro 2 - Comparação resumida entre imposto sobre carbono e SCE | 44 |
| Quadro 3 - Propostas do pacote <i>Fit for 55</i> da UE..... | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Oferta interna de energia do Brasil entre 2013-2022 (%)..... | 19 |
| Tabela 2 - Oferta interna de energia na UE (Mtep) | 26 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------|--|
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| CBAM | <i>Carbon Border Adjustment Mechanism</i> |
| CBE | Cota Brasileira de Emissões |
| CEBDS | Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável |
| CH ₄ | Metano |
| CMV | Comissão de Valores Mobiliários |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| CO _{2e} | Dióxido de carbono equivalente |
| COP | Conferência das Partes |
| CPAs | Atividades de Projeto Componente |
| CRVE | Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões |
| EEA | Agência Europeia do Ambiente |
| EFTA | <i>European Free Trade Association</i> |
| ESG | <i>Environmental, Social and Governance</i> |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency</i> |
| EPA IE | <i>Environmental Protection Agency - Ireland</i> |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EU TS | <i>European Union Emissions Trading Scheme</i> |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| Gt | Gigatonelada |
| HFC | Hidrofluorcarbonetos |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| IETA | <i>International Emissions Trading Association</i> |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| IRENA | <i>International Renewable Energy Agency</i> |
| Kt | Quilotonelada |
| MBRE | Mercado Brasileiro de Redução de Emissões |
| MCTI | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações |
| MDL | Mecanismo de desenvolvimento limpo |

| | |
|------------------|--|
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| Mtep | Megatonelada equivalente de petróleo |
| Mton | Megatonelada |
| MWh | Megawatt-hora |
| NDC | Contribuição Nacionalmente Determinada |
| N ₂ O | Óxido nitroso |
| OCDE | Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico |
| ODS | Objetivo do Desenvolvimento Sustentável |
| OPEP | Organização dos Países Exportadores de Petróleo |
| PFC | Perfluorcarbonetos |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PIUP | Processos industriais e uso e produtos |
| PJ | Petajoule |
| PNMC | Política Nacional sobre Mudança do Clima |
| PNUMA | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| PRODES | Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite |
| PROINFA | Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| REC | Redução Certificada de Emissões |
| SBCE | Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa |
| SCE | Sistema de Comércio de Emissões |
| SEEG | Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa |
| SF ₆ | Hexafluoreto de enxofre |
| WMO | <i>World Meteorological Organization</i> |
| VE | Veículo elétrico |
| UE | União Europeia |
| UNEPCCC | UNEP Copenhagen Climate Centre |

UNFCCC

Convenção Quadro das Nações Unidas sobre
Mudanças Climáticas

UNGA

UN General Assembly

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 3 |
| 1.2 | ABORDAGEM METODOLÓGICA | 3 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 5 |
| 2.1 | CONTEXTO DAS EMISSÕES DE GEE E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS | 6 |
| 2.2 | MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E SUAS EMISSÕES DE CO ₂ | 13 |
| 2.2.1 | Modelo global de energia | 14 |
| 2.2.2 | Atual cenário mundial da matriz energética e suas emissões de CO₂. | 16 |
| 2.3 | MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL E SUAS EMISSÕES DE CO ₂ | 18 |
| 2.3.1 | Matriz Energética no Brasil | 18 |
| 2.3.2 | Emissões de CO₂ no setor de energia brasileiro. | 22 |
| 2.4 | MATRIZ ENERGÉTICA NA UE E SUAS EMISSÕES DE CO ₂ | 24 |
| 2.4.1 | Matriz Energética na UE. | 24 |
| 2.4.2 | Emissões de CO₂ no setor de energia da UE. | 28 |
| 2.4.3 | Matriz energética na UE pós início de guerra entre Rússia e Ucrânia. | 31 |
| 2.5 | PRECIFICAÇÃO REGULADA DE CARBONO | 32 |
| 2.5.1 | Tributo sobre o carbono | 38 |
| 2.5.2 | Sistema de Comércio de Emissões (SCE) | 38 |
| 2.5.3 | O maior SCE existente no mundo. | 40 |
| 2.5.4 | Tributo sobre carbono <i>versus</i> SCE | 41 |
| 2.5.5 | Benefícios da precificação de carbono e dificuldades enfrentadas pelo mercado de carbono. | 46 |
| 3 | ANÁLISE E DISCUSSÃO | 49 |
| 3.1 | PRECIFICAÇÃO DE CARBONO E O SETOR DE ENERGIA NO BRASIL | 50 |
| 3.1.1 | Últimas movimentações e perspectivas futuras do mercado regulado de carbono no Brasil | 50 |
| 3.1.2 | O caminho da transição energética no Brasil passa pela NDC e pelos planos energéticos brasileiros | 54 |
| 3.1.3 | O Brasil frente ao <i>roadmap</i> da IEA e a trajetória modelada pelo PCC. | 56 |
| 3.1.4 | Cenários de energias limpas e combustíveis fósseis no Brasil | 63 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 3.1.5 | Potencial das bioenergias no Brasil..... | 66 |
| 3.1.6 | O potencial da eletrificação do transporte no Brasil | 70 |
| 3.2 | PRECIFICAÇÃO DE CARBONO E O SETOR DE ENERGIA NA UE..... | 74 |
| 3.2.1 | Resultados do mercado de carbono na UE | 74 |
| 3.2.2 | Últimas movimentações e perspectivas futuras do mercado regulado de carbono na UE | 79 |
| 3.2.3 | O caminho da transição energética na UE passa pela NDC e pelos planos energéticos da UE..... | 82 |
| 3.2.4 | A UE frente ao <i>roadmap</i> da IEA e a trajetória modelada pelo PCC | 83 |
| 3.2.5 | Cenários de energias limpas e combustíveis fósseis na UE | 89 |
| 3.2.6 | Potencial das bioenergias na UE | 90 |
| 3.2.7 | O potencial da eletrificação no transporte na UE | 92 |
| 3.3 | APRENDIZADOS E PONTOS DE ATENÇÃO PARA O BRASIL..... | 94 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 98 |
| 4.1 | LIMITAÇÕES..... | 102 |
| 4.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 103 |
| | REFERÊNCIAS..... | 104 |

1 INTRODUÇÃO

A energia é um recurso da natureza essencial na sociedade. No entanto, tão importante quanto é vital para o crescimento econômico, assim também o seu uso equilibrado é fundamental para garantir a existência sustentável de diversos ecossistemas terrestres e aquáticos, além do bem-estar dos seres humanos.

Atualmente, a humanidade vivencia um momento de necessidade de transição da matriz energética, majoritariamente fóssil, para fontes de energia renováveis e com baixa emissão de carbono. Essa necessidade surge, principalmente, diante dos desafios ambientais significativos que foram impostos pelas mudanças climáticas em função do longo histórico da queima de combustíveis fósseis, com consequente emissão GEE, principalmente o CO₂.

No que diz respeito aos impactos ambientais adversos, tais como maiores períodos de seca e escassez de água, perda de biodiversidade e chuvas mais intensas, por exemplo, causados pelo uso de combustíveis fósseis, as emissões de GEE, representam um problema urgente. Desde a Revolução Industrial, as emissões de GEE aumentaram drasticamente e atingiram níveis alarmantes, provocando a elevação significativa da temperatura média do planeta (NASSAR *et al.*, 2022; RAHMAN *et al.*, 2022)

De acordo com a Comissão Europeia, em seu relatório *GHG Emission of All World Countries 2023*, no ano de 2022, as emissões globais totais de GEE representaram 53,78 Gt de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Dessas emissões, 1,31 Gt de CO₂e correspondem às emissões do Brasil (2,44%), e 3,58 Gt de CO₂e têm origem na UE (6,67%). Além disso, da emissão total global de GEE emitido no mundo neste período, 38,52 Gt correspondem ao CO₂, sendo 0,46 Gt de CO₂ emitidos no Brasil (1,21%) e 2,80 Gt de CO₂ provenientes da UE (7,28%) (COMISSÃO EUROPEIA, 2023c).

O ano de 2023 foi registrado como o mais quente em comparação com anos anteriores, de acordo com a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - IEA*, em inglês) (IEA, 2024). Além disso, o Sexto Relatório Síntese do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*, em inglês) - *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*

- indica que o aquecimento global deve continuar a aumentar no curto prazo (2021-2040), principalmente devido ao aumento das emissões acumuladas de CO₂ em quase todos os cenários e trajetórias apontados no relatório.

No curto prazo, todas as regiões do mundo deverão enfrentar incrementos nos perigos climáticos, elevando múltiplos riscos para ecossistemas e seres humanos. Isso inclui eventos extremos, além de perdas e danos expressivamente concentrados entre as populações mais pobres e vulneráveis.

Nessa conjuntura, o AR6 também destaca que reduções significativas e rápidas nas emissões de GEE, atingindo zero líquido de emissões de CO₂ e incluindo reduções consideráveis nas emissões de outros GEE, especialmente o metano (CH₄), são essenciais para limitar o aquecimento a 1,5°C ou menos de 2°C até o final do século.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana (*Environmental Protection Agency* - EPA, em inglês), globalmente, as principais fontes de emissões de GEE são provenientes da produção de eletricidade e calor. Isso coloca o setor de energia como um dos grandes desafios na transição para uma economia de baixo carbono (CHOVANCOVÁ; QUREITEM *et al.*, 2020; TEJ, 2020). Esta tendência, predominante no cenário global, contrasta com a realidade brasileira, onde a mudança do uso da terra e a agropecuária são os principais impulsionadores das emissões de GEE no país. No entanto, historicamente, o setor de energia no Brasil também demonstra um significativo crescimento em suas emissões. De 1990 a 2019, houve um aumento de 114% nas emissões (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021a; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021b).

Devido à natureza descentralizada e ao alcance global das mudanças climáticas, é necessária a cooperação de todas as nações. No entanto, muitas delas ainda estão discutindo ações de redução das emissões de GEE que não foram adotadas. Conforme apontado pelo AR6, as políticas atuais declaradas pelos governos indicam que é provável que o aquecimento global exceda 1,5°C durante o século XXI, o que tornaria mais difícil limitar o aquecimento a menos de 2°C.

Limites rígidos para a adaptação já estão sendo alcançados em alguns setores e regiões, enquanto a mal adaptação também está aumentando em outras. Sob essas condições, conforme apontado por Ferreira, Dias e Lius (2022) os debates

sobre os custos e a precificação do carbono para acelerar a redução das emissões de CO₂ estão se intensificando à medida que programas e políticas são desenvolvidos para alcançar a neutralidade do carbono.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral comparar os cenários regulatórios das políticas reguladoras de carbono e apresentar os cenários da transição energética e as emissões de GEE, principalmente CO₂, no Brasil e na UE.

Os objetivos específicos foram:

- Mapear o panorama das políticas reguladoras de precificação de carbono em vigor no Brasil e na UE.
- Examinar os desenvolvimentos recentes e as iniciativas em curso no Brasil e na EU relativas à adoção e ao aperfeiçoamento de políticas reguladoras de precificação de carbono, destacando avanços significativos e estratégias implementadas.
- Analisar a evolução das emissões de GEE no Brasil e na EU.
- Investigar a coordenação das estratégias adotadas pelo Brasil e pela EU para promover uma transição energética com ênfase especial no setor de energia.
- Trazer lições aprendidas para o Brasil no cenário regulatório de precificação de carbono e na transição energética.

1.2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem metodológica do trabalho seguiu a modalidade de pesquisa exploratória conforme apontam Gil (2002) e Severino (2014), envolvendo levantamento bibliográfico realizado a partir de registros disponíveis decorrentes de pesquisas anteriores, como livros, artigos, relatórios e documentos técnicos com o propósito de desenvolver conhecimentos direcionados e trazer respostas aos objetivos da dissertação. Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa foi orientada

para o levantamento de informações sobre políticas reguladoras de carbono e emissões de GEE no Brasil e na UE, delimitando os objetivos à verificação central do setor de energia. A abordagem para respostas aos objetivos empregou componentes qualitativos e quantitativos.

O processo de coleta de dados foi realizado entre agosto de 2023 e abril de 2024. Para isso, foram realizadas pesquisas em bases de dados de artigos científicos disponíveis no Portal da Fundação CAPES, incluindo plataformas como *ScienceDirect*, *Springer Link*, *MDPI* e *IOPscience*, entre outras.

As consultas a normas e legislações atuais relacionadas à precificação de carbono no Brasil e na UE foram feitas nas bases do Senado Federal Brasileiro e do Parlamento Europeu da Comissão Europeia.

Os dados sobre emissões, matrizes energéticas e análises setoriais foram obtidos por meio de relatórios oficiais dos governos do Brasil e da EU; dentre esses, destacam-se os relatórios da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia (MME) do Brasil e da Diretoria-Geral de Energia da Comissão Europeia (*Directorate-General for Energy* - DG ENER).

Quando necessário, a complementação das informações foi feita por meio de relatórios do IPCC e da IEA, entre outras bases de dados como organizações e associações ambientais e setoriais.

Alguns dados utilizados na pesquisa foram limitados aos anos mais recentes disponíveis, em alguns casos até o ano de 2023, quando possível.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, abordam-se aspectos gerais que contextualizam o cenário das emissões de CO₂ e seus impactos críticos nas mudanças climáticas, bem como movimentos globais significativos relacionados aos apelos climáticos.

Ademais, são mostradas as matrizes energéticas e as emissões de CO₂ e no âmbito mundial para o setor energético, além do brasileiro e europeu, destacando-se a importância do setor de energia como um dos principais contribuintes para a emissões em um contexto global.

Elucida-se o papel das políticas reguladas de precificação de carbono no contexto climático, incluindo-se as taxas de precificação de carbono e os sistemas de comércio de emissões (SCE).

Por fim, apresentam-se os cenários de referência no Brasil e na UE para a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes no setor de energia, enfocando o contexto da transição energética para emissões de carbono neutro.

2.1 CONTEXTO DAS EMISSÕES DE GEE E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A racionalidade humana foi fundamental para a revolução industrial, crescimento econômico e qualidade de vida. No entanto, resultou em degradação e problemas ambientais. Estes incluem perdas da biodiversidade, extremos eventos climáticos e meteorológicos entre outros (BORGES; RODRIGUES; COSTA, 2021; SILVEIRA, 2018).

O AR6 do IPCC afirma que as atividades humanas, notadamente devido às emissões de GEE, constituem a principal causa do aquecimento global, elevando a temperatura superficial terrestre em 1,1°C acima dos níveis de 1850-1900 no período entre 2011-2020. Este aumento é consequência das emissões globais desses gases, que têm crescido continuamente devido ao uso insustentável de energia, à mudança e ao uso do solo e padrões de consumo e produção intensos (IPCC, 2023).

As mudanças climáticas representam transformações de longo prazo nos padrões de temperatura e clima, podendo ser naturais ocorrendo por meio de variações no ciclo solar. No entanto, a partir de 1800, as atividades humanas, principalmente a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), tornaram-se o principal motor dessas mudanças (ONU, 2024).

A queima destes combustíveis emite GEE, que atuam como um cobertor ao redor da Terra, retendo calor recebido da radiação solar e elevando as temperaturas globais. Além do CO₂, as emissões de GEE incluem metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆), contribuindo significativamente para as mudanças climáticas (ONU, 2024).

Juntamente com a queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, que liberam CO₂, e dos aterros sanitários, que são grandes fontes de CH₄, diversos setores têm contribuição significativa nas emissões de GEE. Energia, indústria, transporte, construção, agricultura e uso do solo destacam-se entre os principais contribuintes (ONU, 2024).

O aquecimento global representa sérios riscos para as comunidades e ecossistemas neste século, e os primeiros impactos já são visíveis (IPCC, 2022).

As figuras 1 e 2 apresentam os impactos das mudanças climáticas para ecossistemas aquáticos e terrestres e seres humanos.

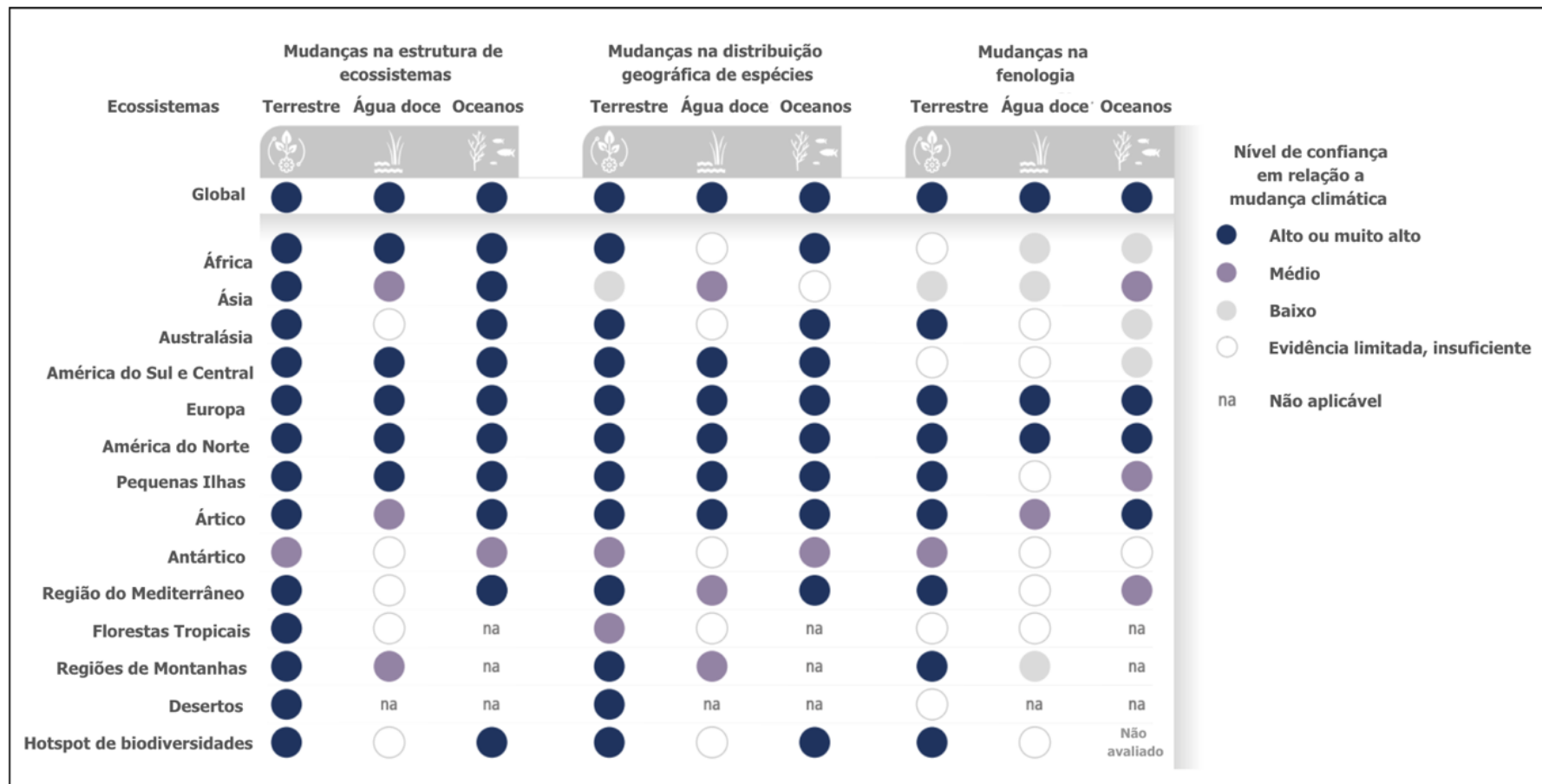


Figura 1 - Impactos das mudanças climáticas para ecossistemas
 Fonte: IPCC (2022)

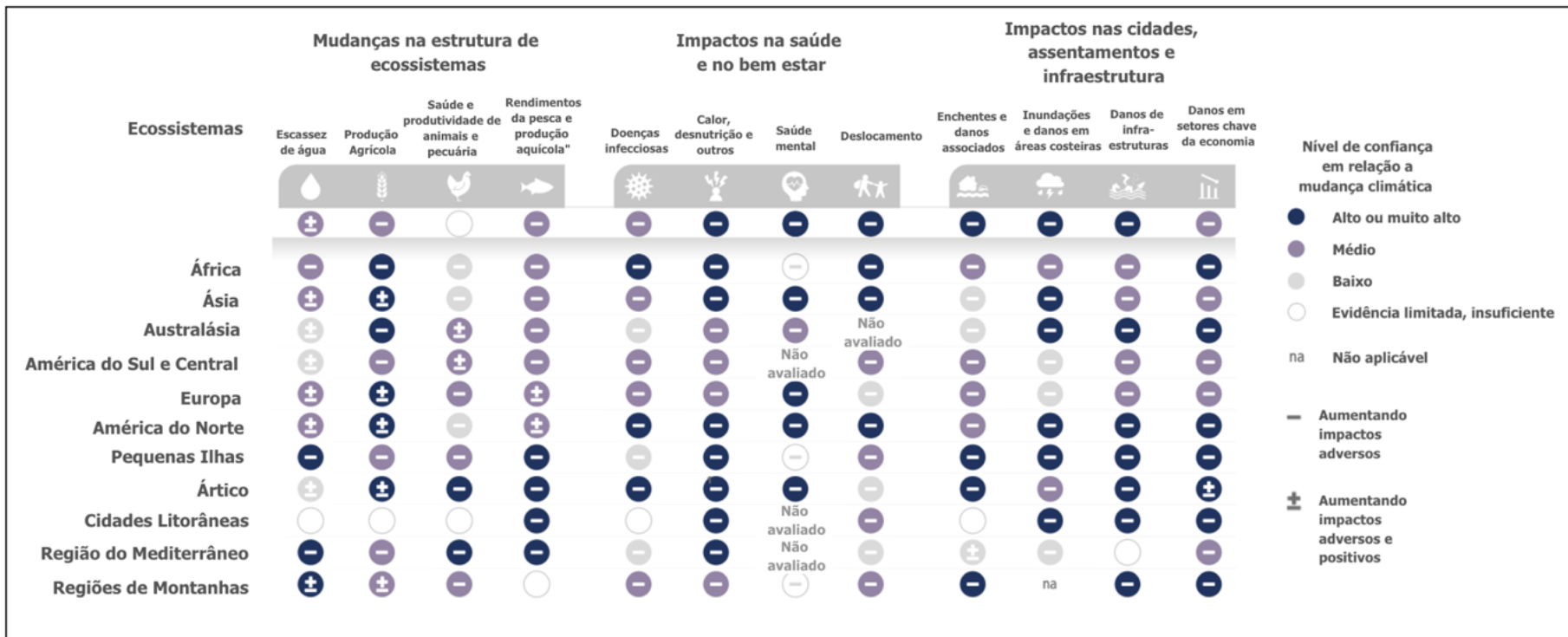


Figura 2 - Impactos das mudanças climáticas para sistemas humanos
 Fonte: IPCC (2022)

As mudanças climáticas têm levado a eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos. O aumento da frequência e severidades desses eventos climáticos tem exacerbado condições já extremas de calor, secas prolongadas, eventos de precipitação intensa e condições propícias à incêndios. Tais condições resultam não apenas em perdas diretas de biodiversidade, como também deterioram a saúde física e mental das populações, reduzem a segurança alimentar e hídrica e comprometem infraestruturas (IPCC, 2022).

São observadas generalizações dos danos aos ecossistemas terrestres, marinhos e costeiros, com uma diminuição marcante na resiliência e na capacidade de adaptação natural desses sistemas. A estrutura e função de múltiplos ecossistemas têm sido alteradas, implicando mudanças significativas nas faixas geográficas das espécies e nos ciclos de vida sazonais (fenologia). Esses impactos não são apenas generalizados, mas também pervasivos, afetando uma ampla gama de espécies e biomas, com impactos socioeconômicos negativos profundos duradouros (IPCC, 2022)

Regiões como África, América do Sul e Central, Europa, Pequenas Ilhas e Ártico são as que acumulam o maior número de impactos altos e crescentes em decorrência das mudanças climáticas.

A África enfrenta desafios severos de insegurança alimentar e desnutrição, exacerbados por secas e inundações frequentes, além de deslocamentos e danos em setores chaves da economia entre outros. Esses eventos têm uma correlação direta com as mudanças climáticas e impactam de forma desproporcional as comunidades mais vulneráveis, ampliando a pobreza e a desigualdade social. A vulnerabilidade é especialmente aguda na África Subsaariana, onde a desnutrição e as deficiências de micronutrientes são preocupantes (IPCC, 2022).

Na América do Sul e Central, os impactos são igualmente graves, com uma incidência crescente de insegurança alimentar aguda, doenças infecciosas, calor e desnutrição. As mudanças climáticas têm agravado a frequência e intensidade de fenômenos climáticos extremos que afetam diretamente a disponibilidade de recursos hídricos e a produtividade agrícola, essenciais para a subsistência de comunidades indígenas e locais. Além disso, há um aumento no risco de doenças transmitidas por

vetores, como a dengue, que se expandem com o aumento das temperaturas e mudanças nos padrões de precipitação (IPCC, 2022).

Europa e Pequenas Ilhas compartilham a preocupação mudanças adversas negativas aumentando na estrutura da saúde e produtividade de animais e pecuárias, além de calor e desnutrição, enchentes e danos de infraestruturas. Enquanto a Europa enfrenta desafios com a expansão da distribuição geográfica de doenças infecciosas, as Pequenas Ilhas lidam com a ameaça existencial da submersão de territórios, o que compromete a segurança alimentar, hídrica e a própria habitabilidade dessas regiões (IPCC, 2022).

São muitos os problemas ambientais causados pelas mudanças climáticas, por isso, os movimentos globais de discussão sobre o tema existem há décadas para promover a cooperação internacional e o envolvimento da ciência na busca de soluções. O quadro 1 sintetiza movimentos climáticos relevantes, desde a criação do IPCC até a COP28, realizada em 2023 nos Emirados Árabes.

Quadro 1 - Movimentos climáticos relevantes

| Ano | Evento | Fonte |
|------|---|-----------------|
| 1988 | Criação do IPCC pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). | IPCC (2024) |
| 1990 | Lançamento do 1º Relatório de Avaliação do IPCC, que inspirou uma Declaração Ministerial durante a Segunda Conferência Mundial do Clima, recomendando a criação de um tratado internacional sobre o tema. | ICS (2021) |
| 1992 | Realização da Conferência Rio-92, onde a comunidade internacional criou a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) com o objetivo de discutir e definir formas de estabilizar a quantidade de GEE na atmosfera e prevenir mudanças climáticas perigosas causadas por atividades humanas. | OLIVEIRA (2023) |
| 1994 | Entra em vigor a Convenção do Clima com a adesão de 188 países. Ela estabeleceu o compromisso dos países industrializados, conhecidos como países do Anexo I no âmbito do Protocolo de Quioto, de reduzir suas emissões de GEE. | OLIVEIRA (2023) |

Fonte: elaboração própria

Quadro 1 - Movimentos climáticos relevantes (continuação)

| Ano | Evento | Fonte |
|------|---|---|
| 1997 | O Protocolo de Quioto estabeleceu os fundamentos do debate internacional sobre a precificação de emissões de carbono como uma abordagem para lidar com as mudanças climáticas, criando metas de redução de emissões para os países do Anexo I da Convenção Quadro, membros da Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE). | BITTENCOURT; BUSCH; CRUZ (2018) |
| 2015 | Firmado o Acordo de Paris, pelo qual 195 países decidiram estabelecer suas próprias metas de redução de emissões, válidas tanto para os países do Anexo I quanto para os demais. | UNFCCC (2021) |
| 2019 | Realização da COP25 em Madri, Espanha, com propostas de melhorias no desenvolvimento e transferência de tecnologia climática, orçamentos e cronogramas futuros. A COP25 chegou ao último dia sem acordo e as pendências foram adiadas para a COP26. | BARBADO; LEAL (2021) |
| 2021 | Realização da COP26 em Glasgow, Escócia, onde foram regulamentadas as últimas cláusulas do Acordo de Paris e estabelecidos mecanismos de mercado de carbono com abrangência mundial. É proposto pela UE o mecanismo de ajuste de carbono na fronteira, conhecido como CBAM, pelo qual determinados produtos importados serão taxados quando advirem de países que não têm adequados sistemas de precificação regulada de carbono. | MAAT (2022) |
| 2022 | Realização da COP27 em Sharm el-Sheikhno, Egito, sendo concluída com um pacto para estabelecer um mecanismo de financiamento destinado a ressarcir as nações mais afetadas por desastres climáticos severos. | ONU (2022) |
| 2023 | Realização da COP28 em Dubai, Emirados Árabes, com um consenso final que não satisfaz a comunidade científica, pois falhou em abordar a necessidade de eliminar combustíveis fósseis. Seu plano não detalhou estratégias para a transição energética e não estabeleceu prazos, apenas promessa de uma diminuição progressiva no uso de combustíveis fósseis. | Associação Brasileira de Ciências (2024) |

Fonte: elaboração própria

No que diz respeito às ações no setor de energia, a popularização de iniciativas transformadoras teve início após a adoção do Acordo sobre Mudança Climática na Conferência do Clima de Paris (COP21) em 2015 (KOCHANNEK, 2021). Em meio aos conceitos de governança climática, surgiu, também, ao longo das Conferências das Partes, a definição de Contribuição Nacionalmente Determinada (*Nationally Determined Contributions* - NDC, em inglês); a NDC trata de medidas voluntárias de mitigação de GEE estabelecidas pelos Estados Partes com o objetivo de cooperar para limitar o aquecimento global (BICHARA; OLIVEIRA, 2023).

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E SUAS EMISSÕES DE CO₂

A dinâmica mundial de energia permanece vulnerável, enfrentando desafios significativos, mas também apresentando oportunidades para melhorar a segurança energética e reduzir as emissões de GEE (IEA, 2023b).

Desde o início da existência humana, houve várias transições significativas no uso de energia, evoluindo da força humana e animal para a era dos combustíveis fósseis, como petróleo e carvão (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Essa trajetória inclui duas grandes transformações na configuração global de recursos energéticos. A primeira foi uma revolução energética que marcou a transição do uso da madeira para o carvão; a segunda transformação concentrou-se na competição entre petróleo e gás contra o carvão. Essas mudanças foram principalmente impulsionadas pela inovação em novas formas de uso de energia e pelo desenvolvimento de equipamentos derivados das máquinas a vapor e eletricidade (ALMEIDA *et al.*, 2022; ZHANG; TANG, 2023; ZOU *et al.*, 2021).

Na contemporaneidade, a humanidade está vivenciando a terceira transformação, que conduz à transição energética de combustíveis fósseis convencionais para novas fontes de energia (ALMEIDA *et al.*, 2022).

No ambiente global de energia, a palavra “transição energética” está cada vez mais em evidência. Entende-se por “transição energética” o processo de mudança de uma matriz de fonte de energia que utiliza combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, que são grandes emissores de CO₂, para fontes de

energia mais limpas e renováveis, como sol, água, vento e biomassa, que emitem menos GEE (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Em 2022 as emissões de CO₂ relacionadas à energia em nível global tiveram um aumento de 0,9%, resultando em um acréscimo de 321 milhões de toneladas métricas neste ano, atingindo um recorde de mais de 36,8 Gt; já em 2023 elas aumentaram 1,1%, registrando novo recorde de 37,4 Gt (figura 5) (IEA, 2023a; IEA, 2024).

A IEA ainda aponta que há a perspectiva de um pico de emissões previsto para meados desta década no cenário de políticas declaradas, ou seja, no atual modelo de negócios e governança existente sobre a temática (IEA, 2023c).

É importante ressaltar que o setor energético é a principal fonte de poluição do ar, afetando mais de 90% da população mundial e resultando em mais de 6 milhões de mortes prematuras anualmente (IEA, 2023b).

2.2.1 Modelo global de energia

O modelo global de energia abrange três aspectos principais do sistema energético: demanda de energia (primária e final), transformação de energia e fornecimento de energia. Este modelo utiliza uma abordagem de equilíbrio parcial e incorpora a sensibilidade aos preços. Ele representa a conversão de energia primária ao longo das cadeias de suprimento energético para atender à demanda por serviços energéticos, que é a energia final consumida pelos usuários (figura 3) (IEA, 2022b).

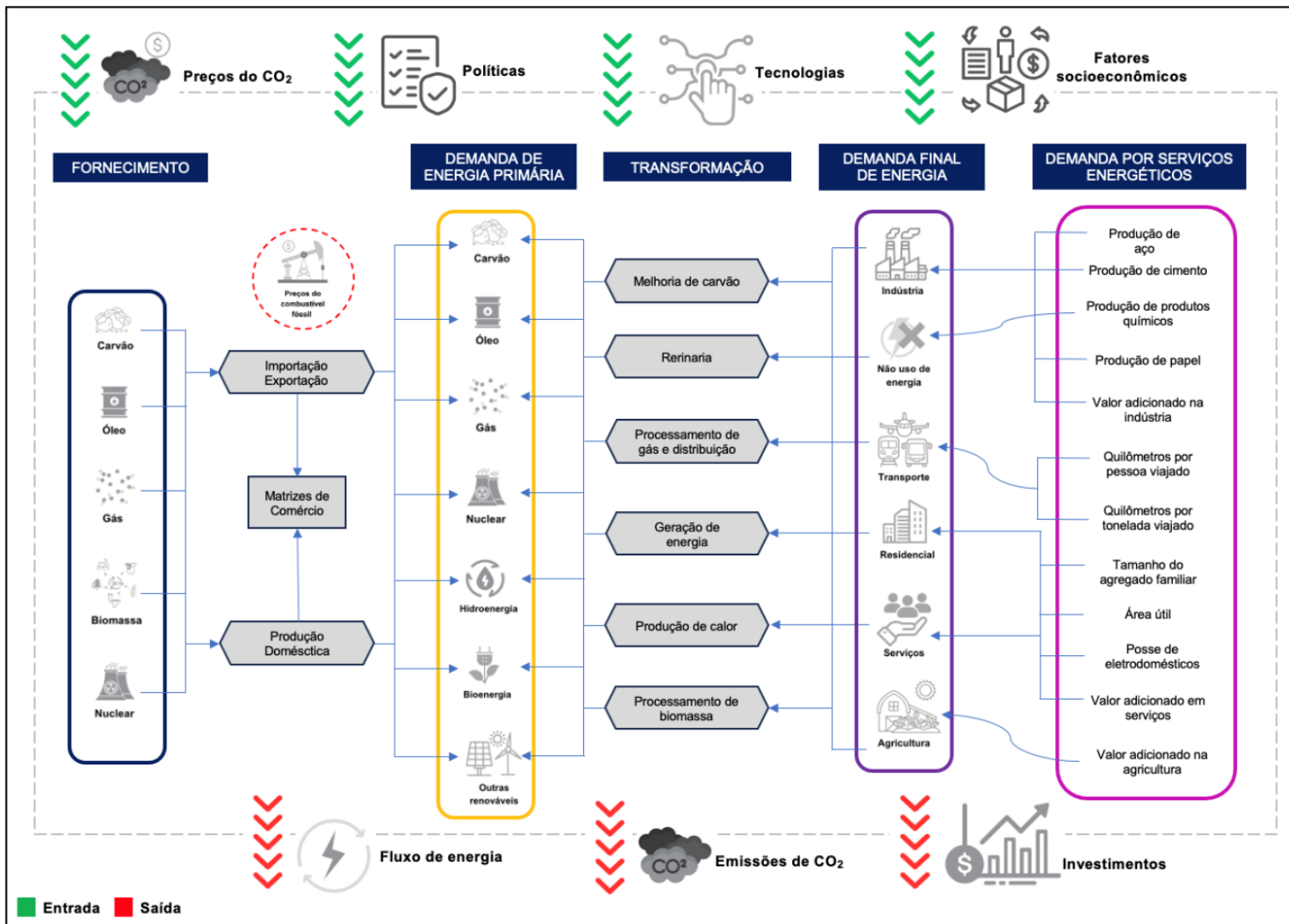


Figura 3 - Componentes do modelo global de energia
 Fonte: elaboração própria com base nos dados de IEA (2016) e IEA (2022b)

Os diversos aspectos do modelo, responsáveis pelo fornecimento, transformação e demanda, estão dinamicamente interligados: o consumo de eletricidade, biocombustíveis, produtos derivados do petróleo, carvão e gás natural no setor de uso final impulsiona os módulos de transformação e fornecimento, os quais, por sua vez, retroalimentam os preços da energia para o módulo de demanda em um processo iterativo. Além disso, o modelo avalia as emissões de CO₂ provenientes do sistema energético (IEA, 2022b).

O balanço da matriz energética expressa o equilíbrio das diversas etapas do processo energético: fornecimento, demanda de energia primária, transformação, demanda final de energia e demanda por serviços energéticos. A energia primária compreende os produtos energéticos providos pela natureza em sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica, entre outros. O setor de transformação abrange todos os centros de transformação nos quais a energia que entra se converte em uma ou mais formas de energia (secundária - querosene, óleo diesel, nafta - com suas correspondentes perdas na transformação) (EPE, 2023a).

2.2.2 Atual cenário mundial da matriz energética e suas emissões de CO₂

O setor energético, responsável por cerca de três quartos das emissões de GEE no mundo, desempenha um papel central nos debates sobre as mudanças climáticas, devido à intensa preocupação da comunidade internacional com o meio ambiente (DELGADO, FILGUEIRAS, 2022; KRELL; SOUZA, 2020).

De acordo com dados da IEA (2022a), os setores que mais demandam o uso de energia em todo o mundo são, nesta ordem: indústria (incluindo o uso de calor e eletricidade), edificações (residenciais, comerciais e institucionais) e transporte (figura 4).

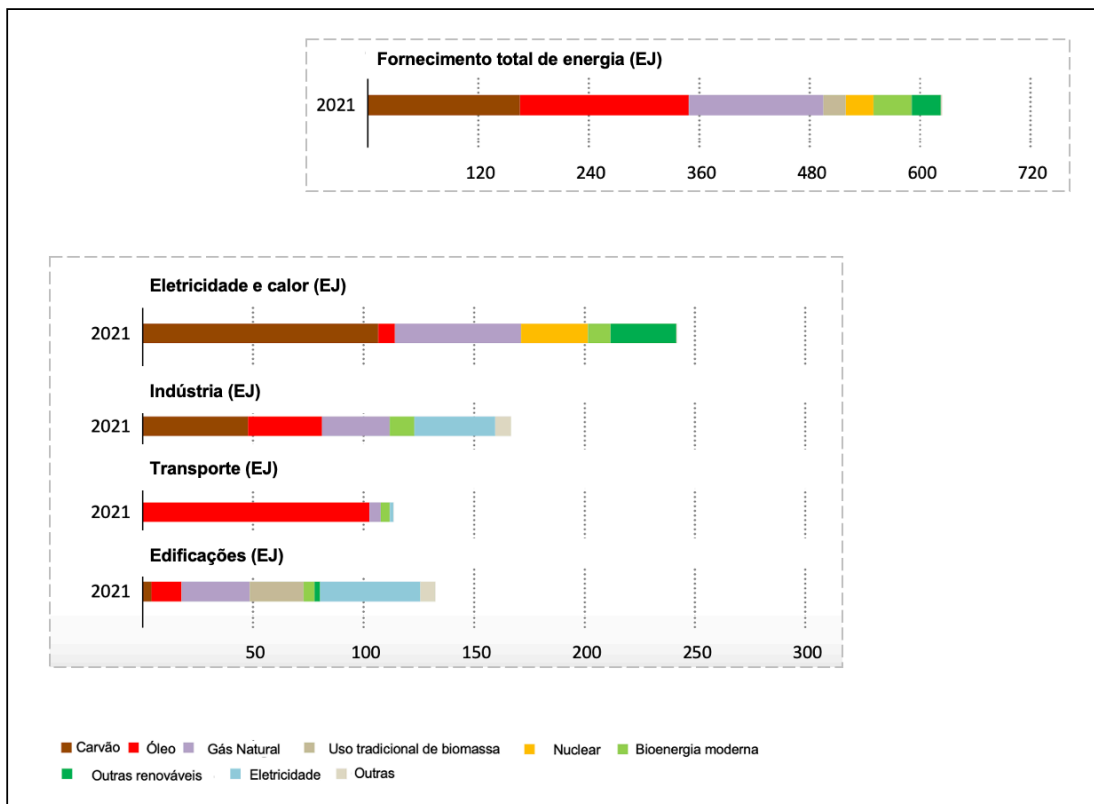


Figura 4 - Oferta e demanda global de energia por setor, cenário e combustível
 Fonte: adaptado de IEA (2022a)

Conforme já destacado, em 2023 as emissões de CO₂ relacionadas à energia em nível global registraram um novo recorde de 37,4 Gt (figura 5).

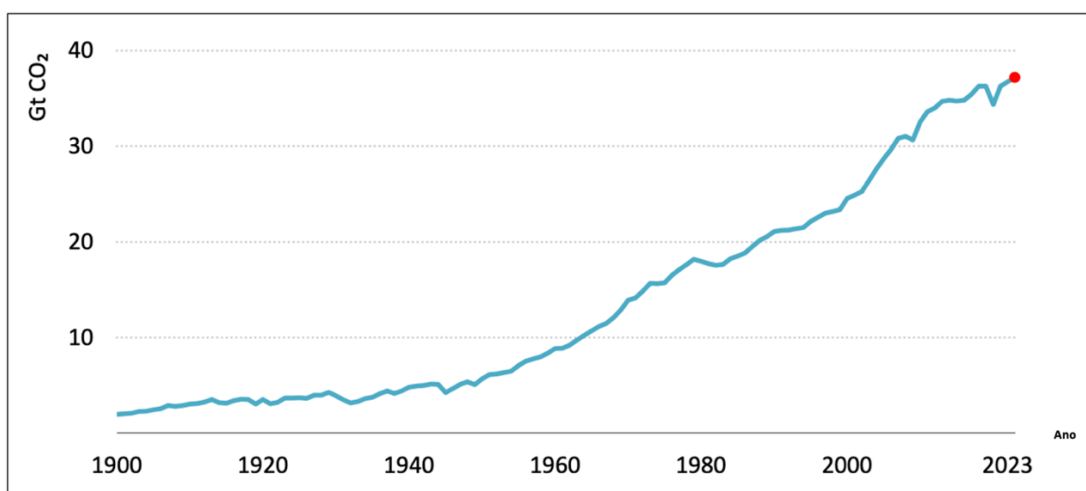


Figura 5 - Emissões globais de CO₂ provenientes da combustão de energia e processos industriais e sua variação (1900-2023)
 Fonte: IEA (2024)

Desafios específicos em 2022 contribuíram para o aumento nas emissões: demanda por resfriamento e aquecimento durante condições climáticas extremas, indisponibilidade das usinas nucleares e hidrelétricas (IEA, 2023a; IEA, 2024).

A necessidade premente de descarbonizar o panorama global de fornecimento de energia, imposta pela crise climática, está profundamente entrelaçada com a reconfiguração da geopolítica do século XXI (COUTINHO; DIAS, 2022; HAFNER; TAGLIAPIETRA, 2020).

No entanto, essa transformação complexa da matriz energética global se desenrola de maneira multifacetada, manifestando-se intrinsecamente nas circunstâncias socioambientais, econômico-financeiras e geopolíticas distintas de cada nação (COUTINHO; DIAS, 2022; HAFNER; TAGLIAPIETRA, 2020).

2.3 MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL E SUAS EMISSÕES DE CO₂

2.3.1 Matriz Energética no Brasil

Ao longo dos anos, a matriz energética do Brasil apresenta uma participação relevante de combustíveis fósseis, embora tenha havido uma leve queda na sua contribuição entre 2013 e 2022, de acordo com dados do Balanço Energético Nacional (BEN) referentes ao ano-base de 2022. Esses dados podem ser visualizados na figura 6 e na tabela 1.

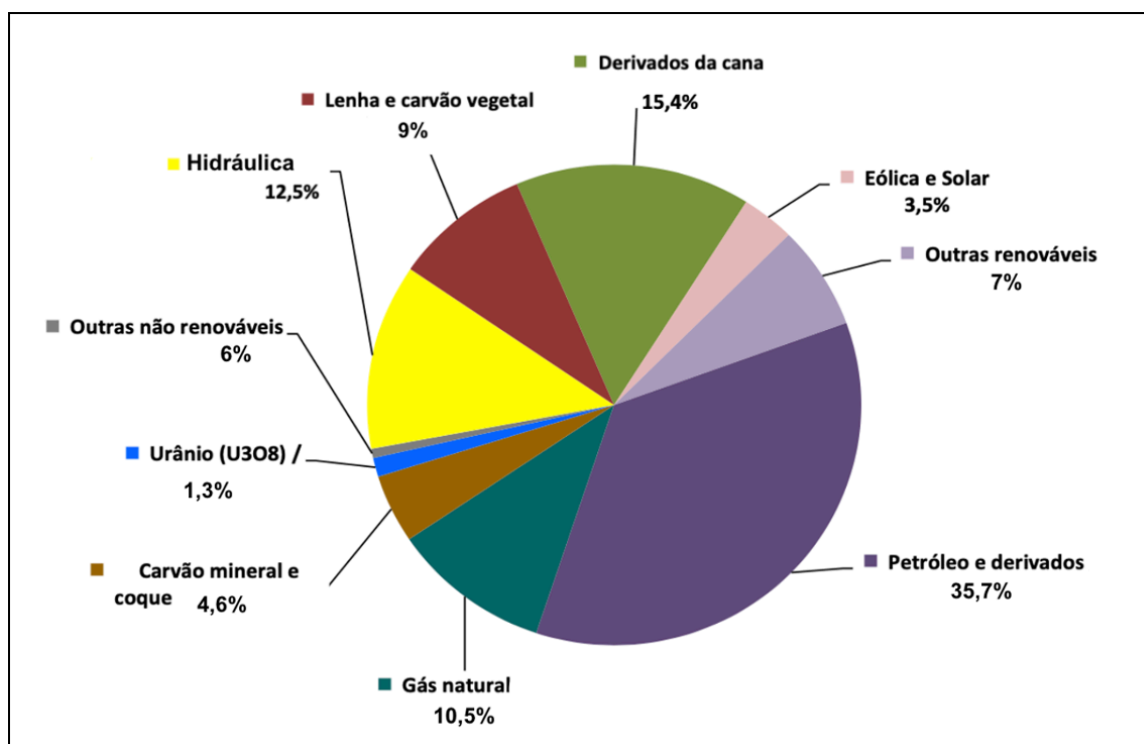


Figura 6 - Oferta interna de energia do Brasil no ano de 2022 (%)
Fonte: EPE (2023a)

Tabela 1 - Oferta interna de energia do Brasil entre 2013-2022 (%)

| FONTES | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | 59,4 | 60,3 | 58,5 | 56,3 | 56,6 | 54,2 | 53,6 | 51,3 | 55,0 | 52,6 |
| PETRÓLEO E DERIVADOS | 39,1 | 39,2 | 37,2 | 36,4 | 36,0 | 34,1 | 34,1 | 32,9 | 34,2 | 35,7 |
| GÁS NATURAL | 12,7 | 13,5 | 13,6 | 12,3 | 12,9 | 12,3 | 12,2 | 11,7 | 13,3 | 10,5 |
| CARVÃO MINERAL E COQUE | 5,6 | 5,7 | 5,9 | 5,5 | 5,7 | 5,6 | 5,2 | 4,8 | 5,6 | 4,6 |
| URÂNIO (U ₃ O ₈) | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| OUTRAS NÃO RENOVÁVEIS | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ENERGIA RENOVÁVEL | 40,6 | 39,7 | 41,5 | 43,7 | 43,4 | 45,8 | 46,4 | 48,7 | 45,0 | 47,4 |
| HIDRÁULICA ¹ | 12,5 | 11,4 | 11,3 | 12,5 | 11,9 | 12,5 | 12,3 | 12,5 | 10,9 | 12,5 |
| LENHA E CARVÃO VEGETAL | 8,4 | 8,2 | 8,3 | 8,1 | 8,4 | 9,0 | 8,9 | 9,1 | 9,0 | 9,0 |
| DERIVADOS DA CANA | 16,0 | 15,7 | 16,9 | 17,4 | 16,9 | 17,2 | 17,9 | 19,0 | 16,3 | 15,4 |
| EÓLICA | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 2,1 | 2,3 |
| SOLAR | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,2 |
| OUTRAS RENOVÁVEIS | 3,4 | 3,7 | 4,1 | 4,4 | 4,7 | 5,3 | 5,2 | 5,7 | 5,9 | 7,0 |
| TOTAL | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

1. Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica. 1 kWh = 860 kcal (equivalente térmico teórico – primeiro princípio da termodinâmica).

Fonte: adaptado de EPE (2023a)

De forma mais expressiva, no ano de 2022, as fontes de energia fóssil tiveram uma maior contribuição no Brasil, sendo lideradas pelo uso de petróleo e derivados (35,7%), seguido pelo gás natural (10,5%) e carvão mineral e coque (4,6%). A variação na oferta interna de energia renovável entre 2013 e 2022 não foi tão significativa, mas essas fontes continuam tendo uma menor contribuição, embora estejam quase em pé de igualdade com as fontes de energia fóssil nos últimos três anos. Mais significativas, no ano de 2022, as energias renováveis tiveram maior contribuição no uso de derivados de cana (15,4%), hidráulica (12,5%) e lenha e carvão vegetal (9%).

O Brasil está em um estágio avançado de sua transição no setor energético e possui uma matriz energética onde aproximadamente metade de sua energia primária provém de fontes renováveis (47,5% em 2022). Além disso, o país se destaca pois sua capacidade de renovabilidade é três vezes superior à média global (14% em 2019) (EPE, 2023a; WORLD ENERGY DATA, 2023).

Apesar de o Brasil apresentar uma vantagem comparativa significativa na média de consumo de energia renovável em relação aos demais países, possuindo grande potencial para ampliar ainda mais o uso de fontes renováveis e liderar a transição energética, ainda é necessário superar críticas ao modelo de gestão da sua matriz energética e combater interesses de setores específicos que se opõem à tendência global de descarbonização. Isso se faz ainda mais relevante considerando que o Brasil assumiu o compromisso internacional de aumentar o uso de energias renováveis em 18% até 2030 (IPEA, 2023; WORLD ENERGY DATA, 2023).

De acordo com dados do Observatório do Clima (2023a), em 2021, somente o setor de energia, juntamente com o setor de processos industriais e uso de produtos (PIUP), emitiram 542,6 milhões de CO₂e (figura 7).

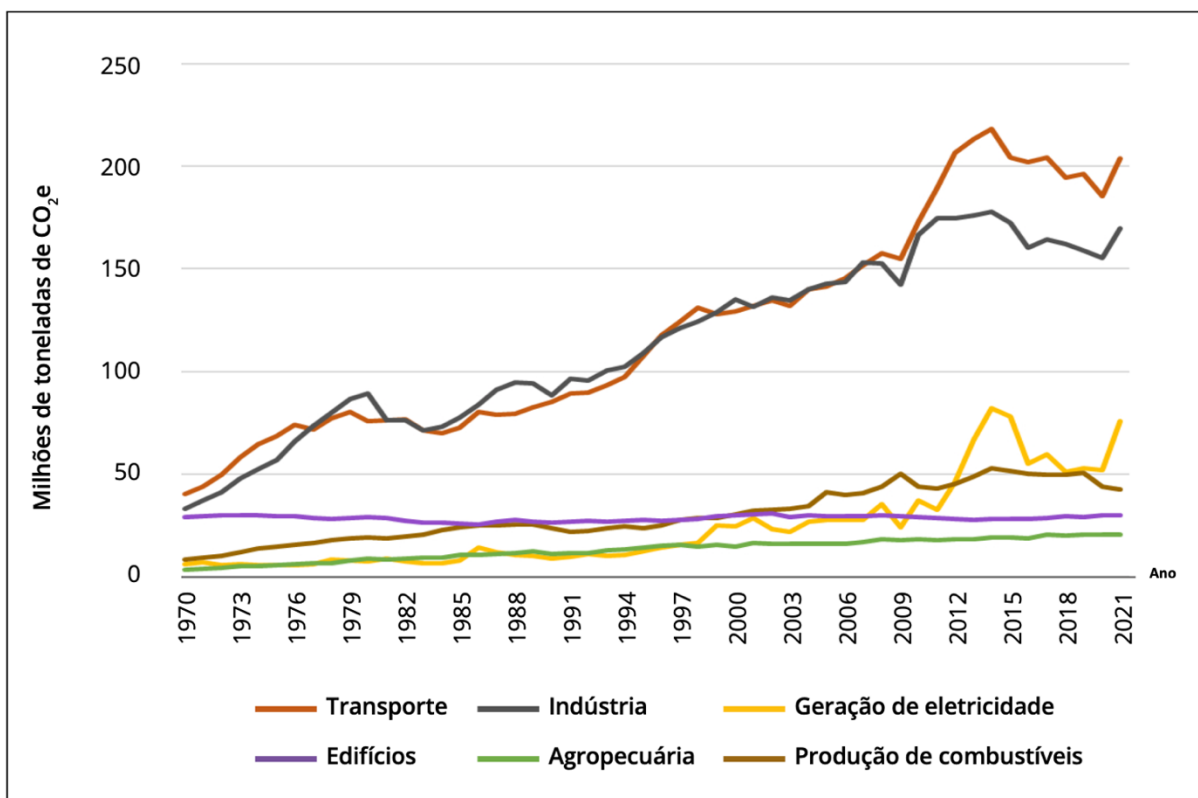


Figura 7 - Emissões de CO₂e nas atividades dos setores de energia e PIUP
 Fonte: OBSERVATÓRIO DO CLIMA (2023a)

Em conjunto, os setores que abrangem a produção de energia e os PIUP contribuíram com 22% das emissões totais registradas no Brasil durante o ano de 2021. Deste total, 18% correspondem às emissões originadas pela geração de energia, enquanto os restantes 4% derivam de PIUP. Ambos os segmentos experimentaram um aumento em suas emissões em comparação ao ano anterior: 12% no setor energético e 8% no domínio de PIUP. Essa tendência resultou nas emissões anuais de energia atingindo níveis sem precedentes desde 2015, enquanto as emissões decorrentes de PIUP atingiram seu ápice na série histórica que compreende o período de 1970 a 2021 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023a).

A elevada taxa de aumento das emissões deve-se, em parte, ao fato de que os valores de emissões observados em 2020 foram substancialmente inferiores devido aos impactos da pandemia da Covid-19, o que torna a base de comparação notavelmente baixa. No entanto, também é importante destacar que o crescimento

das atividades econômicas, como o consumo de combustíveis e a produção de aço, atingiu níveis significativos no ano de 2021 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023a).

Em 2021, o consumo final de energia no Brasil retornou ao patamar de 2014, quando o país estava experimentando um período de crescimento econômico antes da recessão ocorrida em 2015 e 2016. Esse aumento no consumo energético ocorreu principalmente por meio de fontes de energia não renováveis. Em comparação com o ano anterior, a oferta de energia renovável sofreu uma redução de 4%, enquanto a oferta de energia não renovável aumentou em 12%. Esse quadro foi resultado do processo de recuperação econômica, que foi caracterizado por um crescimento de aproximadamente 4,5% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em relação ao ano anterior; esse crescimento impulsionou a demanda por energia, que foi suprida em maior medida por fontes não renováveis (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023a).

2.3.2 Emissões de CO₂ no setor de energia brasileiro

Historicamente, o setor de energia é um dos que apresentam maior crescimento nas emissões no Brasil. Entre 1990 e 2019, observou-se um aumento de 114% nas emissões (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021a).

As estimativas de emissões de GEE para o ano de 2020, divulgadas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), revelam que o setor de energia foi responsável pela emissão de 393,7 milhões de toneladas de CO₂e (figura 8), o que representa 23,2% do total das emissões nacionais. As emissões do setor neste período foram predominantemente de CO₂ (94,2%), oriundas, em sua maior parte, da combustão de combustíveis fósseis (MCTI, 2022). Na figura 9 também pode ser vista a distribuição das emissões brutas de CO₂e por estado brasileiro em 2020, ilustrando o perfil de emissões no panorama subnacional.

Esse volume de emissões sinaliza uma redução de 4,6% em comparação ao ano anterior, 2019, marcando o menor nível de emissões observado desde 2011. Esta diminuição tem influências da pandemia da Covid-19, que levou a uma redução de 2% no consumo energético total do país, refletindo diretamente nas emissões de GEE (MCTI, 2022; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021b).

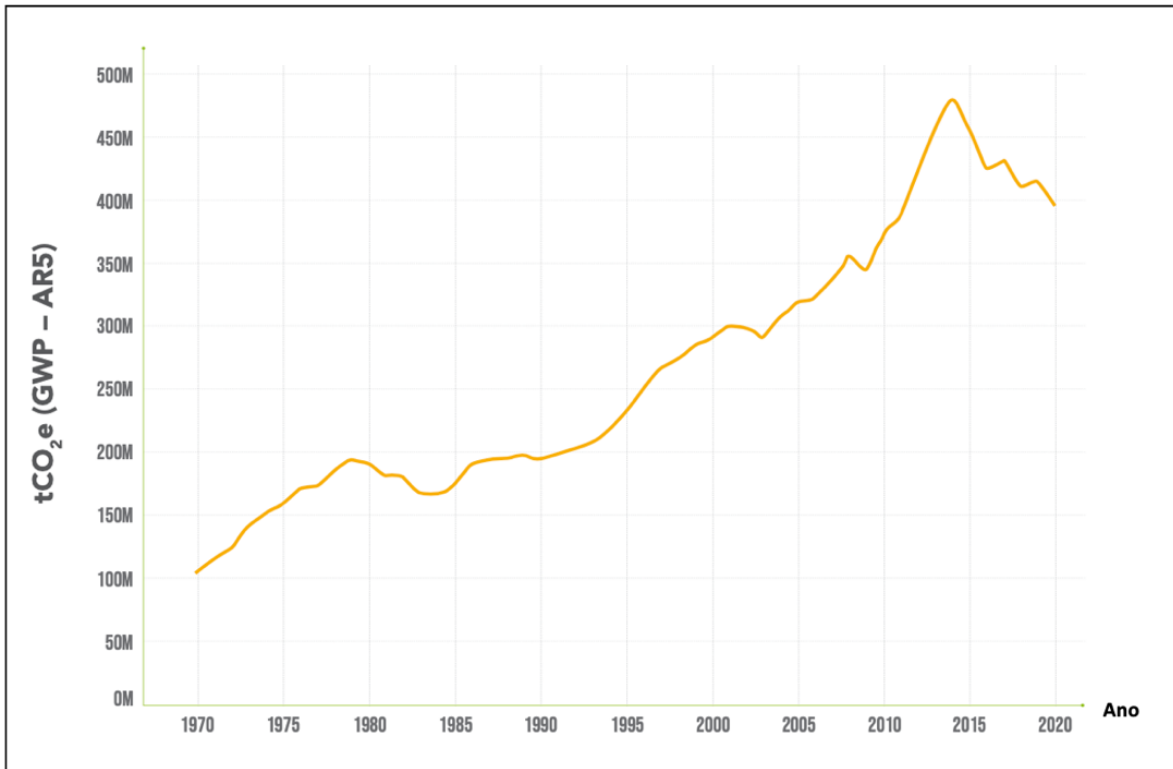


Figura 8 - Emissões de CO₂e no setor de energia brasileiro (1970-2020)
 Fonte: OBSERVATÓRIO DO CLIMA (2021b)

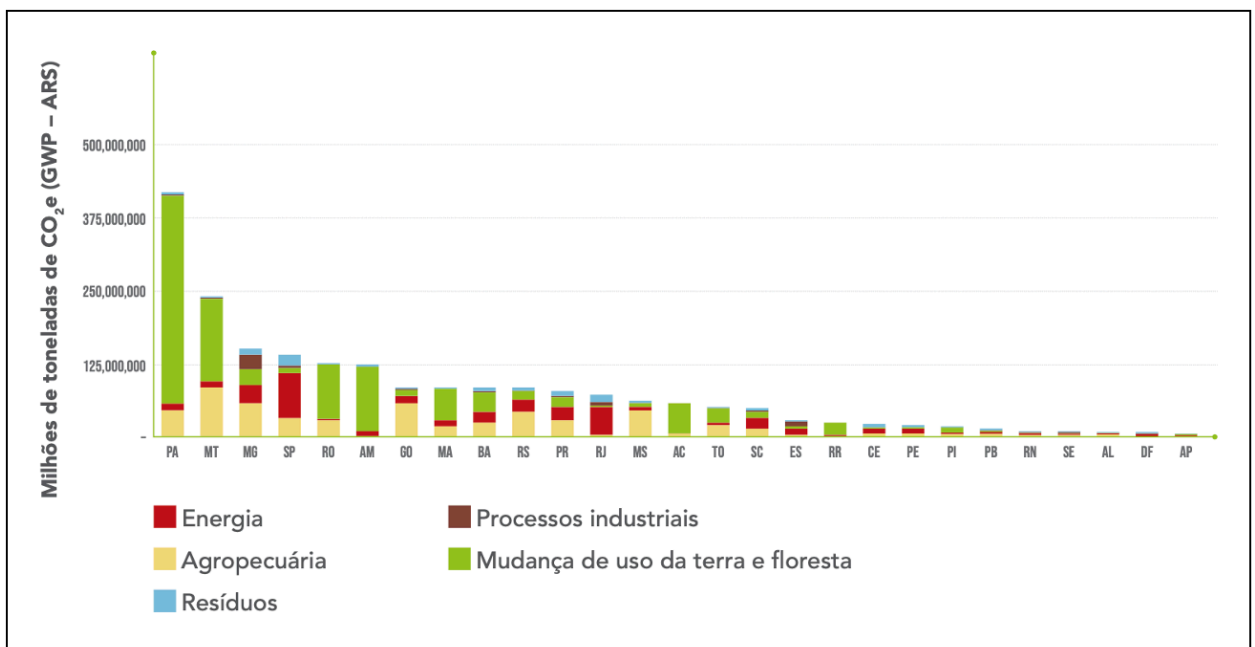


Figura 9 - Emissões brutas de CO₂e por estado em 2020
 Fonte: OBSERVATÓRIO DO CLIMA (2021b)

Ao analisar as emissões do setor de energia nos estados do Brasil em 2020, constata-se que São Paulo e Rio de Janeiro lideram o *ranking*, refletindo suas posições como as maiores metrópoles do país. Dados mais recentes da plataforma SEEG, referentes a 2022, mantêm São Paulo na liderança com 87.859 milhões de toneladas CO₂e e o Rio de Janeiro em segundo lugar, com 40.733 milhões de toneladas CO₂e (SEEG, 2023).

2.4 MATRIZ ENERGÉTICA NA UE E SUAS EMISSÕES DE CO₂

2.4.1 Matriz Energética na UE

A IEA aponta que o uso de energia aumentou rapidamente em economias de baixa e média renda, mas as economias de alta renda ainda consomem quase cinco vezes mais energia por pessoa (IEA, 2021b)

Apesar de serem líderes globais na redução de emissões, a UE e o Reino Unido representam apenas cerca de 12% do consumo mundial de energia, ao mesmo tempo em que seus setores energéticos ainda enfrentam carência de recursos energéticos próprios, tornando a UE altamente dependente de importações, que equivalem a aproximadamente 53% do total de energia bruta disponível (ROSA *et al.*, 2022).

Ao longo dos anos, a matriz energética na UE tem sido majoritariamente fóssil (figura 10 e tabela 2), no entanto, o consumo de energia e a intensidade energética estão em declínio, sendo que a última está diminuindo a um ritmo mais rápido, o que indica um uso mais eficiente de energia e uma desconexão entre o consumo de energia e o crescimento econômico (COMISSÃO EUROPEIA, 2023b).

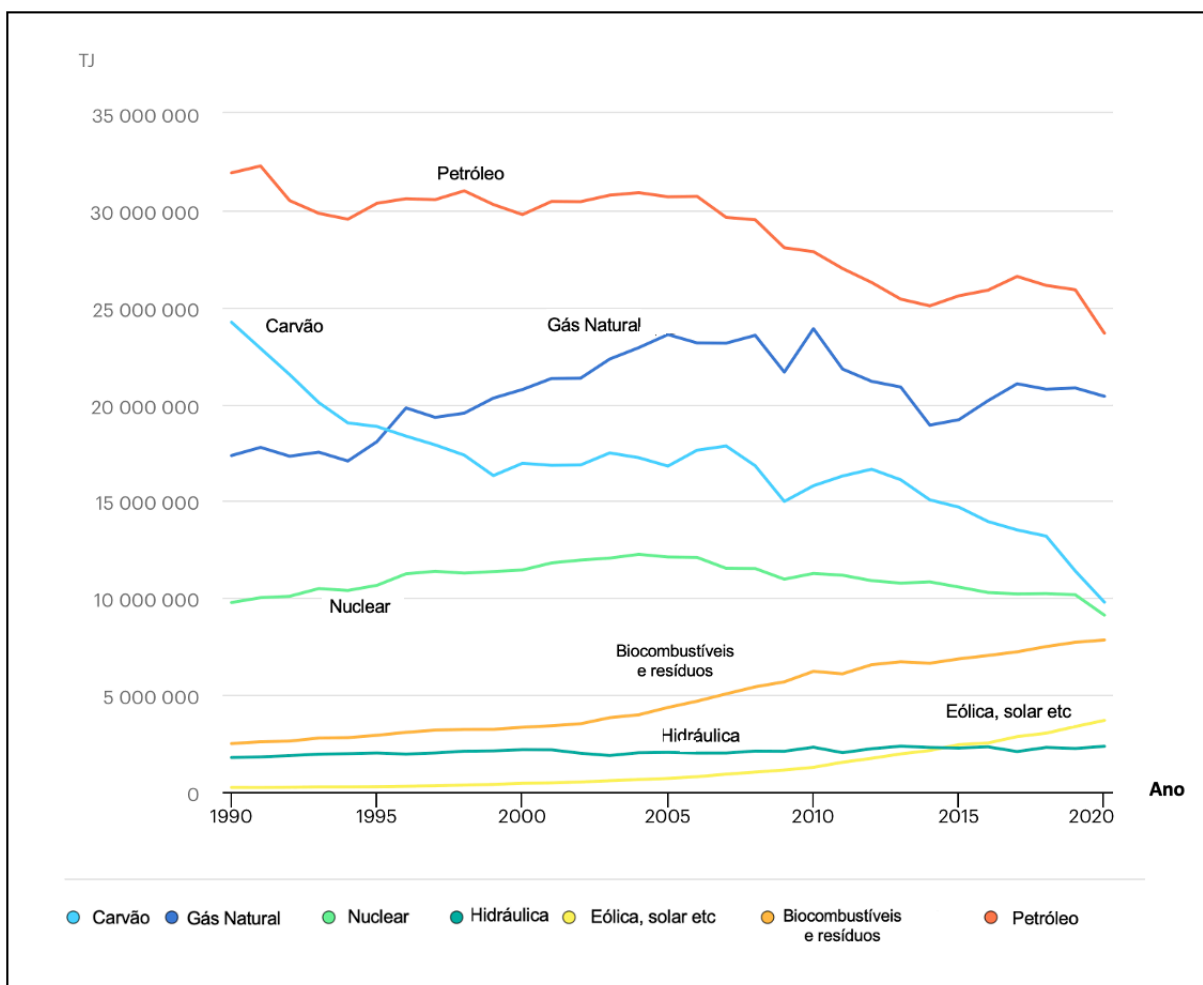


Figura 10 - Oferta interna de energia por fonte na EU no período 1990-2020
 Fonte: IEA (2022c)

Tabela 2 - Oferta interna de energia na UE (Mtep)

| Mtep | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2019 | 2020 |
|----------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| PRODUÇÃO | 676,0 | 703,3 | 696,5 | 657,1 | 617,8 | 2020 |
| COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS SÓLIDOS | 189,8 | 176,9 | 146,6 | 133,8 | 100,1 | 83,6 |
| CARVÃO MINERAL | 99,7 | 86,3 | 62,8 | 52,1 | 37,1 | 32,6 |
| CARVÃO MARRON (LIGNITO) | 90,0 | 90,5 | 83,8 | 81,7 | 63,0 | 51,0 |
| PETRÓLEO E DERIVADOS DE PETRÓLEO | 44,6 | 45,9 | 33,1 | 28,3 | 22,7 | 21,3 |
| PETRÓLEO BRUTO | 42,6 | 42,7 | 30,8 | 26,3 | 20,4 | 19,3 |
| GÁS NATURAL | 112,2 | 111,1 | 109,5 | 72,4 | 52,3 | 41,2 |
| NUCLEAR | 222,1 | 236,8 | 219,6 | 203,8 | 196,2 | 175,2 |
| RENOVÁVEIS E BIOCMBUSTÍVEIS | 96,1 | 118,4 | 168,2 | 200,4 | 227,3 | 234,2 |
| RESÍDUOS, NÃO RENOVÁVEIS | 5,9 | 7,2 | 10,6 | 12,3 | 13,6 | 13,8 |
| IMPORTAÇÕES LÍQUIDAS | 866,00 | 954,6 | 895,5 | 834,5 | 907,6 | 793,0 |
| COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS SÓLIDOS | 83,3 | 97,9 | 93,7 | 96,0 | 74,4 | 50,3 |
| CARVÃO MINERAL | 79,0 | 94,8 | 92,0 | 95,9 | 74,6 | 51,7 |
| PETRÓLEO E DERIVADOS DE PETRÓLEO | 578,5 | 606,1 | 550,3 | 514,5 | 527,3 | 461,5 |
| PETRÓLEO BRUTO | 542,3 | 569,8 | 517,3 | 519,9 | 514,9 | 450,2 |
| GÁS NATURAL | 202,8 | 248,1 | 245,9 | 220,6 | 300,4 | 273,5 |
| RENOVÁVEIS E BIOCMBUSTÍVEIS | 0,3 | 1,7 | 5,1 | 3,6 | 4,7 | 6,1 |
| ELETRICIDADE | 0,8 | 0,6 | 0,4 | -0,6 | 0,3 | 1,2 |

Mtep: megatonelada equivalente de petróleo

Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2022d)

O continente europeu tem carência de recursos energéticos próprios. No entanto, mesmo que o contexto seja de desafios nesse sentido, a UE vê a intensidade de consumo energético de fontes consideradas "suja", como petróleo, gás natural e carvão, seguir uma tendência de queda ao longo dos anos. Em contrapartida, fontes limpas e renováveis, como eólica, solar, biocombustíveis e biomassas, estão em ascensão (IEA, 2022c).

Em 2020, a UE utilizou uma variedade de fontes de energia, incluindo 34,5% de petróleo e derivados, 23,7% de gás natural, 17,4% de energias renováveis, 12,7% de energia nuclear e 10,5% de combustíveis fósseis sólidos. Ao longo das últimas décadas, houve mudanças nesse *mix* de energia, com uma diminuição notável no uso de produtos petrolíferos e gás natural, enquanto as energias renováveis continuaram a crescer. Isso se deve, em parte, aos esforços para tornar o sistema energético menos intensivo em emissões de carbono (EUROSTAT, 2023a).

Ainda em 2020, a UE superou a meta de participação de energias renováveis no consumo bruto final de energia em 2%, alcançando um dos marcos em direção à neutralidade climática. No entanto, em 2021, a recuperação econômica resultou em aumentos no consumo de energia, bem como na intensidade energética e de carbono em nível global, com a demanda de energia ultrapassando os níveis de 2019 e as emissões aumentando após a queda de 2020 (COMISSÃO EUROPEIA, 2023b).

Durante a pandemia o setor de energia renovável da UE continuou a crescer, superando a economia geral em termos de receita gerada e valor agregado bruto. Enquanto a economia da UE encolheu 4% em 2020, o valor agregado bruto do setor de energia renovável aumentou 8%, e a receita cresceu 9% entre 2019 e 2020, com as cadeias de valor de energia eólica e de bombas de calor liderando o caminho (COMISSÃO EUROPEIA, 2023b).

Com a contribuição crescente das energias renováveis na matriz energética, as intensidades de emissões de GEE também diminuíram (figura 11); a UE é uma das principais economias globais com menores emissões (COMISSÃO EUROPEIA, 2023b).

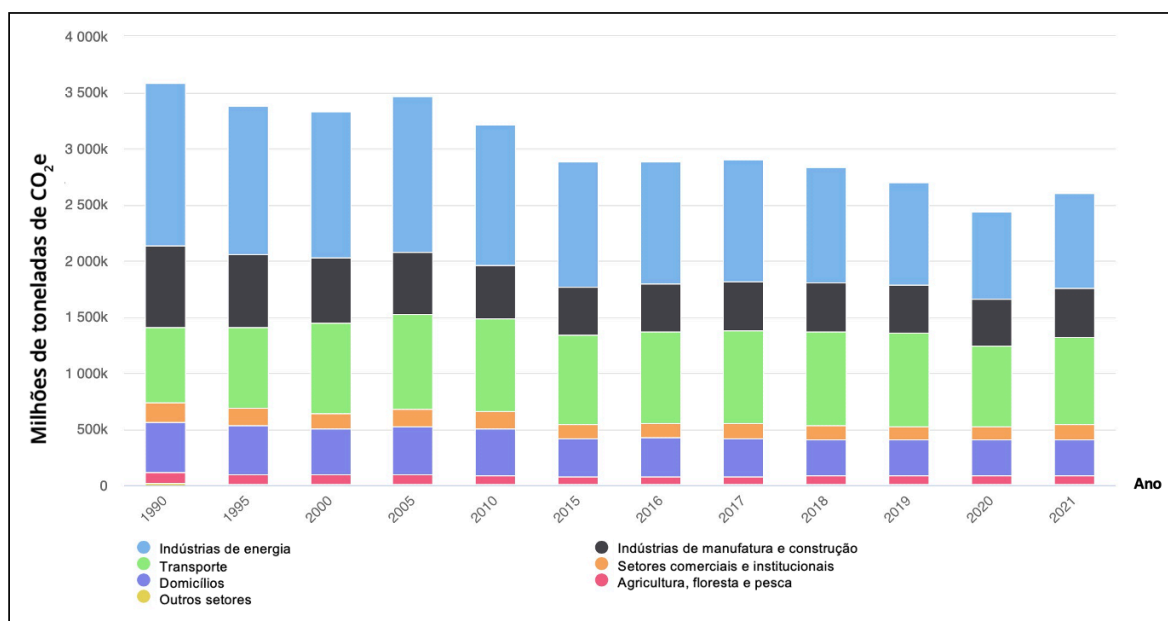


Figura 11 - Intensidade de emissões de CO₂e no consumo de energia na UE
Fonte: Eurostat (2023b)

Em 2021, o consumo final de energia na UE atingiu 39.351 petajoules (PJ), marcando um aumento de 6,2% em relação a 2020, quando houve uma redução devido à crise da Covid-19. Produtos derivados do petróleo representaram mais de um terço (34,8%) do consumo de energia final da UE, embora sua participação estivesse diminuindo. Eletricidade (22,8%) e gás natural (22,6%) também tiveram participações relativamente altas. Comparado a 1990, o consumo de energia na UE em 2021 permaneceu praticamente estável, com um aumento médio de 0,1% ao ano. No entanto, essa tendência geral escondeu uma mudança significativa na composição do consumo final de energia da UE. Houve um deslocamento notável longe de combustíveis sólidos e produtos petrolíferos em direção à eletricidade, energias renováveis e biocombustíveis. Por exemplo, a parcela de combustíveis sólidos caiu de 11,5% para 2,5% entre 1990 e 2021, enquanto a de energias renováveis e biocombustíveis aumentou de 4,3% para 11,8% durante o mesmo período (COMISSÃO EUROPEIA, 2023a).

Em 2021, a indústria respondeu por um pouco mais de um quarto (25,6%) do consumo de energia na UE, enquanto o transporte representou 29,2%, deixando 45,2% para outros setores, principalmente residenciais e serviços. O consumo de energia para transporte aumentou de forma constante entre 1990 e 2019, exceto durante a crise financeira global, com um aumento geral de 30,8%. Por outro lado, o consumo de energia final na indústria diminuiu quase um quarto (queda de 22,9%) durante o mesmo período, com uma queda significativa durante a crise financeira global em 2009 (queda de 13,6%). Com uma recuperação parcial da pandemia em 2021, o consumo de energia aumentou 6,2% em relação a 2020, com o transporte apresentando o maior aumento (9,3%) (COMISSÃO EUROPEIA, 2023a).

2.4.2 Emissões de CO₂ no setor de energia da UE

Na UE, os dados referentes às emissões de GEE de 2020, divulgados pela Comissão Europeia, revelam que o setor de energia foi responsável pela emissão de 2,47 Gt de CO₂e, representando 79,2% do total de emissões na UE (figura 12), sendo a Alemanha o maior emissor (figura 13). Assim como observado no Brasil, a maior parte das emissões desse setor na UE em 2020 deveu-se ao CO₂ (77,9%),

gerado principalmente pela combustão de combustíveis fósseis (CLIMATE WATCH, 2023). Além disso, em 2020, a UE continuou a figurar entre os maiores emissores globais de CO₂, ao lado de países como China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão (COMISSÃO EUROPEIA, 2023c).

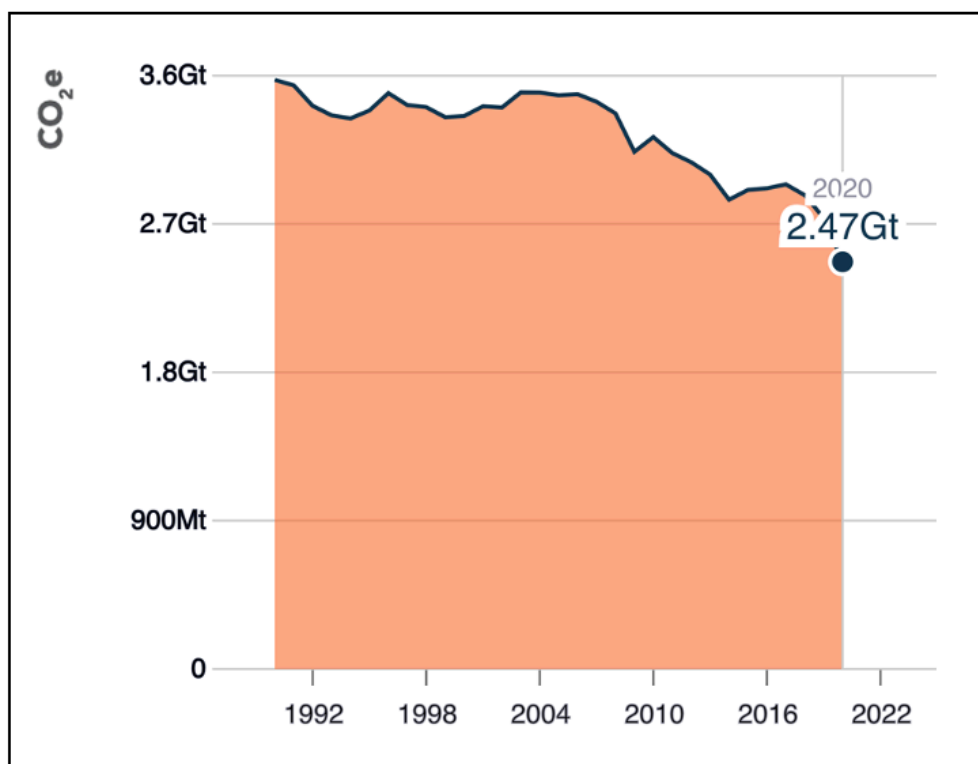


Figura 12 - Emissões de CO₂e no setor de energia europeu no período 1990-2020
Fonte: CLIMATE WATCH (2023)

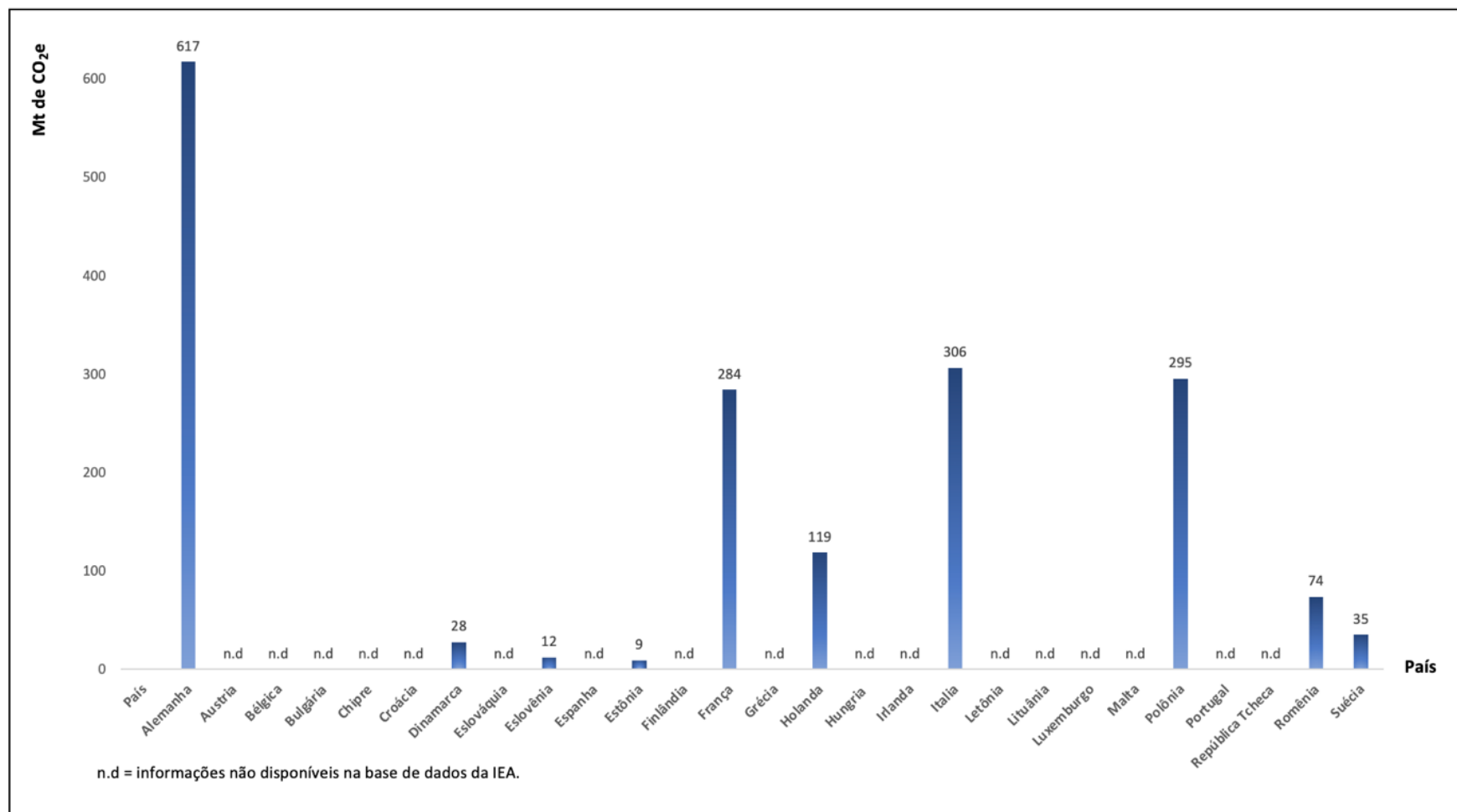


Figura 13 - Emissões de CO₂e do setor de energia por país na EU em 2022
 Fonte: elaboração própria com base nos dados da IEA (2023a)

Ao analisar as emissões do setor de energia nos países membros da UE, observa-se que a Alemanha ocupa a primeira posição, de forma muito significativa no *ranking* de emissões de CO₂e do continente europeu. Isso reflete sua posição como a maior economia europeia em termos de PIB, segundo indicadores do Banco Mundial (2024). Estes indicam que o PIB alemão correspondeu a 24,36% do PIB da UE em 2022, alcançando 4,08 trilhões de dólares no período.

2.4.3 Matriz energética na UE pós início de guerra entre Rússia e Ucrânia

A guerra na Ucrânia apresentou à UE um desafio de magnitude significativa relacionado à sua dependência de energia russa. No período entre fevereiro de 2021 e 2022, o preço do gás natural aumentou consideravelmente, resultando em um aumento nos preços da eletricidade (OSICKA; CERNOCH, 2022).

Em fevereiro de 2022, a tentativa de invasão da Ucrânia pela Rússia marcou um marco significativo na política energética europeia. A pressão para boicotar e impor sanções à Rússia gerou debates sobre o momento e a maneira de a UE e outros países interromperem a compra de petróleo e gás russo (WIERTZ; KUHN; MATTISSEK, 2023).

O conflito entre a Rússia e a Ucrânia exerceu um impacto significativo sobre o compromisso da UE em promover a redução progressiva dos recursos energéticos de origem fóssil. Além disso, a invasão russa na Ucrânia marcou um novo período nas relações internacionais e trouxe uma mudança significativa na compreensão da segurança energética na UE, destacando os riscos da alta dependência dos países europeus em relação ao gás e petróleo russo (VEZZONI, 2023; WIERTZ; KUHN; MATTISSEK, 2023).

Em um evento que provavelmente se figura como um dos momentos cruciais da história europeia, o futuro da transição energética do continente europeu tem influência das ações de combate decididas nas periferias das cidades ucranianas (OSICKA; CERNOCH, 2022).

A guerra na Ucrânia desencadeou uma profunda reavaliação dos rumos previamente traçados para a transição energética na UE. Por um lado, o processo de desativação das minas de carvão na Alemanha, por exemplo, foi temporariamente

interrompido, dando origem a uma campanha política para adiar esse processo, devido à falta de acesso ao gás russo na Polônia. Por outro lado, a situação do conflito levou ao aumento da extração de gás natural na Noruega, que agora abastece economias anteriormente dependentes de contratos com empresas russas, como é o caso da Alemanha (ANTJE *et al.*, 2023).

Para enfrentar as causas profundas e os impactos da crise energética desencadeada pela guerra, a Comissão Europeia apresentou o plano REPowerEU. Este plano inclui reformas direcionadas e investimentos para eliminar a dependência da UE das importações de combustíveis fósseis da Rússia, garantir a segurança do fornecimento de energia, promover a eficiência energética e acelerar a transição para uma matriz energética mais limpa. Para colocar o plano em ação, o Parlamento e o Conselho adotaram o Regulamento 2023/43514 (Regulamento REPowerEU) em fevereiro de 2023 (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

2.5 PRECIFICAÇÃO REGULADA DE CARBONO

Os preços pagos pelos bens, em geral, não refletem os impactos ambientais causados ao longo dos seus ciclos de vida e uma percepção comum em relação à poluição ambiental é que ela não deve ser algo sem custos de reparação. Uma vez que as precificações por danos ambientais ocorrem, haverá incentivos para evitar ou reduzir as atividades poluentes como as emissões de GEE (EPE, 2020a; WOO, 2022).

A poluição é um exemplo do que os economistas chamam de externalidade negativa, que decorre das consequências de ações que afetam terceiros que não têm a capacidade de impedi-las. Se os responsáveis pelas externalidades não arcam com os custos da remediação das mesmas, os resultados serão previsíveis levando a uma super poluição (WOO, 2022).

Adotar uma estratégia de precificação do carbono é fundamental para as medidas de combate às mudanças climáticas, permitindo aos países avançarem em direção a emissões líquidas zero de carbono (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2022).

Ao explorar as diversas fontes de demanda e os diferentes ativos comercializados nos mercados de carbono, é possível classificá-los, apesar dos

limites entre eles nem sempre serem bem definidos. Uma distinção essencial se dá entre os mercados existentes: mercado voluntário e mercado regulado (mandatório). O mercado regulado e voluntário podem interagir entre si e existe uma variedade de ativos sendo negociados; mesmo no mercado regulado, a emissão de créditos é sempre uma ação voluntária (ICS, 2021).

Embora frequentemente ocorra referência genérica a “mercado de créditos de carbono”, o mercado regulado é mais precisamente descrito como Sistema de Comércio de Emissões (SCE) (*Emissions Trading Systems*, em inglês) (ICS, 2021).

Nas iniciativas de carbono reguladas, a precificação do carbono visa impor um custo às fontes emissoras pelas externalidades negativas que geram, criando uma demanda consistente por mitigação, originada por entidades governamentais ou setoriais. Por outro lado, nos mercados voluntários, a demanda é impulsionada pelo desejo de compensar agentes não regulados por suas ações de mitigação (redução ou remoção de emissões) (ICS, 2021).

As estratégias voluntárias (geração de créditos por ações de mitigação) e reguladas (que criam deveres para as fontes emissoras) não se excluem mutuamente. Pelo contrário, elas são complementares, pois muitos mercados regulados permitem que uma parte dos créditos originados no mercado voluntário seja utilizada como compensação para cumprir com as obrigações regulatórias. Por exemplo, o Brasil vendeu créditos de projetos realizados sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) para entidades reguladas pelo SCE da UE, o *EU Emission Trading System* (EU ETS) em sua fase inicial (ICS, 2021).

Formadores de políticas encarregados da criação de instrumentos de precificação precisam decidir entre a precificação de carbono, em inglês, *carbon tax*, e SCE e determinar a melhor estruturação para estes (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2022).

A crescente crise climática elevou as mudanças climáticas ao centro das políticas globais. Governos ao redor do mundo têm adotado estratégias de precificação do carbono, tanto por meio de impostos sobre carbono quanto por SCE, como resposta a essa urgência (KÄNZIG, 2023).

Atualmente, a precificação do carbono se destaca entre os principais instrumentos de políticas ambientais voltadas ao carbono. Essa abordagem é eficaz

para enfrentar questões climáticas e controlar as emissões de CO₂, baseando-se no princípio do poluidor pagador (EPE, 2020a; GONÇALVES; VECCHIA, 2022; KARSTENSEN *et al.*, 2018; WOO, 2022;). As figuras 14 e 15 oferecem uma visão geral da dinâmica de precificação de carbono.



Figura 14 - Dinâmica geral da precificação de carbono
Fonte: elaboração própria com base nos dados de CEBDS (2018)

Como elementos de estratégias de intervenção pública, a precificação de carbono pode ser categorizada em três tipos: preço negativo, preço implícito e preço explícito, que são explicados na figura 15. Cada categoria representa uma abordagem distinta na implementação desta ferramenta de política ambiental (EPE, 2020a).

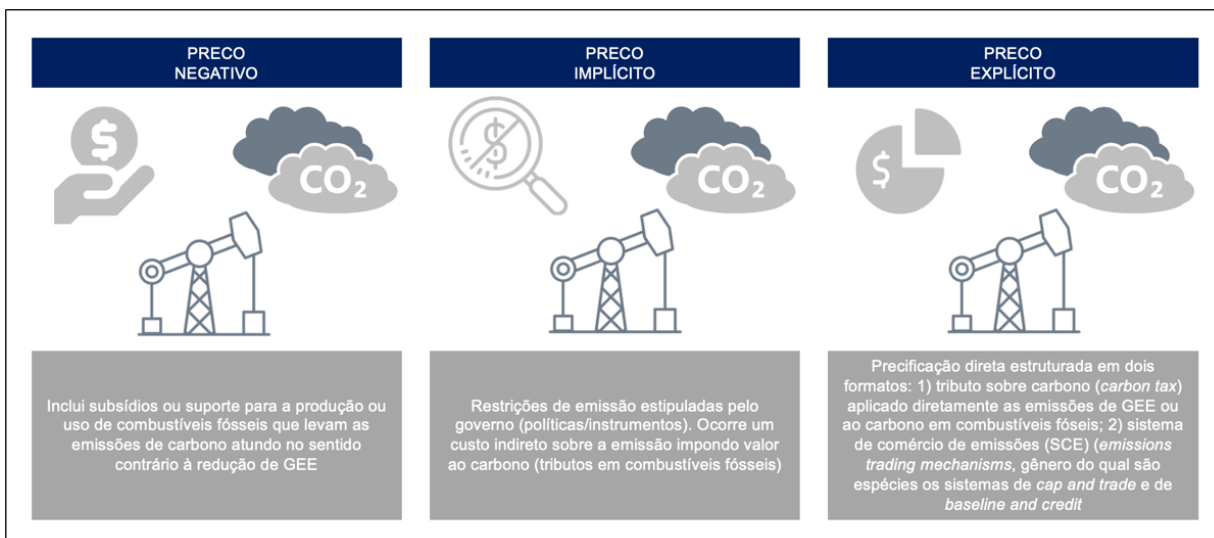


Figura 15 - Diferenças entre os três tipos de precificação de carbono
 Fonte: elaboração própria com base nos dados de EPE (2022a)

Na categoria de preço explícito, conforme apontado na figura 15, a precificação de carbono ocorre de forma direta, podendo ser estruturada em dois formatos principais, que serão discutidos a seguir:

- (1) o tributo sobre carbono (*carbon tax*), aplicado diretamente às emissões de GEE ou ao carbono contido nos combustíveis fósseis.
- (2) o sistema de comércio de emissões (SCE) (*emissions trading systems*, ETS), dentro do qual se insere o sistema de *cap and trade* (ICS, 2021).

A figura 16 apresenta um resumo gráfico das iniciativas de precificação de carbono em níveis regionais, nacionais e subnacionais. Em 2023, essas iniciativas cobririam 11,66 Gt de CO₂e, representando 23% das emissões globais de GEE BANCO MUNDIAL (2023b). A figura 17 apresenta a cobertura das emissões de GEE em um avanço significativo no combate às mudanças climáticas e na implementação de políticas ambientais eficaz.

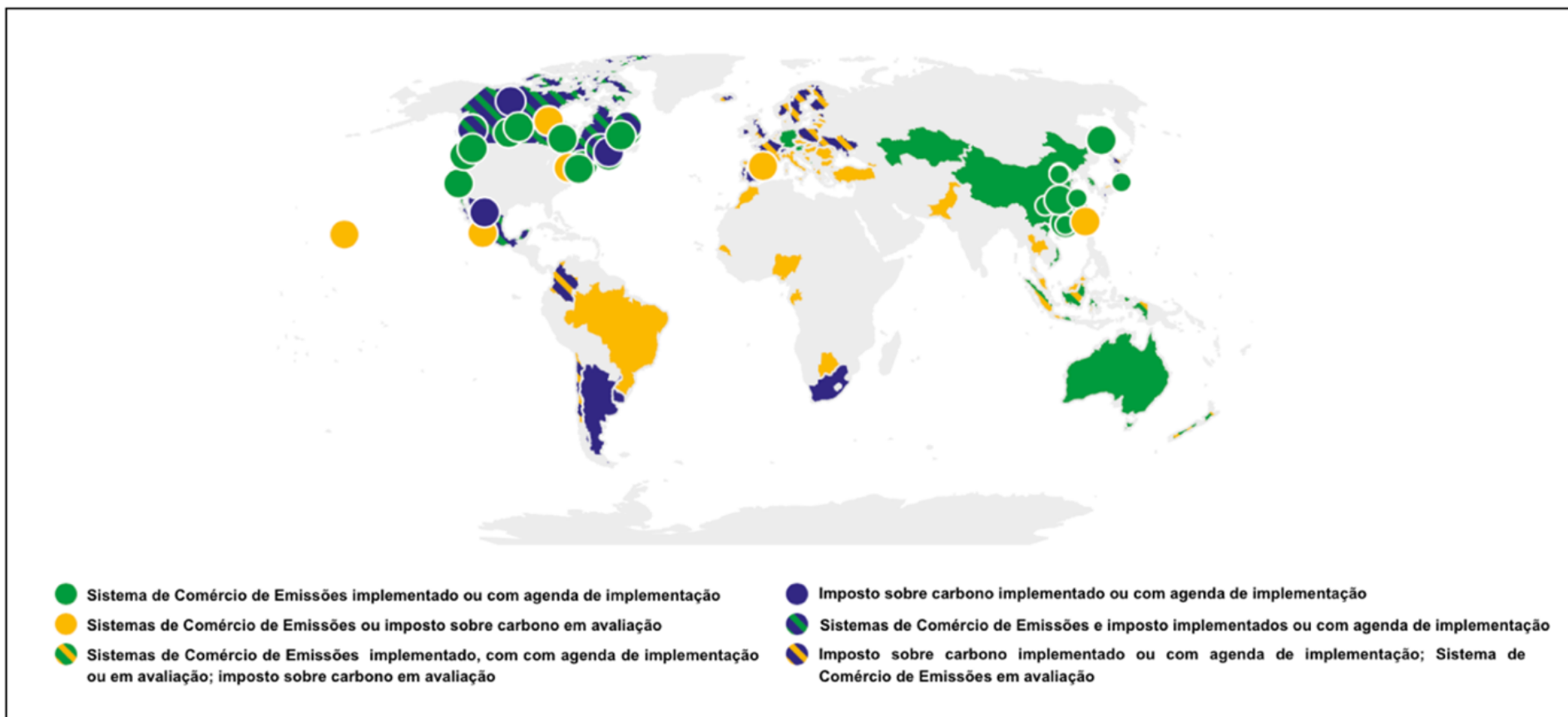


Figura 16 - Mapa resumido das iniciativas de precificação de carbono regionais, nacionais e subnacionais
 Fonte: BANCO MUNDIAL (2023b)

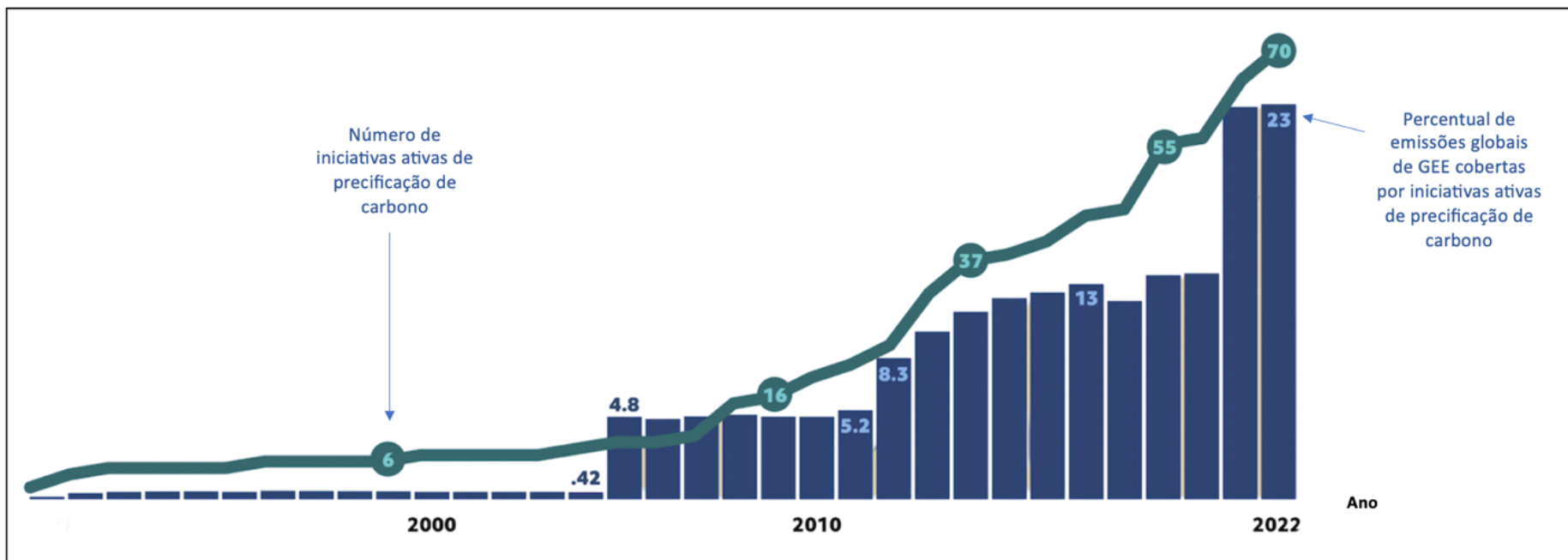


Figura 17 - Iniciativas ativas de precificação de carbono e o percentual de emissões globais de GEE cobertas por mecanismos de precificação de carbono

Fonte: VISUAL CAPITALIST (2023)

2.5.1 Tributo sobre o carbono

O tributo sobre o carbono, ainda que de forma limitada, vem sendo praticado desde o início dos anos 90 em países como Finlândia e Suécia (TAX FOUNDATION TAX, 2020).

Seu objetivo é estabelecer um preço para as emissões, com foco no conteúdo de carbono dos combustíveis fósseis, incentivando, assim, os poluidores a reduzirem sua dependência dessas fontes. Com isso, torna-se economicamente mais atrativo investir em inovação tecnológica do que persistir nas emissões habituais. Neste modelo, a redução das emissões não é regida por um limite fixo, mas sim pelo custo associado à emissão de carbono (ICC BRASIL, 2023; GONÇALVES; VECCHIA, 2022).

Essa taxa, recolhida pelo governo como um imposto, é definida para atingir um nível de emissões considerado socialmente ideal. Esse nível ideal corresponde ao ponto em que o aquecimento global é mantido dentro do limite de 2°C, garantindo assim o máximo bem-estar à sociedade (CEBDS, 2015).

Um dos maiores desafios do tributo sobre o carbono reside no seu custo político, fator que explica a escassa implementação dessa medida; todavia há evidências de que a tributação do carbono resulta em emissões inferiores às que seriam esperadas na ausência do mecanismo (BANCO MUNDIAL; ECOFYS, 2018 *apud* GONÇALVES; VECCHIA, 2022).

2.5.2 Sistema de Comércio de Emissões (SCE)

O SCE estabelece limites anuais para as emissões de GEE de atividades específicas, aplicando sanções àqueles que não respeitam estes limites (GONÇALVES; VECCHIA, 2022; IETA, 2019). Este sistema funciona de maneira que o órgão regulador define um teto (*cap*, em inglês) para o total de emissões permitidas às entidades reguladas. Este limite é assegurado pela emissão e distribuição controlada de licenças, cuja quantidade total é equivalente ao limite estipulado. A partir disso, as entidades reguladas podem realizar transações entre

si (*trade*, em inglês), buscando alinhar suas emissões reais às licenças disponíveis (IBGC, 2022).

Segundo Gonçalves e Vecchia (2022), o SCE pode ser estruturado de várias formas, dependendo dos objetivos específicos e dos limites desejados, conforme descrito a seguir:

- (1) Escopo: define-se quais atividades (e portes) estão incluídas ou excluídas.
- (2) Limite (*cap*): o limite total de emissões permitidas no sistema pode ser ajustado, desde que não exceda o volume de emissões que ocorreria na ausência do sistema.
- (3) Licenças gratuitas: o Estado pode optar por fornecer licenças gratuitamente a certos grupos para mitigar impactos indesejados, ou decidir leiloar todas as licenças.
- (4) Investimento e empréstimo: o sistema pode permitir que licenças não utilizadas sejam guardadas para uso futuro ou que futuras licenças sejam utilizadas antecipadamente sob a forma de empréstimos.
- (5) Utilização de créditos de compensação: alguns sistemas permitem a utilização de créditos de compensação, correspondendo a reduções comprovadas de emissões de GEE do escopo do regime.

Quando a distribuição das licenças não ocorre por leilão, ou seja, é uma atribuição gratuita de licenças, elas ajudam a amenizar os custos e os desafios competitivos para as indústrias afetadas, principalmente aquelas que competem com regiões sem restrições regulamentares de carbono (IETA, 2019).

Os SCEs são comumente aplicados ao setor energético e à indústria pesada, incluindo fabricantes de cimento, metais, produtos químicos, petróleo e gás, cerâmica, papel e celulose, mineração, dentre outros (IETA, 2019).

Geralmente, a discussão a respeito da definição de preços para emissões de GEE é limitada ao âmbito das regulamentações, isto é, a sistemas obrigatórios, onde o governo impõe regras aos agentes econômicos que são responsáveis pelas emissões de GEE. Contudo, existe também a esfera voluntária, na qual setores, empresas e até indivíduos estabelecem por conta própria objetivos de redução das emissões (CSI, 2021).

2.5.3 O maior SCE existente no mundo

O mercado de carbono europeu, conhecido como *European Union's Emissions Trading System* ou apenas EU ETS, é o pioneiro e atualmente o maior SCE em escala global. Ele abrange aproximadamente 40% das emissões de GEE da UE e cerca de 4% das emissões globais de GEE. O sistema foi concebido com o objetivo de assegurar que a Europa alcance suas metas de redução de emissões tanto no curto quanto no longo prazo, operando sob o modelo de *cap and trade* (COMISSÃO EUROPEIA, 2015; KÄNZIG, 2023; SIKORA-ALICKA, 2023).

Promulgado pela Diretiva 2003/87/EC, o EU ETS foi instituído independentemente de qualquer acordo internacional, embora esteja alinhado com o Protocolo de Quioto e seus mecanismos flexíveis para atingir metas de redução de emissões. O sistema foi implementado em fases, com suas regulamentações sendo constantemente atualizadas. Conforme destacam Vercillo e Trennepohl (2023), o EU ETS teve início em 2005 e já passou por três fases de implementação: 2005-2007, 2008-2012 e 2013-2020, estando atualmente na quarta fase, que se estende de 2021-2030.

Desde o ano de 2021, o EU ETS passou a ser aplicado não apenas aos 27 Estados-Membros da UE, mas também aos países membros da Associação Europeia de Livre Comércio (*European Free Trade Association - EFTA*, em inglês), que incluem a Islândia, Liechtenstein e Noruega, sendo estes referidos como países do EU ETS. Além disso, a partir de janeiro de 2020, o EU ETS estabeleceu vínculos com o sistema de comércio de emissões da Suíça (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

A partir de 2021, também foi introduzida a possibilidade de exclusão do EU ETS para instalações cujas emissões anuais de CO₂e fossem inferiores a 2.500 toneladas, bem como para unidades de reserva ou *backup* que operassem por menos de 300 horas anualmente. No ano subsequente, 15 países optaram por excluir instalações do sistema, totalizando 4,2 milhões de toneladas de CO₂e, o que correspondeu a apenas 0,32% das emissões das instalações incluídas no EU ETS (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

Além das emissões de CO₂, o EU ETS abrange também as emissões de N₂O decorrentes da produção de ácido nítrico, adípico, glioxílico e glicoxal, bem como as emissões de PFCs provenientes da produção de alumínio primário (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

No EU ETS, as instalações estacionárias, que se referem a locais ou instalações regulamentadas de emissão fixa de CO₂, operam com base em um único limite para toda a UE. Esse limite foi estabelecido em 2.084 milhões de toneladas de CO₂e em 2013, com uma redução aplicada por meio de um fator de redução linear de 1,74% em relação às emissões de base registradas entre 2008 e 2012; hoje, na quarta fase do EU ETS o fator linear de redução é de 2,2%. Esse mecanismo resultou em uma diminuição progressiva do limite de emissões, que o reduziu para 1.816 milhões de toneladas de CO₂e em 2020 (EEA, 2023a).

Ao utilizar a dinâmica de mercado para determinar o preço do carbono, este sistema incentiva a redução de emissões onde isso é economicamente mais eficiente. Como resultado, os preços do carbono desempenham um papel importante na geração de receitas pelo EU ETS, que são direcionadas para investimentos em iniciativas climáticas e na transformação do setor energético (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

Desde a sua implementação em 2005, o EU ETS tem sido um motor na redução das emissões provenientes da geração de eletricidade, calor e da produção industrial, alcançando uma diminuição de 37,3%. Além disso, gerou mais de 152 bilhões de euros em receita por meio de leilões, cuja distribuição é feita entre os Estados-Membros. Essa receita tem sido predominantemente alocada em projetos relacionados à transformação energética, descarbonização e apoio social à transição energética (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

2.5.4 Tributo sobre carbono *versus* SCE

A tributação de carbono e o SCE são considerados equivalentes teoricamente, pois ambos se baseiam no mesmo princípio fundamental: a precificação do carbono, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE. Ambos os mecanismos visam equalizar os custos marginais de abatimento das emissões entre

diferentes participantes do mercado, bem como os custos agregados de redução e seus efeitos sobre a competitividade (EPE, 2020a; STAVINS, 2022).

Tanto a tributação de carbono quanto o SCE são considerados mecanismos econômicos, ou seja, são sistemas baseados em mercado. No caso da tributação, o preço de emissão de uma tonelada de CO₂e é determinado pela autoridade competente, e então o mercado decide a quantidade de GEE a ser emitida. No SCE, por outro lado, a autoridade regulatória estabelece a quantidade total de emissões permitidas, o *cap*, e o mercado, subsequentemente, determina o preço por tonelada de carbono (EPE, 2020a). A figura 18 ilustra o funcionamento desses dois mecanismos, mostrando o esquema de tributação de carbono e o SC

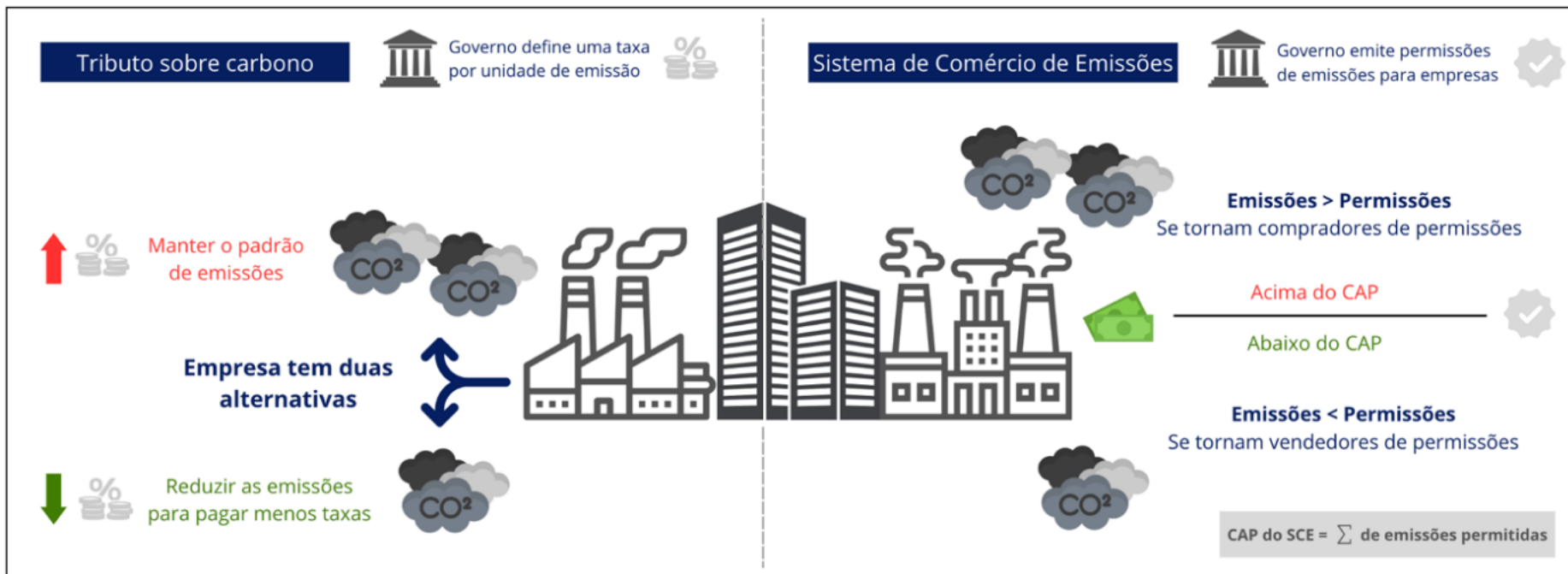


Figura 18 - Esquema de funcionamento do tributo sobre carbono e do SCE
 Fonte: elaboração própria

Na prática, ambas as abordagens apresentam vantagens e desvantagens distintas. A tributação de carbono oferece a certeza de custos e reduz os riscos para investidores. No entanto, não garante necessariamente o resultado ambiental desejado. Por outro lado, o SCE assegura resultados ambientais, uma vez que estabelece um limite absoluto para as emissões. No entanto, essa abordagem pode envolver volatilidade de preços e implica riscos para os atores econômicos envolvidos (APEC, 2010 *apud* NICOLETTI; LEFEVRE, 2016).

O quadro 2 apresenta uma comparação resumida entre o imposto sobre o carbono e o SCE. A figura 19 contrasta as coberturas de emissões de GEE pelo mercado regulado de carbono em ambos os casos, ou seja, nos impostos sobre o carbono e no SCE.

Quadro 2 - Comparação resumida entre imposto sobre carbono e SCE

| Instrumentos de precificação de carbono | | |
|---|---|---|
| Questão de design | Imposto sobre carbono | SCE |
| Administração | A administração é mais direta (por exemplo, como extensão de impostos sobre combustíveis). | Pode não ser prático para países com capacidade limitada. |
| Incerteza: preço | A certeza do preço pode promover inovação em tecnologia limpa. | A volatilidade dos preços pode ser um problema; no entanto, pisos e tetos de preço podem limitar essa volatilidade. |
| Incerteza: emissões | Os níveis de emissão são incertos, mas a taxa pode ser ajustada periodicamente. | Oferece certeza sobre os níveis de emissões. |
| Receita: eficiência | A receita geralmente é destinada ao ministério da fazenda para diversos propósitos, como financiar outros impostos ou investimentos gerais. | A alocação gratuita de licenças pode ajudar na aceitabilidade, mas pode reduzir a receita total; receitas de leilões tendem a ser designadas para usos específicos. |

Fonte: INTERNATIONAL MONETARY FUND (2022)

Quadro 2 - Comparação resumida entre imposto sobre carbono e SCE
(continuação)

| Instrumentos de precificação de carbono | | |
|---|--|--|
| Questão de design | Imposto sobre carbono | SCE |
| Receita: distribuição | As receitas podem ser redistribuídas para tornar a política globalmente neutra ou progressiva. | A alocação gratuita ou destinação específica pode limitar a oportunidade para resultados distributivos desejados. |
| Economia Política | Pode ser politicamente desafiador implementar novos impostos; o uso das receitas e compensações é crítico. | Geralmente mais aceito politicamente do que impostos, especialmente se houver alocação gratuita. |
| Competitividade | Ajustes de carbono na fronteira são geralmente mais sólidos do que outras medidas. | Alocações gratuitas podem ser eficazes em nível modesto, mas ajustes na fronteira, especialmente relacionados a exportações, podem resultar em maior iniquidade. |
| Nível de preço e alinhamento de emissões | Preços e emissões precisam de recalibração regular para garantir alinhamento com os objetivos. | O alinhamento de preços com as metas é automático se os limites de emissões estiverem de acordo com os objetivos de mitigação. |
| Compatibilidade com os outros instrumentos | Pode ser combinado com outros instrumentos sem resultar em mais políticas. | Enquanto ferramentas sobrepostas podem reduzir as emissões sem afetar os limites, ajustes podem ser necessários. |
| Precificação de GEE mais amplo | Pode ser integrado em estruturas fiscais empresariais mais amplas, embora certas variantes possam às vezes ser menos eficazes. | Incorporar outros setores usando compensações pode aumentar as emissões, reduzindo a eficácia. |
| Regimes de coordenação global | Uma escolha mais natural para um piso de preço de carbono internacional. | Pode ser harmonizado com um piso de preço internacional, mas pode levar a problemas quando se negocia com regimes menos vantajosos, possivelmente não atendendo às necessidades globais. |

Fonte: INTERNATIONAL MONETARY FUND (2022)

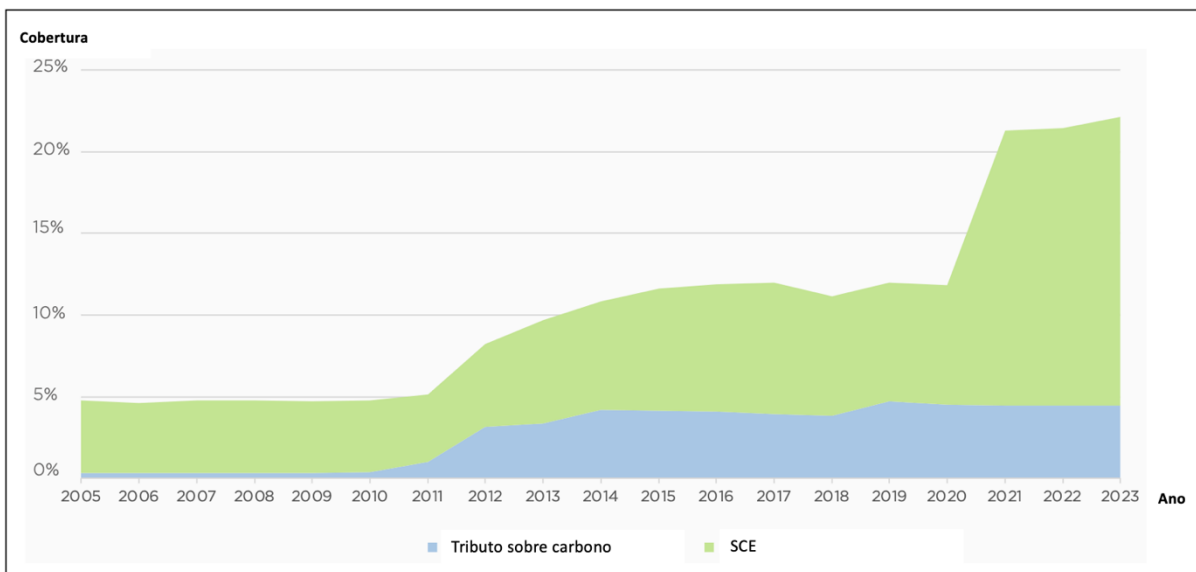


Figura 19 - Cobertura das emissões de GEE pelo mercado regulado de carbono
 Fonte: ICC BRASIL (2023)

No que diz respeito à arrecadação de receitas pela precificação, as práticas de arrecadação e utilização de receitas podem diferir, sendo que as receitas de impostos sobre carbono são mais propensas a serem usadas em orçamentos gerais e as receitas de sistemas de SCE tendem a ser destinadas a propósitos ambientais (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2022).

2.5.5 Benefícios da precificação de carbono e dificuldades enfrentadas pelo mercado de carbono

De uma perspectiva de eficácia ambiental e eficiência econômica, aumentar gradualmente os preços dos combustíveis fósseis por meio da precificação de carbono deve ser o ponto central das estratégias de mitigação dos países. O *International Monetary Fund* (2022) aponta três justificativas para a precificação de carbono a seguir:

- (1) Reduções de emissões: a precificação promove uma ampla gama de respostas comportamentais para reduzir o uso de energia e a transição para combustíveis de baixo carbono.

(2) Investimento em energia limpa: a expectativa de aumento dos preços dos combustíveis incentiva a inovação e a adoção de novas tecnologias de baixo carbono agora; especialmente se um caminho claro e crível de aumento de preços for especificado.

(3) Fiscal: a precificação mobiliza uma fonte valiosa de receita que pode ser usada para alcançar vários objetivos econômicos e distributivos.

A precificação do carbono pode produzir grandes reduções nas emissões, embora não seja provável ser suficiente por si só para atender a compromissos agressivos de mitigação (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2022).

O impacto de um preço de carbono em toda a economia sobre as emissões e outras métricas é estimado usando a Avaliação de Política Climática (IMF-WB *Climate Policy Assessment* - CPAT, em inglês), onde um preço de carbono de \$50,00, por exemplo, reduziria as emissões de CO₂ nos países do G20 em cerca de 15-35%, mas isso está abaixo dos compromissos que muitos países fizeram em suas NDC submetidas para o Acordo de Paris de 2015 (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2022).

Discordâncias políticas sobre a regulação do mercado, dúvidas sobre a transparência e eficiência do sistema de comercialização, entre outros, são alguns dos empecilhos (GRIESINGER, 2010; SOUZA; CORAZZA, 2017 *apud* OLIVEIRA, 2022).

A verdade é que o mercado de carbono, seja regulamentado por instituições internacionais ou implantado de forma voluntária por empresas e governos, é muito dependente de decisões político-econômicas. Desta forma, a estabilidade desse mercado oscila de acordo com a coalizão dos interesses dos atores políticos nos acordos ambientais (OLIVEIRA, 2022).

Além do sistema político, a esfera jurídico-econômica também exerce forte influência na estabilidade do mercado de carbono, pois este sofre duras críticas sobre a confiabilidade de seus contratos e acordos extrajudiciais, bem como de seus instrumentos financeiros. Ou seja, além de questões políticas, as leis e a economia também impactam muito o mercado que lida com a compra e venda de direitos de emitir carbono. Muitas pessoas questionam se os acordos feitos nesse mercado são realmente sólidos e confiáveis, além de duvidarem se os meios usados para

controlar esse comércio, como os contratos, realmente funcionam de maneira efetiva (OLIVEIRA, 2022).

As diretrizes para o imposto envolvem uma implementação gradual, a fim de permitir a adaptação das pessoas e das empresas; a proteção das pessoas de baixa renda por meio de créditos fiscais; bem como a adequação de outros impostos para evitar a dupla tributação (GONÇALVES; VECCHIA, 2022). Avaliar possíveis trajetórias de descarbonização e suas estratégias associadas é desafiador devido à complexidade em torno do curso das mudanças climáticas em si (EPE, 2023a).

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO

Neste capítulo, analisam-se os potenciais principais desdobramentos da precificação regulada de carbono no futuro. Adicionalmente, discute-se como o setor de energia tem respondido às pressões voltadas para a descarbonização e a implementação de emissões carbono neutro. Esta análise, fundamentada nas informações e opiniões compiladas neste trabalho, tem por objetivo examinar as complexas interações nas políticas de precificação de carbono reguladas e suas implicações no setor energético.

A IEA elaborou, em 2021, e posteriormente revisou em 2023, um *roadmap* visando à descarbonização e o alcance de emissões líquidas nulas em carbono, com especial enfoque no setor energético global. Este plano, segundo a IEA, apresenta-se como mais viável tecnicamente, oferecendo o melhor custo-benefício e maior aceitação social em relação a uma transição energética justa rumo às emissões líquidas nulas em carbono no setor de energia até 2050 (IEA, 2023c).

Importante ressaltar que, embora o *roadmap* possua um escopo global, cada nação detém sua estratégia própria, com características distintas, diferentes pontos de partida, além de variados níveis de responsabilidade e capacidades (IEA, 2023c).

Embora o *roadmap* da IEA seja uma referência geral para a descarbonização do setor de energia, de fato, conforme destacado pela agência, cada país possui características e cenários econômicos e de governanças distintos. Sendo assim, o *roadmap* da IEA não pode ser considerado o único caminho pois, especialmente para o caso do Brasil, o setor de energia corresponde a cerca de um quarto das emissões; cabe, por isso, complementação dos padrões de referência para transição de economia de baixo carbono tendo como base, por exemplo, a trajetória do IPCC para limitar o aumento da temperatura terrestre em até 1,5°C.

Para analisar a tendência de transição energética no Brasil, foram considerados o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e o Plano Nacional de Energia (PNE) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Quanto à análise da UE, foram considerados as Estratégias Nacionais de Longo Prazo (*National Long-Term Strategies*, em inglês) e os Planos Nacionais de Energia e Clima (*National Energy and Climate Plans* - NECPs, em inglês) da

Direção-Geral de Energia da Comissão Europeia, conhecida como DG ENER. Documentos adicionais de órgãos como a *European Environment Agency* (EEA) também foram incorporados à análise.

Alicerçado na proposta da IEA e na trajetória apontada pelo IPCC, procedeu-se à comparação destas com os planejamentos brasileiro e da UE.

3.1 PRECIFICAÇÃO DE CARBONO E O SETOR DE ENERGIA NO BRASIL

3.1.1 Últimas movimentações e perspectivas futuras do mercado regulado de carbono no Brasil

É necessário frisar que, até o presente momento, o Brasil não instituiu um mercado de carbono regulado. No entanto, observaram-se progressos significativos, especialmente ao final de 2023.

Esse ano foi um marco significativo nas discussões legislativas da criação de um SCE no Brasil. Este debate inclui propostas de emendas e discussões envolvendo diferentes organizações empresariais. Lefevre, Breviglieri e Osório (2022) destacam que a implementação desse sistema no país é permeada por diversas perspectivas e interesses.

Importante destacar que o Brasil tem a possibilidade de estabelecer um SCE nacional por meio de regulações internas, independentemente das normas internacionais para mercados de carbono delineadas no Acordo de Paris. Este acordo delimita apenas as regras para cooperação internacional, não restringindo os países na criação de seus próprios sistemas de precificação de carbono como parte de suas estratégias nacionais de mitigação, inclusive para os signatários do Acordo (LEFEVRE; BREVIGLIERI; OSORIO, 2022).

Contudo, diversos aspectos ainda necessitam de negociação para viabilizar a operacionalização do Artigo 6 do Acordo de Paris. A continuidade dessas negociações é de extrema importância, exigindo que o Brasil adote medidas para se alinhar às regras do mercado regulado de carbono (FIESP, 2023).

Esses pontos destacam uma faceta importante da política ambiental brasileira em relação ao mercado de carbono. A capacidade do Brasil de instituir um

SCE futuro próprio e independente de normas internacionais reflete uma autonomia na condução de políticas climáticas. Isso permite ao país moldar seu mercado de carbono de acordo com as peculiaridades nacionais, possibilitando uma abordagem customizada que considere as diversidades econômica, social e ambiental que o caracterizam; mas ainda assim é importante um grau de alinhamento às regras internacionais para potencializar acesso a mercados mais amplos, facilitando o comércio transfronteiriço.

Em 22 de agosto de 2023, a Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal divulgou um relatório sobre a aprovação dos Projetos de Lei referentes à regulação do mercado de carbono no Brasil. A Comissão examinou quatro Projetos de Lei (2.122/21, 3.606/21, 4.028/21, com base no 412/22) e, ao final, compilou um texto substitutivo para um Projeto de Lei, propondo a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) (MUNHOZ, 2023).

O PL substitutivo propõe a criação de modalidades de crédito de carbono, tanto para o mercado regulado, através da Cota Brasileira de Emissões (CBE), quanto para o mercado voluntário, por meio do Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE). Conseqüentemente, define-se o crédito de carbono como um valor mobiliário negociável em bolsa de valores, sujeito à regulamentação da Comissão de Valores Mobiliários (CVM). Esta, por sua vez, já se posicionou anteriormente, por meio da Resolução CVM 175 e do Processo Administrativo RJ 2009/6346, declarando que tais créditos não seriam considerados valores mobiliários, o que se constitui em um ponto controverso a ser debatido (MUNHOZ, 2023).

O texto do PL substitutivo estipula que todas as fontes emissoras de mais de 10 mil toneladas de CO₂e por ano estejam sujeitas à regulamentação. Todavia, não define o conceito de “fonte” nem diferencia setores e cadeias produtivas, estabelecendo uma norma de caráter geral (MUNHOZ, 2023).

Ao diferenciar entre mercados regulado e voluntário, o PL aborda as nuances do comércio de emissões, proporcionando flexibilidade para empresas e incentivando iniciativas de redução de carbono. No entanto, a classificação dos créditos de carbono como valores mobiliários negociáveis traz à tona desafios regulatórios importantes como a contraposição da CVM.

A obrigatoriedade de regulamentação para fontes emissoras de mais de 10 mil toneladas de CO₂e por ano introduz um limiar que visa englobar os principais contribuintes das emissões, a falta de especificação sobre o que constitui uma “fonte” e a ausência de diferenciação entre os setores e cadeias produtivas já geraram dúvidas e ambiguidades. Essa generalização pode dificultar a implementação efetiva das medidas propostas. Portanto, uma definição mais clara e critérios diferenciados, possivelmente adaptados às especificidades de cada setor, seriam fundamentais nos avanços das discussões.

Em 4 de outubro de 2023, a Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal aprovou por unanimidade o texto substitutivo do Projeto de Lei 412/22, que regulamenta o SBCE. Este inclui a definição legal de que o CRVE é um ativo fungível e transacionável, representando a redução ou remoção de uma 1 tonelada de CO₂e (MUNHOZ, 2023).

No PL aprovado, estão sujeitos à regulamentação os operadores responsáveis por instalações e fontes que emitam acima de 10 mil toneladas de CO₂e por ano, empresas que emitem entre 10 mil e 25 mil toneladas de CO₂e por ano e empresas com emissões superiores a 25 mil toneladas de CO₂e por ano.

Conforme relatos de Munhoz (2023) e da Câmara dos Deputados (2023), as exigências para os diferentes cenários são:

(1) instalações e fontes que emitem entre de 10 e 25 mil toneladas: obrigatoriedade de realizar plano de monitoramento de emissões, relatório de emissões e remoções de GEE além de outras previstas em decreto ou ato específico.

(2) instalações e fontes que emitem acima 25 mil toneladas: além das obrigações prevista no item (1), será imposta a obrigação adicional de enviar anualmente ao órgão gestor um relato de conciliação periódica das obrigações.

Ao final de 2023, a Câmara dos Deputados aprovou, em 21 de dezembro, a proposta que regulamenta o mercado de carbono brasileiro, PL 2.148/15. Este texto cria o SBCE, estabelecendo limites para emissões de GEE e um mercado para a venda de títulos. As empresas que excederem o limite de emissões estabelecido poderão compensar suas emissões com a compra de títulos, enquanto aquelas que emitirem abaixo do limite poderão vender a diferença no mercado. O relator, deputado Aliel Machado, propôs um texto que sintetiza os projetos discutidos na

Câmara com uma proposta já aprovada pelo Senado (PL 412/22) (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2023; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS, 2023;).

A proposta em discussão estabelece um mercado regulado de títulos de compensação e geração de créditos por emissões de GEE. Este mercado estará vinculado ao SBCE, que será desenvolvido em cinco fases ao longo de seis anos (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2023). No sistema proposto, serão negociadas as CBEs e CRVEs, cada um representando 1 tonelada de CO₂e. Desta forma, cada certificado de redução ou remoção permitirá neutralizar uma cota de emissão de gases.

Dada a evolução dos debates intensos sobre a criação de um mercado de carbono regulado no Brasil em 2023, trata-se de uma questão relevante que espelha o desafio de alinhar o desenvolvimento econômico à sustentabilidade ambiental, bem como aos compromissos globais assumidos pelo país no contexto das mudanças climáticas e na redução das emissões de carbono.

As iniciativas legislativas e regulamentares buscam estabelecer um arcabouço legal para um mercado de carbono regulado, enfrentando, porém, obstáculos ligados à ausência de clareza nas definições de escopo. Tal cenário ressalta a complexidade de harmonizar interesses econômicos, ambientais e sociais em uma estratégia nacional de redução de emissões ainda em formação.

Entre os desafios, destacam-se a complexidade regulatória e a demanda por infraestrutura apropriada para monitoramento e verificação de emissões. Um tema sensível e em discussão é a participação do agronegócio nos tetos de emissões, visto que o setor não está contemplado no SBCE sob alegação da dificuldade de contabilização de emissões.

Apesar dos desafios, surge uma oportunidade única para o Brasil se destacar como líder na mitigação das mudanças climáticas abrindo portas para novos mercados e investimentos, dada sua extensa matriz energética renovável.

Para o desenvolvimento de um mercado de carbono regulado no país, é essencial que o Brasil prossiga com uma estratégia equilibrada, que concilie regulação, incentivos e a participação efetiva de todos os setores interessados da sociedade, não excluindo, por exemplo, grandes emissores de carbono.

Espera-se que, em breve, o mercado de carbono regulado seja estabelecido no Brasil, apoiado por diretrizes sólidas que promovam um ambiente de responsabilidade. Esse mercado deve estar em consonância com os compromissos climáticos do país, representando um papel vital para que o governo brasileiro atenda às metas estipuladas no Acordo de Paris e reduza suas emissões.

Com um olhar otimista, o país tem motivos para alimentar expectativas positivas, especialmente por contar com uma matriz energética consideravelmente limpa, em contraste com muitas nações do hemisfério norte.

3.1.2 O caminho da transição energética no Brasil passa pela NDC e pelos planos energéticos brasileiros

A NDC brasileira revisada em 2023 estipula que o país deve reduzir suas emissões de CO₂e em 48% até 2025 e em 53% até 2030, tendo como ano-base 2005. Adicionalmente, no mesmo ano, o Brasil reiterou o compromisso de alcançar um saldo zero de emissões até 2050 (BNDES, 2023).

No entanto, observa-se na trajetória brasileira um histórico de retrocessos em relação às revisões das NDC. Desde a versão de 2020, houve alterações na base de cálculo e diminuições nas ambições de redução das emissões de toneladas de CO₂e, ilustrada na figura 20, bem como a retirada das metas setoriais existentes na primeira NDC de 2016 conforme destacado por Grotera *et al.*, (2022). Esse padrão ocorre apesar das declarações governamentais que afirmam a existência de metas ambiciosas e alinhadas com o planejamento de descarbonização global.

| | 2016 | 2020 | 2022 | 2023 |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Meta para 2025 Gt CO ₂ e | 1,30 (-37%) | 1,79 (-37%) | 1,61 (-37%) | 1,32 (-48,4%) |
| Meta para 2030 Gt CO ₂ e | 1,20 (-43%) | 1,62 (-43%) | 1,28 (-50%) | 1,20 (-53,1%) |
| Valor base Emissões de 2005 Gt CO ₂ e | 2,1 2º Inventário Nacional | 2,84 3º Inventário Nacional | 2,56 4º Inventário Nacional | 2,56 4º Inventário Nacional |

Figura 20 - Histórico das NDC do Brasil

Fonte: elaboração própria com base nos dados da UNFCCC (2023a)

O Acordo de Paris, firmado em 2015, determina que cada nação deve apresentar e atualizar sua NDC a cada cinco anos, visando elevar progressivamente os esforços no combate às mudanças climáticas (UNFCCC, 2015a). A primeira série de NDC foi entregue em 2015 e uma significativa atualização se deu em 2020. Seguindo o ciclo quinquenal, espera-se uma nova revisão global em 2025.

Estudos utilizando dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) apontam que, durante o quadriênio de 2019-2022, ações climáticas foram insuficientes. A taxa de desmatamento na Amazônia aumentou cerca de 53%, e no Cerrado, 42%, o que impõe desafios substanciais para o Brasil atingir sua meta de NDC em 2025, ano em que o país sediará a COP30 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023b).

Ainda que as emissões do Brasil também dependam de ações efetivas que ataquem uma parcela de cerca 25% do CO₂e do setor de energia, sem resultados expressivos na redução do desmatamento, as metas declaradas na NDC podem ser comprometidas.

Todavia, de acordo com o Observatório do Clima (2023b) as metas de NDC podem ser atingidas se o país reproduzir, em 2024 e 2025, os resultados

expressivos na redução do desmatamento na Amazônia observados em 2005-2006, período inicial do Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento da Amazônia.

No Brasil, no contexto do planejamento energético brasileiro o Ministério de Minas e Energia é responsável pelo Plano Nacional de Energia (PNE), um conjunto de estudos e diretrizes que visam traçar uma estratégia de longo prazo para o setor energético brasileiro. O plano vigente é o PNE 2050. Paralelamente, o país conta também com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), cuja versão mais recente é o PDE 2032 (EPE, 2020b; EPE, 2023c).

Embora interligados, o PNE e o PDE apresentam diferenças significativas em suas abordagens e escopos. O PNE é um plano estratégico de longo prazo, cuja função primordial é antecipar impactos em um horizonte extenso para o setor de energia e orientar as políticas governamentais visando uma expansão sustentável e confiável do setor. Em contrapartida, o PDE concentra-se na expansão do setor energético em um horizonte de 10 anos, integrando políticas energéticas vigentes e o histórico de desempenho das diversas fontes de energia.

Enquanto o PNE define a direção estratégica global, o PDE alinha-se a essa visão, detalhando a forma como a expansão energética deve ocorrer no curto prazo. Além disso, o PNE tem o potencial de influenciar e modificar as políticas energéticas existentes, com base em análises de custo-benefício, para alcançar seus objetivos a longo prazo (EPE, 2020b; EPE, 2023c).

Para 2024 não seria surpresa esperar, além do PDE 2032, uma nova revisão da NDC brasileira, pois embora 2025 marque o próximo período de revisão formal das NDC, o processo de ampliação da ambição e atualização dos compromissos é contínuo, podendo acontecer a qualquer instante.

3.1.3 O Brasil frente ao *roadmap* da IEA e a trajetória modelada pelo PCC

No cenário de referência global, o relatório *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector* da IEA delinea os pilares fundamentais para alcançar emissões líquidas nulas de carbono no setor energético IEA (IEA, 2021a). Esses incluem eletrificação, eficiência energética, mudança de comportamento social,

energias renováveis, hidrogênio, bioenergia, e tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

Adicionalmente, o Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC aponta uma janela de oportunidade limitada, ressaltando a importância de ações individuais e coletivas. Aspectos como governança, inovação, mudança comportamental e financiamento são apresentados como soluções cruciais para a transição necessária diante das mudanças climáticas. Estes elementos são fundamentais para alterar o atual cenário, evidenciando que a colaboração em múltiplos níveis é indispensável para enfrentar os desafios climáticos de forma eficaz.

A comparação entre os pilares do *roadmap* da IEA, a trajetória modelada pelo IPCC e a estratégia brasileira de longo prazo, apresentada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em 2022 e detalhada no PDE 2032 e o PNE 2050, revela congruência entre os elementos-chave da transição energética.

Nos setores de eletricidade e calor, indústria e transporte, observa-se um impacto direto sobre o resultado das projeções de redução, conforme apontado nos diversos marcos na trajetória da emissão de carbono com balanço líquido neutro (figura 21) e no *roadmap* da IEA (figura 22). No aspecto global, são esses os setores mais centrais na estratégia de descarbonização proposta pela agência. A eletricidade e o calor, particularmente, representam os setores com maior necessidade de redução de emissões, o que enfatiza a importância da transição para uma matriz elétrica renovável e da eletrificação para alcançar as metas de emissões líquidas nulas de carbono; neste sentido o Brasil está avançado visto que possui grande participação de hidrelétricas.

Já a trajetória delineada pelo IPCC, abrangendo aspectos que vão além do setor de energia (figura 23), também ressalta a importância da mudança no uso do solo na jornada rumo à emissão líquida zero de carbono; uma situação que se alinha à realidade e grande necessidade do Brasil.

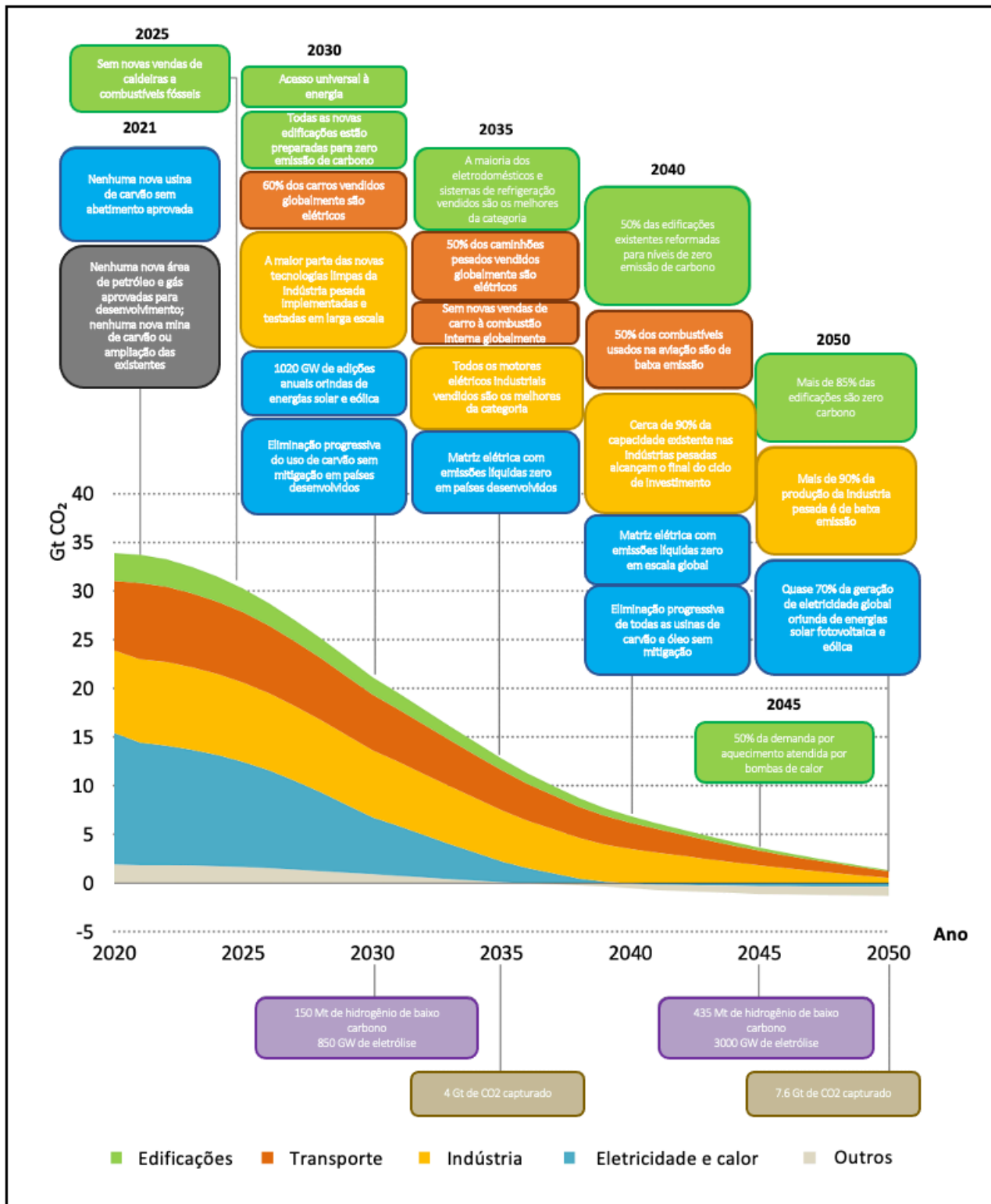


Figura 21 - Principais marcos para emissão de carbono com balanço líquido neutro
 Fonte: IEA (2021a)

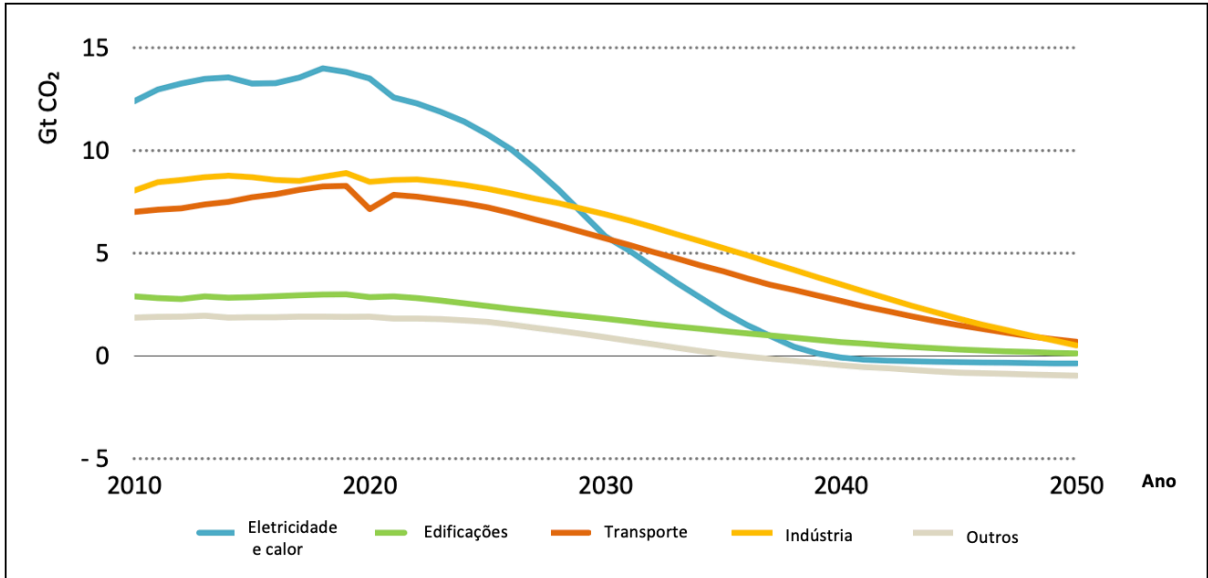


Figura 22 - Projeções de reduções de CO₂e do roadmap da IEA
Fonte: IEA (2021a)

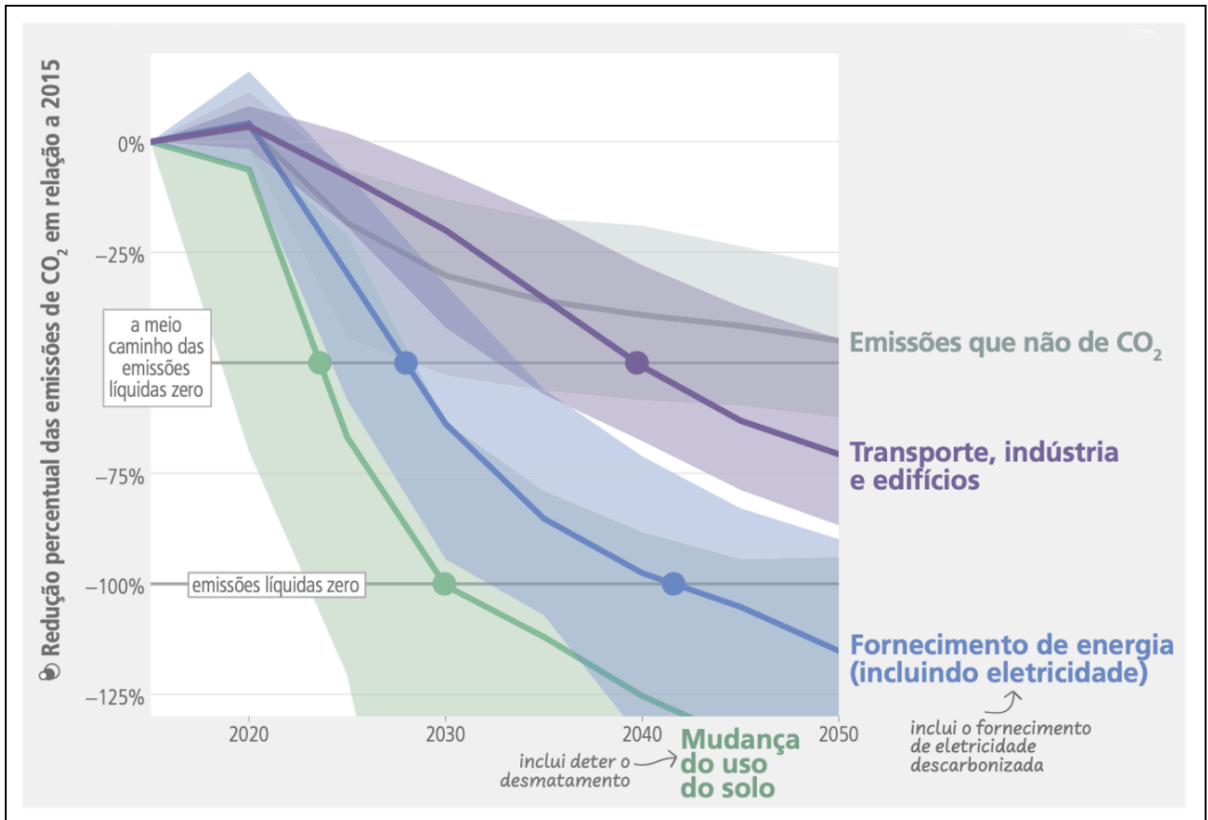


Figura 23 - Emissões setoriais que limitam o aquecimento terrestre a 1,5°C
Fonte: IPCC (2023)

Tal qual o governo brasileiro, a IEA reconhece que não há um único caminho para alcançar emissões líquidas nulas em carbono até 2050; também existe um consenso entre a IEA e os PDE e PNE brasileiros sobre a existência de muitas incertezas relacionadas às transições para energia limpa.

De acordo com o Banco Mundial (2023e), para atingir seus objetivos climáticos e zerar as emissões líquidas nulas em carbono até 2050, o Brasil não pode contar exclusivamente com mudanças estruturais e medidas econômicas: precisará priorizar também intervenções direcionadas aos setores.

Todavia, conforme destacado por Grotera *et al.*, (2022) direcionamentos quantitativos importantes da NDC do Brasil de 2016 para intervenções direcionadas aos setores, apontados abaixo, deixaram de ser tratados desde a NDC de 2020:

- (1) Aumentar a participação de biocombustíveis sustentáveis na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030 (incluindo biocombustíveis avançados).
- (2) Alcançar 45% de renováveis na matriz energética até 2030.
- (3) Expandir o uso de fontes de energia renováveis além da hidrelétrica na matriz energética total para entre 28% e 33% até 2030.
- (4) Alcançar ganhos de eficiência de 10% no setor elétrico até 2030.
- (5) No setor industrial, promover novos padrões de tecnologia limpa, aumentar a eficiência energética e expandir a infraestrutura de baixo carbono.
- (6) No setor de transporte, promover eficiência e melhorar a infraestrutura para o transporte e o transporte público em áreas urbanas

A ausência desses elementos na atual NDC resulta em uma postura pouco ambiciosa por parte do Brasil, cuja governança do tema carece de um posicionamento setorial definido.

Para comparar as estratégias de redução de emissões sugeridas pela IEA e pelo IPCC com o cenário brasileiro, utilizou-se a análise do Relatório sobre Clima e Desenvolvimento para o Brasil (CCDR), elaborado pelo Grupo Banco Mundial, devido à falta de um documento de referência alinhado à NDC de 2023 com metas setoriais e trajetórias de reduções de emissões.

A análise do CCDR inclui um caminho ilustrativo para tornar as emissões líquidas nulas em carbono até 2050 (figura 24). Este não é o único caminho compatível com a meta de mitigação de longo prazo do Brasil, mas destaca os papéis potenciais de diferentes setores.

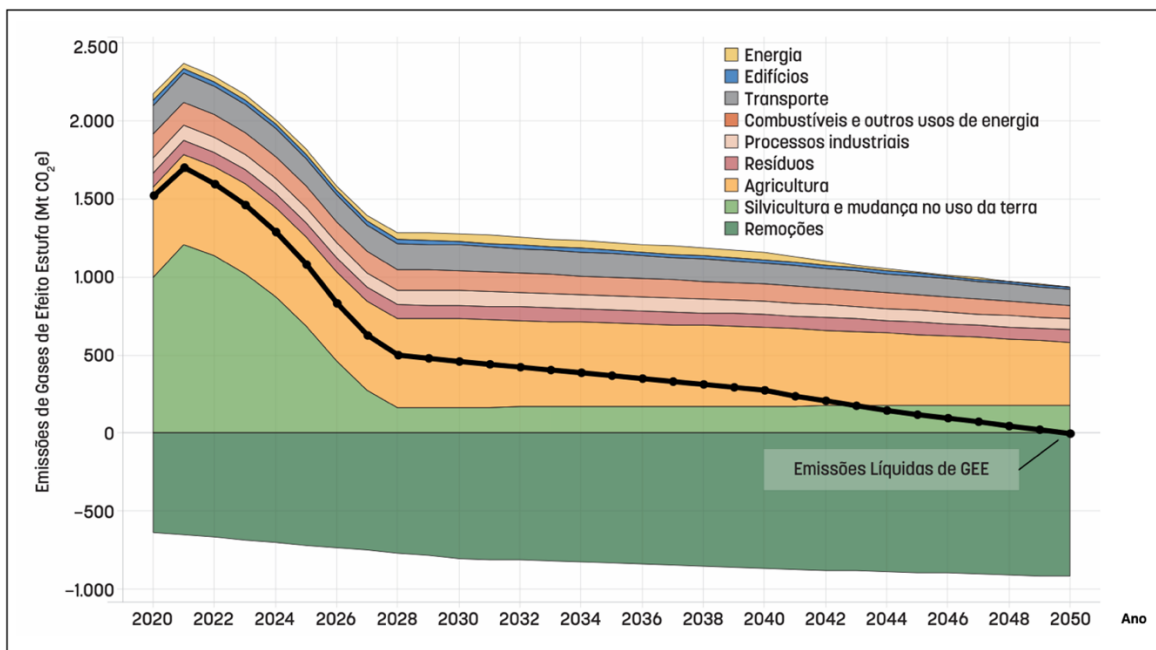


Figura 24 - Emissões e remoções de CO₂e do Brasil, por setor, 2020-2050
Fonte: Banco Mundial (2023e)

É importante ressaltar que a realidade de emissões no Brasil difere do contexto global. No Brasil, as emissões resultantes do uso e da ocupação do solo são os principais contribuintes para as mudanças climáticas. Contudo, as emissões provenientes de energia, transporte e uso de combustíveis, especialmente o transporte, também são relevantes e devem ser alvo de planos de redução específicos.

Tal qual os modelos previstos pela IEA e pelo IPCC, no Brasil, as análises das projeções do CCDR preveem necessidade de reduções em todos os setores, inclusive por meio da eletrificação, mudança de combustível e troca de modais de transporte. De forma geral, transporte e combustíveis serão grandes contribuintes secundários no Brasil no impacto esperado para um cenário futuro.

Mais abrangente, a Nota Técnica do PDE 2032 aponta as medidas que compõem a estratégia brasileira de longo prazo que foram apresentadas no documento “Diretrizes para uma estratégia nacional para neutralidade climática” do Ministério do Meio Ambiente. Para o setor de energia destacam-se conforme apontado pela EPE em 2022:

- (1) Alcançar uma participação entre 45% e 50% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.
- (2) Expandir a participação e o consumo de biocombustíveis por meio do RenovaBio.
- (3) Incentivar a fabricação e o uso de veículos elétricos e híbridos elétricos.
- (4) Promover ganhos de eficiência no setor energético e elétrico.
- (5) Fomentar o aproveitamento energético de resíduos.
- (6) Reduzir pegada de carbono para o setor de óleo e gás e de biocombustíveis.

A Nota Técnica do Plano Decenal de Energia 2032 apresenta similaridades com a abordagem setorial da NDC do Brasil de 2016 em alguns aspectos, embora não seja parte integrante da NDC de 2023. Entre as semelhanças, destacam-se:

- (1) O objetivo de atingir uma participação de 45% a 50% de energias renováveis na matriz energética até 2030, valor que se alinha à antiga meta da NDC de 2016 de alcançar 45%.
- (2) A expansão da participação e do consumo de biocombustíveis, incentivada pelo RenovaBio, com a meta da NDC de 2016 estabelecendo um aumento de 18% até 2030.
- (3) A promoção de ganhos de eficiência no setor energético e elétrico, enquanto a NDC de 2016 abordava unicamente melhorias de eficiência no setor elétrico, com uma meta de 10% até 2030.

O trabalho do Grupo Banco Mundial fornece uma projeção das emissões de CO₂e no Brasil por setores econômicos e das remoções desses gases ao longo de três décadas. Considera-se que essa distribuição esteja alinhada com o perfil energético e produtivo do país que, apesar de sua matriz energética com expressiva participação de fontes limpas, principalmente impulsionada pela hidreletricidade, ainda se apoia consideravelmente em combustíveis fósseis.

A capacidade de resposta do Brasil aos acordos internacionais, como o Acordo de Paris, para alcançar um balanço nulo ou negativo GEE é um grande fator de destaque. Isso reflete o potencial do país não só na redução de emissões devido à sua matriz energética limpa, mas também na utilização de suas extensas áreas verdes para a captura de carbono, contanto que sejam mitigadas as questões de desmatamentos e perdas de vegetação.

A concretização dessas projeções depende de fatores críticos como investimentos em tecnologia limpa, políticas de conservação e restauração florestal, além de uma transformação econômica voltada para a sustentabilidade. O cumprimento das regulamentações ambientais, exemplificado pelo Código Florestal Brasileiro e a Política Nacional sobre Mudança do Clima, é fundamental nesse processo.

No entanto, a efetividade dessas políticas é frequentemente questionada em relação à sua execução e fiscalização. Problemas como desmatamento ilegal e expansão agrícola sem controle persistem, impactando negativamente a capacidade de remoção de carbono e aumentando as emissões.

3.1.4 Cenários de energias limpas e combustíveis fósseis no Brasil

À medida que a energia limpa se expande e a demanda por combustíveis fósseis diminui no cenário de emissões líquidas nulas em carbono, não há necessidade de investimento em novas tecnologias fósseis; todavia, no Brasil, a demanda nacional de combustíveis fósseis como derivados de petróleo, por exemplo, aumenta conforme projeções do PDE 2032 (figura 25).

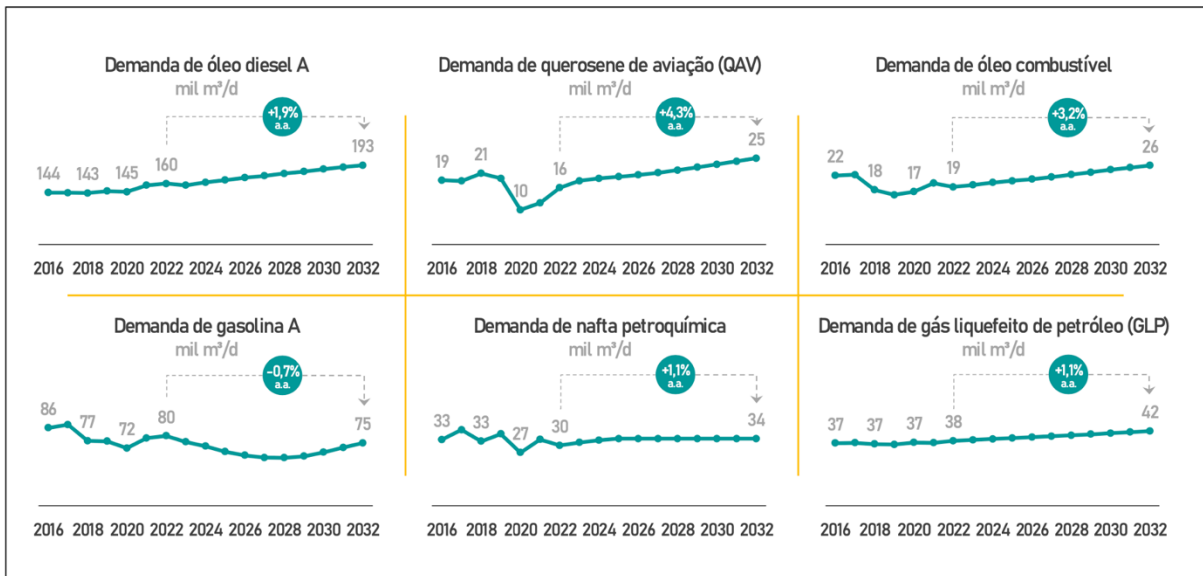


Figura 25 - Demanda nacional de derivados de petróleo
 Fonte: EPE (2023f)

Embora não sejam observadas variações de ordem de grandeza significativas, os derivados de petróleo mantêm uma participação expressiva na matriz energética brasileira.

No contexto de emissões líquidas nulas de carbono, torna-se essencial sequenciar a diminuição do investimento no fornecimento de combustíveis fósseis e aumentar o investimento em energias limpas. Entretanto, no Brasil, conforme indicado pela EPE, há 18 refinarias de petróleo em operação com uma capacidade nacional de refino de 2,3 milhões de barris por dia. Nota-se que a média de processamento mensal de petróleo nas refinarias, em milhões de barris por dia, tem crescido nos últimos anos, passando de 1,75 em 2019 para 1,94 em 2022. Além disso, o PDE 2032 evidencia investimentos previstos para o parque de refino nacional (figura 26).



Figura 26 - Investimentos previstos no parque de refino nacional
Fonte: EPE (2023f)

Com a expectativa de expansão da capacidade de refino no Brasil ao longo do período decenal, projeta-se um crescimento na produção de derivados de petróleo no país de 1,1% ao ano entre 2022 e 2032 (EPE, 2023f). Contudo, essa perspectiva está em contraste com as projeções da IEA e do IPCC. Esta contradição, que consiste em sustentar a produção de petróleo em um período de transição energética, está no cerne das políticas públicas para o setor e ainda estão em processo de estruturação e apresentam indefinições, a exemplo da COP28, que não estabeleceu números e datas para a eliminação do uso de combustíveis fósseis.

Adicionalmente, a recente adesão do Brasil à Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) foi objeto de críticas. Argumenta-se que a entrada do país na organização contrasta com o compromisso assumido durante a COP28 em Dubai, que prevê triplicar a capacidade do Brasil em energias renováveis até 2030 (SENADO FEDERAL, 2023). À luz desses fatos, são expostas as complexidades e os desafios enfrentados pelo Brasil no equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e as metas climáticas globais.

3.1.5 Potencial das bioenergias no Brasil

Nas discussões sobre a transição energética, projeções tanto da IEA quanto da *International Renewable Energy Agency* (IRENA) sugerem que, dependendo das premissas adotadas, a produção mundial de bioenergia deverá crescer entre 60% e 300% até 2025, em um cenário de emissões líquidas nulas de carbono (RODRIGUES; MATOS; VALENTE, 2023).

A bioenergia surge como um dos pilares fundamentais dessa transição para energia limpa, tanto nas perspectivas da IEA quanto no planejamento energético brasileiro. Neste contexto, o Brasil desempenha um papel de liderança, uma vez que a maior parte do crescimento no uso da bioenergia moderna no cenário de carbono neutro proposto pela IEA provém de mercados emergentes e economias em desenvolvimento.

Nessas regiões, espera-se que o uso da bioenergia quase dobre até 2030, crescendo a uma taxa mais acelerada do que nas economias avançadas (figura 27). Ainda, de acordo com as projeções, a demanda global por bioenergia deverá aumentar progressivamente até 2050. Enquanto se prevê que o uso de biomassa moderna irá aumentar, enquanto o uso da biomassa tradicional cairá para zero até 2030.

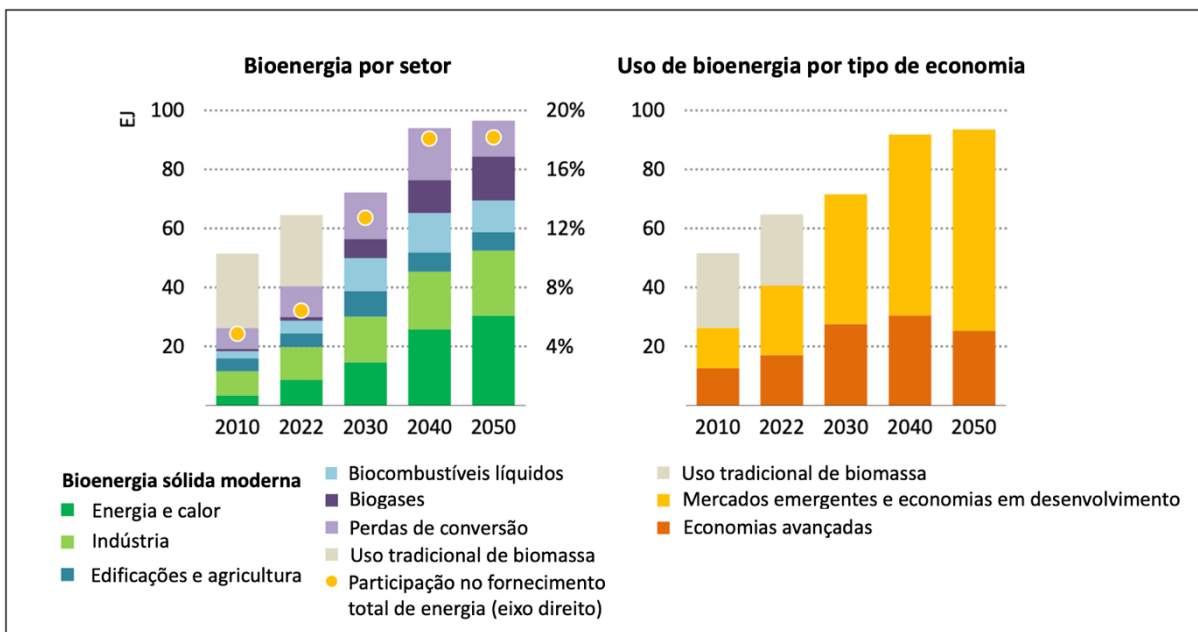


Figura 27 - Uso primário de bioenergia por setor e agrupamento econômico no cenário de carbono neutro da IEA, 2010-2050
 Fonte: IEA (2023c)

No que tange aos biocombustíveis líquidos, as expectativas de demanda dependem em grande parte de políticas regulatórias (IEA, 2023c). No Brasil, uma das medidas mais significativas, conforme delineado pelo PDE 2032, é a expansão da participação e do consumo de biocombustíveis por meio do programa RenovaBio.

Segundo a EPE (2022) este programa é a principal política brasileira relacionada a biocombustíveis e se baseia em três pilares: metas de descarbonização, certificação da produção de biocombustíveis e créditos de descarbonização.

A bioenergia é a segunda principal fonte na matriz energética brasileira. Segundo Rodrigo, Matos e Valente (2023), os produtos derivados da cana-de-açúcar representam de 15% a 20% de toda a energia disponibilizada no país; destaca-se ainda a bioeletricidade oriunda do bagaço de cana-de-açúcar, cuja produção excedente (não utilizada por usinas) é suficiente para atender mais de 10 milhões de famílias por ano.

A projeção de biocombustíveis, conforme PDE 2032, se desdobra no Brasil em diversos tipos: etanol de cana de açúcar, etanol de milho, etanol de

lignocelulose, biometano e biodiesel. As figuras 28, 29 e 30 apresentam a projeção da oferta de etanol, o potencial de biogás com biomassa residual de cana-de-açúcar e a demanda de biodiesel no horizonte 2022-2032.

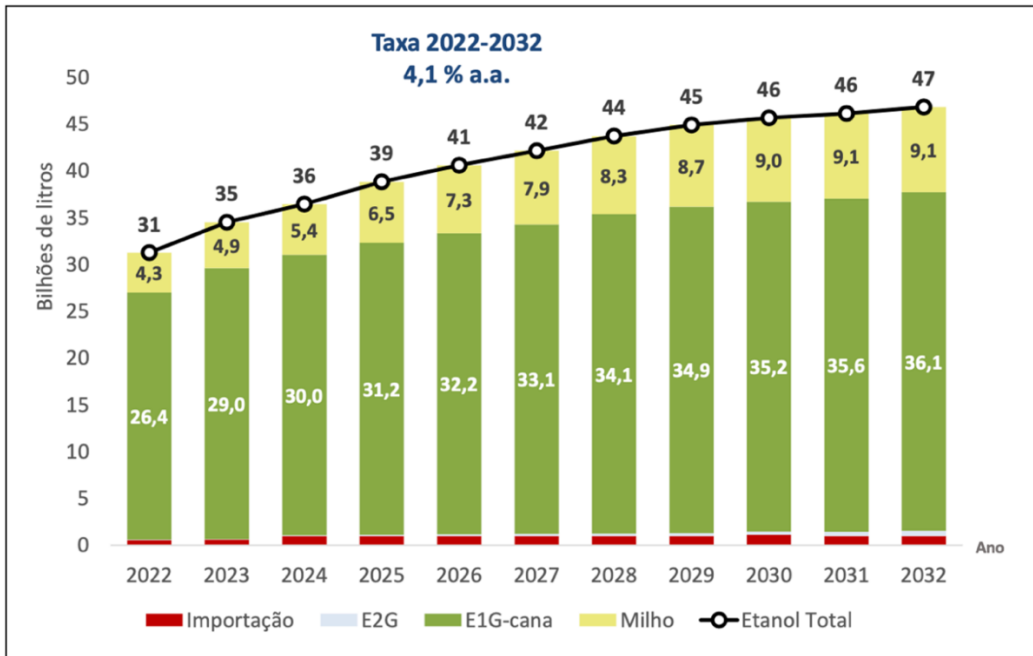


Figura 28 - Projeção da oferta total de etanol
Fonte: EPE (2023g)

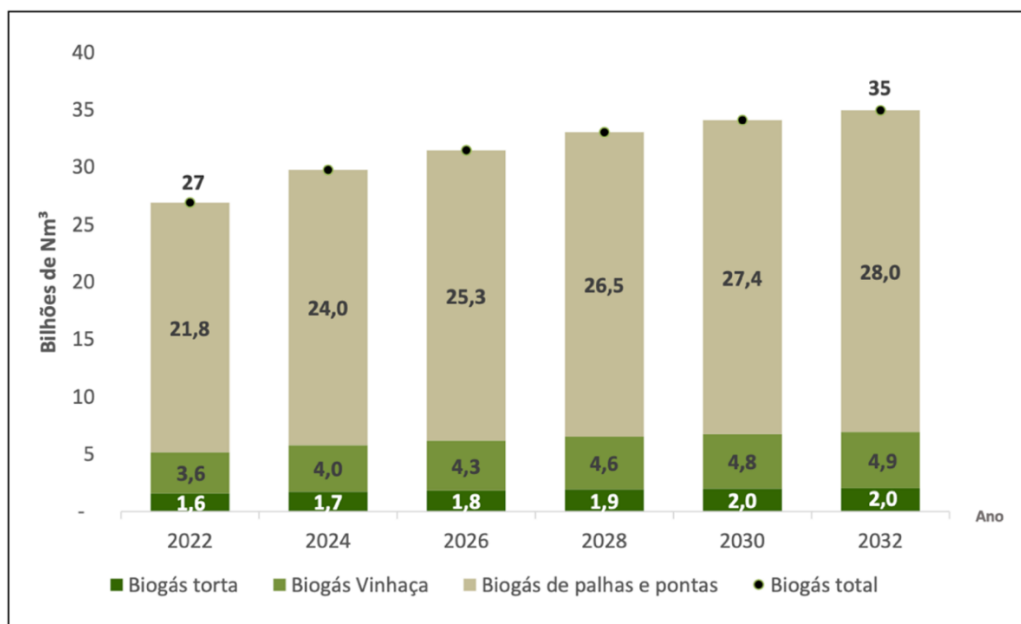


Figura 29 - Potencial de biogás com biomassa residual de cana-de-açúcar
Fonte: EPE (2023g)

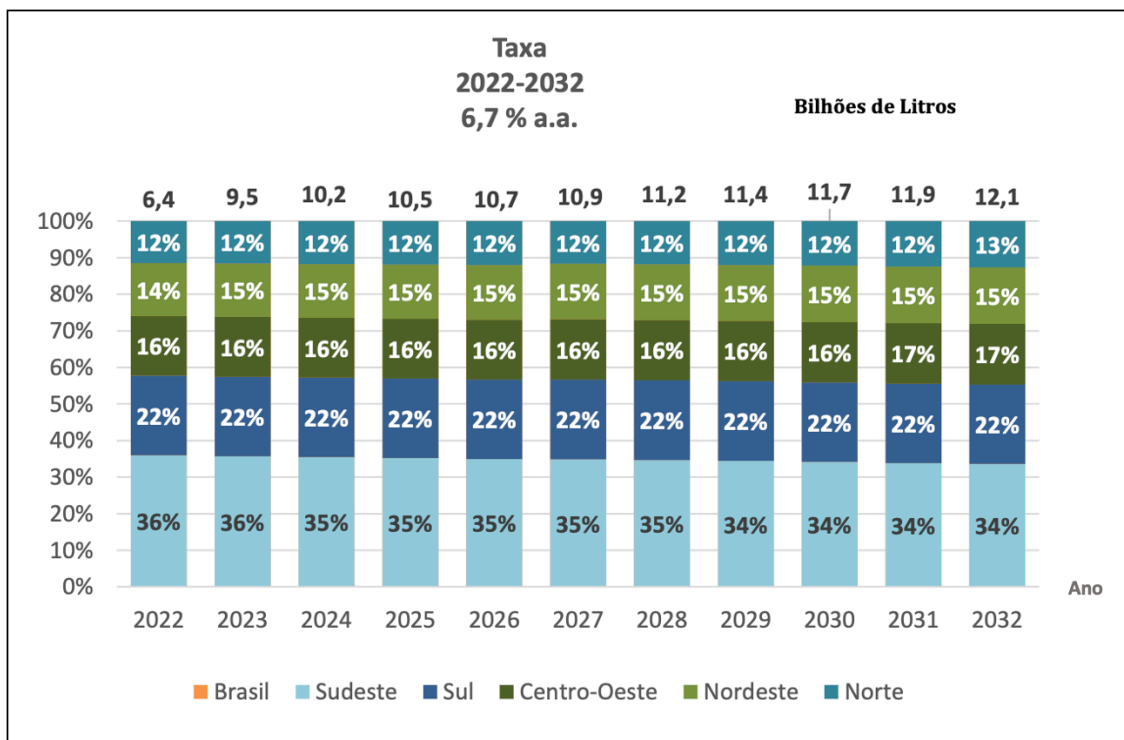


Figura 30 - Demanda de biodiesel
Fonte: EPE (2023g)

Até 2032, a oferta de etanol e demanda de biodiesel praticamente dobram nas projeções para o Brasil. O cenário está em linha com aquele traçado pela IEA, que projetou um pico de demanda, principalmente em economias em desenvolvimento.

O potencial do Brasil no domínio das bioenergias reflete uma trajetória promissora para o país, o que é claramente evidenciado pelos dados coletivos do Plano Decenal da EPE. Nesse contexto, a capacidade do Brasil de utilizar suas vastas reservas de biomassa, sua expertise agrícola e tecnológica, junto com uma política energética que apoie mais avanços neste campo, a exemplo do RenovaBio, mantém o país em uma posição de destaque no cenário internacional.

Além disso, o Brasil pode aproveitar de maneira estratégica seus recursos naturais para transformar a produção de energia, direcionando-a para uma matriz ainda mais limpa e renovável ultrapassando a contribuição de matrizes renováveis para além de 50% na sua oferta interna de energia.

A crescente participação projetada de biocombustíveis líquidos e biogases, não apenas proporciona uma redução das emissões de GEE, mas também fortalece

a segurança energética nacional e uma menor dependência em relação aos combustíveis fósseis.

Ademais, desde que o país encontre condições favoráveis para seguir as projeções do PDE 2032, o aumento na oferta de etanol e na demanda por biodiesel nos próximos anos sugerem que o país pode avançar em partes nas metas globais e nas exigências de acordos climáticos internacionais.

A expansão do uso do biogás, proveniente de resíduos da indústria da cana-de-açúcar, indica uma abordagem de aproveitamento de subprodutos agrícolas, potencializando não apenas a produção de energia, mas também contribuindo para a consolidação de um modelo de economia circular.

Para além da transição para fontes de energia renováveis e estratégia de mitigação das mudanças climáticas, o Brasil tem uma oportunidade de crescimento econômico e criação de empregos com uma maior demanda por combustíveis renováveis.

O potencial das bioenergias no Brasil não só responde às pressões globais por energias mais limpas, como também reforça uma visão otimista no campo bioenergético. Esse caminho tem o potencial não só de atender às necessidades energéticas internas, mas também de posicionar o Brasil como um fornecedor importante de energia limpa e de tecnologias verdes para o mundo.

3.1.6 O potencial da eletrificação do transporte no Brasil

À medida que a eletricidade assume o papel de “novo petróleo” no sistema energético global, no contexto de um cenário de emissões líquidas nulas de carbono, a eletrificação se posiciona como a principal ferramenta para a redução de emissões no setor de transporte rodoviário. Esta é uma das premissas centrais no cenário proposto pela IEA, conforme ilustrado na figura 31.

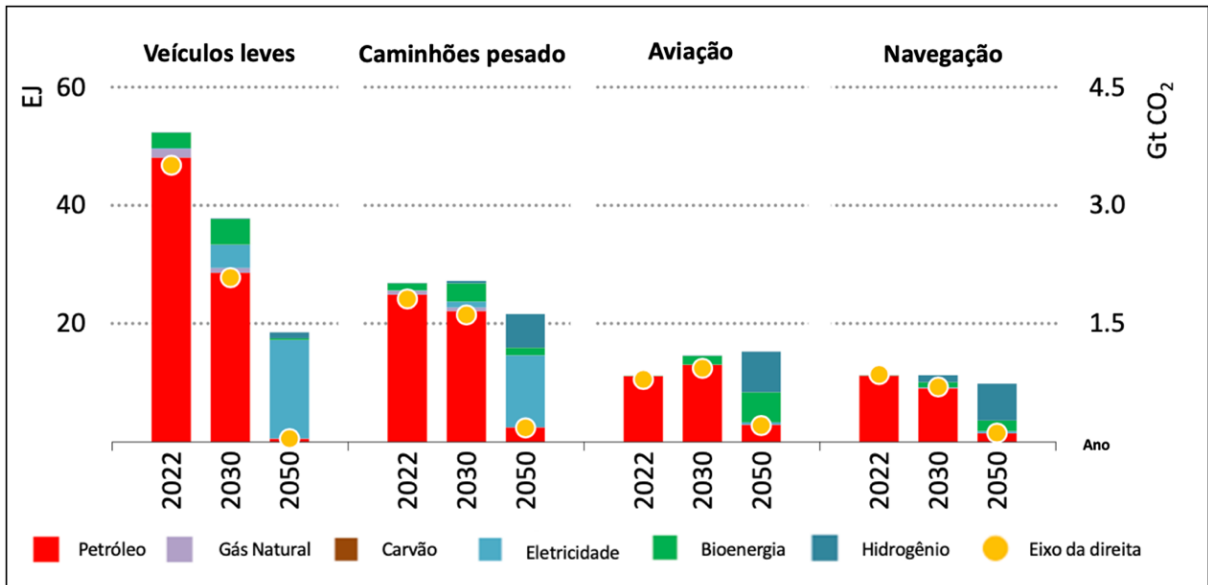


Figura 31 - Consumo final de energia no transporte por combustível para modais selecionados, 2022-2050
 Fonte: IEA (2023c)

Nas projeções da IEA, estima-se que as vendas de veículos elétricos no mundo representarão cerca de 65% do mercado de carros novos até 2030. Além disso, prevê-se que nenhum carro novo com motor de combustão interna será vendido após 2035. No que se refere a caminhões, os modelos elétricos e movidos a hidrogênio estão projetados para substituir os caminhões de médio e grande porte com motor de combustão interna. Espera-se, também, que as vendas de novos caminhões de combustão interna movidos a combustíveis fósseis cessem em 2040 nas economias avançadas e na China, e em 2045 no resto do mundo.

No segmento de transporte leve, observa-se uma dicotomia global entre eletrificação e combustão interna. Enquanto a eletrificação se apresenta como uma solução promissora para a redução de emissões de GEE, a tecnologia de combustão interna, ainda amplamente utilizada, enfrenta desafios significativos em termos de sustentabilidade ambiental.

No cenário da eletrificação do transporte, um elemento extra, o uso de biocombustíveis, se apresenta como uma peça contribuinte, mais uma vez, para a transição energética no setor de transportes, oferecendo um caminho para a redução das emissões tanto em veículos eletrificados híbridos, quanto naqueles movidos exclusivamente por motores à combustão.

Um estudo conduzido por Gauto *et al.*, (2023) destaca as vantagens significativas dos veículos híbridos alimentados por biocombustíveis em termos de emissões de CO₂e ao longo de seu ciclo de vida, demonstrando a viabilidade ambiental desta abordagem (figura 32). Além disso, a crescente disponibilidade de biocombustíveis e a flexibilidade oferecida pelos veículos *flex-fuel*, desde 2023, contribuíram para uma notável redução nas emissões de GEE, totalizando uma diminuição de 650 milhões de toneladas de CO₂e, conforme reportado por Rodrigues, Matos e Valente (2023).

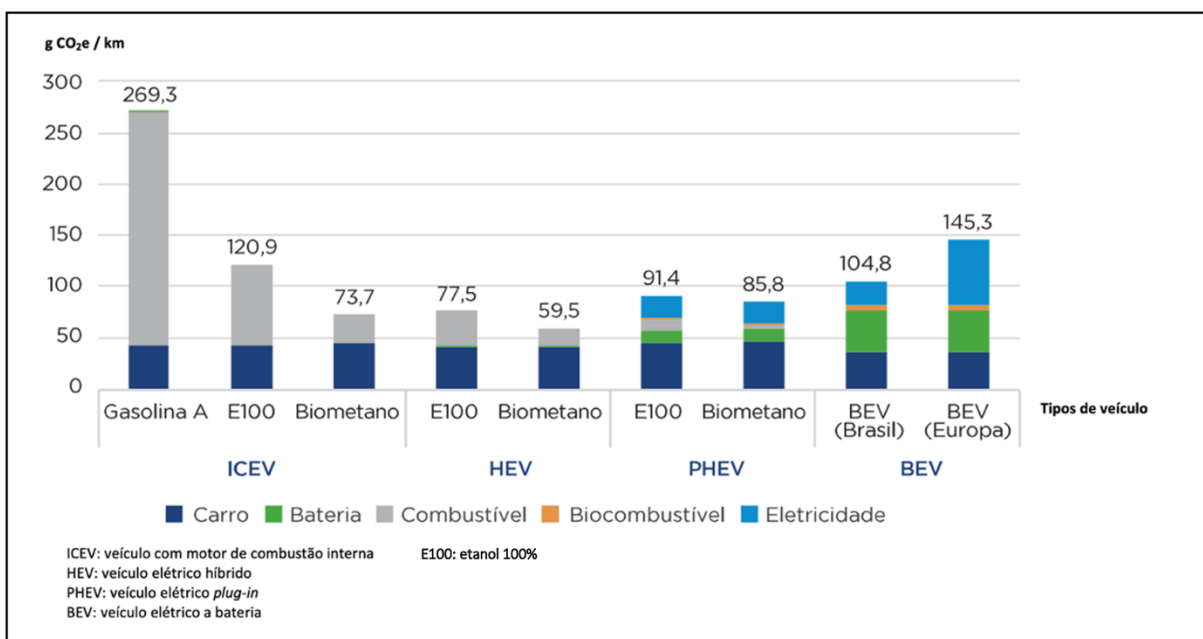


Figura 32 - Comparação das emissões médias de GEE na avaliação do ciclo de vida “berço ao túmulo” (g CO₂e/km)

Fonte: Gauto *et al.*, *apud* RODRIGUES; MATOS; VALENTE (2023)

No Brasil, em 2023, a eletromobilidade teve um destaque maior em comparação aos anos anteriores. Foi observado, neste ano, um aumento nas vendas de veículos leves eletrificados em todas as áreas do país (figura 33).

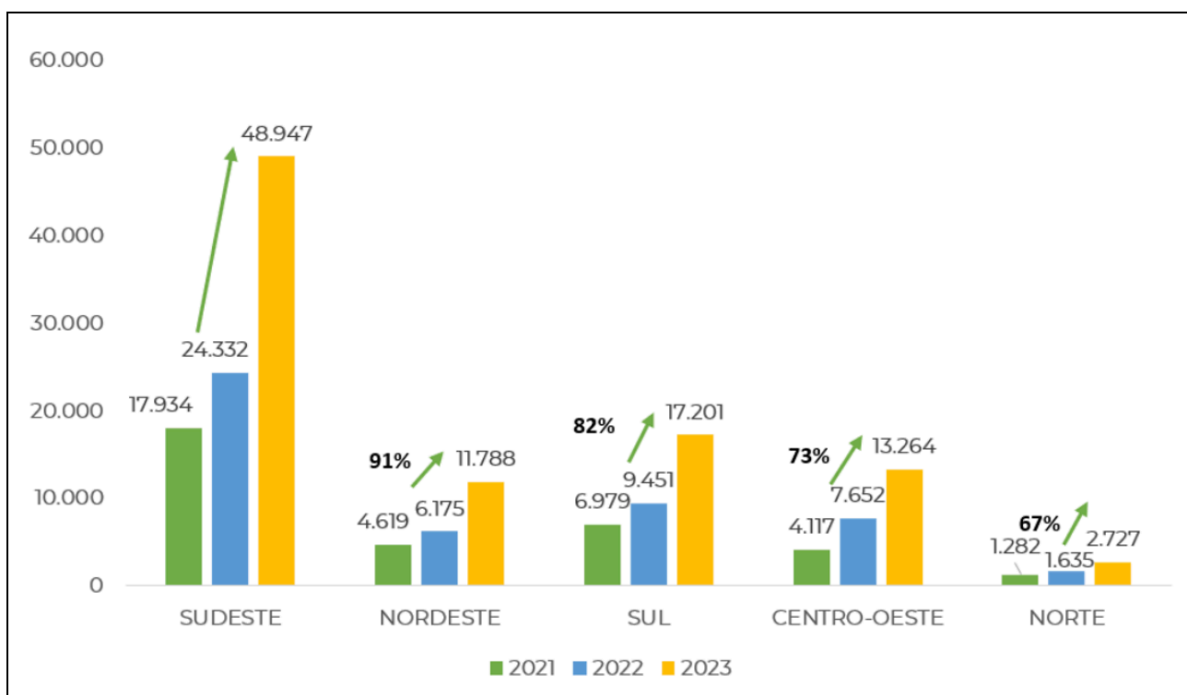


Figura 33 - Evolução das vendas de eletrificados leves no período 2021-2023
 Fonte: Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2023)

A região Sudeste manteve-se na frente com um aumento nas vendas de mais de 100%, enquanto o Nordeste também apresentou uma alta significativa de 91%, seguido pelas regiões Sul com 82%, Centro-Oeste com 73% e Norte com 67%.

Em termos de números absolutos, São Paulo lidera o *ranking* de cidades com o maior número de registros em 2023, seguido por Brasília, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Curitiba. A região Sudeste continua sendo a que mais registra veículos leves eletrificados, representando mais da metade do total de vendas no país, com um aumento expressivo sobre o ano anterior (Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2023).

No cenário nacional, o Brasil registrou um total de 93.927 veículos leves eletrificados em 2023, superando todas as expectativas com um crescimento de 91% sobre 2022. Os dados de veículos eletrificados compreendem a soma de híbridos *plug-in* (PHEV), elétricos a bateria (BEV) e híbridos convencionais sem necessidade de recarga externa (HEV), incluindo automóveis, SUVs e veículos comerciais leves (Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2023).

Diferentemente de outros países, o Brasil não estabeleceu metas formais de eletrificação veicular, uma posição que diverge do roteiro proposto pela IEA. No entanto, o país conta com um potencial projetado de aumentar a produção de biocombustíveis, o que pode ajudar na descarbonização de suas frotas de veículos, incluindo veículos híbridos movidos a baterias e biocombustíveis.

O governo brasileiro, por meio do programa Rota 2030 e do Programa Combustível do Futuro, tem como objetivo fomentar o desenvolvimento da eficiência energética, promover o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa emissão de carbono, além de incentivar a tecnologia veicular nacional, com foco especial nos biocombustíveis. Essas medidas visam à descarbonização da matriz de transporte, refletindo a importância da transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis (EPE, 2023).

Apesar dos diversos obstáculos, como altos custos dos veículos, limitações de autonomia de baterias, necessidade de longos períodos de recarga e falta de infraestrutura e pontos de recarga, o Brasil seguiu evidenciando progresso na eletrificação veicular.

Contudo, os obstáculos ainda destacam a importância de incentivos fiscais para compra desses veículos, da necessidade de uma infraestrutura de carregamento expandida e uma rede energética robusta. Assim, é fundamental a implementação de políticas integradas que não apenas promovam a eletrificação, mas também facilitem a compra dos veículos e reforcem a infraestrutura de suporte.

3.2 PRECIFICAÇÃO DE CARBONO E O SETOR DE ENERGIA NA UE

3.2.1 Resultados do mercado de carbono na UE

Conforme discutido no capítulo 2, as emissões de CO₂e da UE demonstram uma tendência decrescente no setor de energia, que é o maior emissor de GEE no continente. Este declínio é corroborado pela EEA, que registra uma redução significativa nas emissões de CO₂e (- 32%) desde a implementação do EU ETS em 2005, conforme ilustrado nas figuras 34 e 35. Além disso, a mudança nos preços dos combustíveis e a implementação de políticas climáticas eficazes, como aquelas

que promovem energias renováveis, têm impulsionado a redução de emissões em instalações estacionárias (EEA, 2023a).

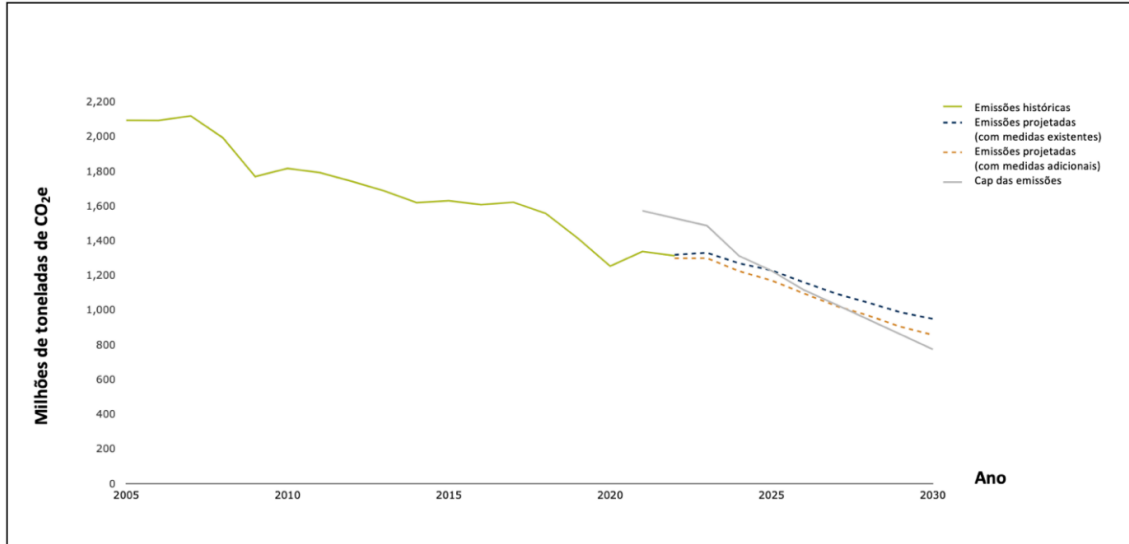


Figura 34 - Emissões históricas e projetadas de instalações estacionárias cobertas pelo EU ETS na área econômica europeia
Fonte: EEA (2023a)

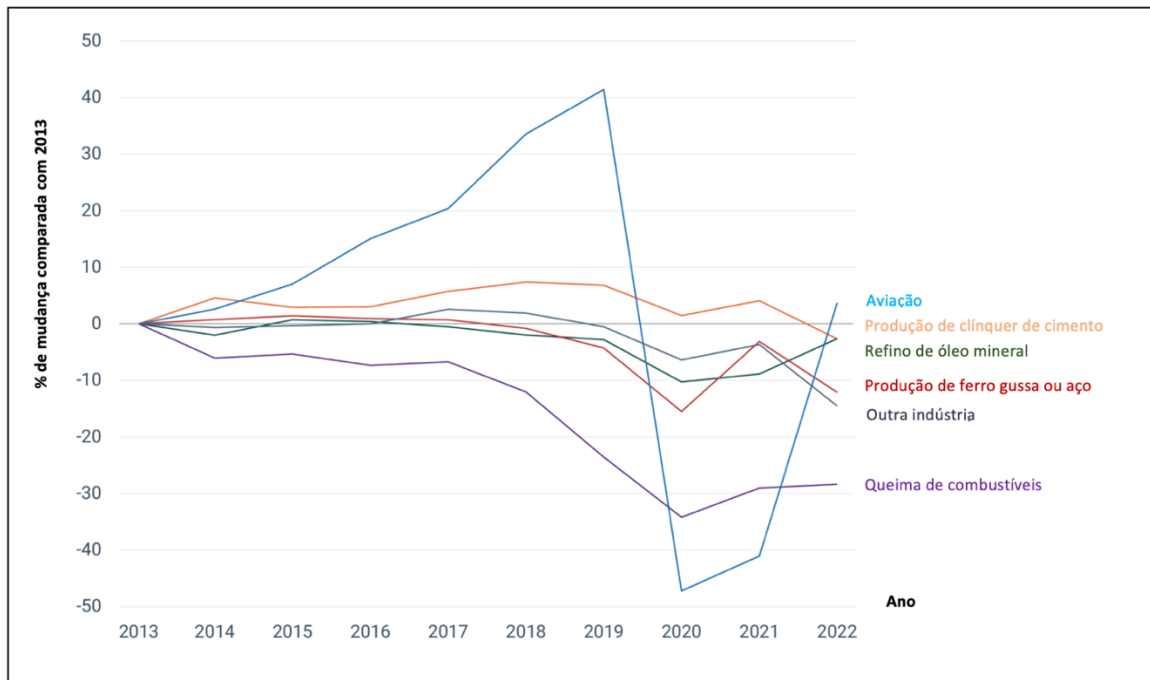


Figura 35 - Mudanças nas emissões cobertas pelo EU ETS por setor (2013-2022) em relação a 2013
Fonte: EEA (2023a)

Em 2022, as emissões totais no âmbito do EU ETS somaram 1,36 Gt de CO₂e, uma ligeira redução em relação às 1,36 Gt de CO₂e registradas em 2021. As emissões provenientes de instalações totalizaram 1,31 Gt de CO₂e, marcando uma queda de 1,8% em comparação com o ano anterior (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

Notavelmente, a redução nas emissões foi impulsionada principalmente pelas instalações industriais, com uma diminuição de 6,5% em 2022. Por outro lado, as emissões provenientes da geração de eletricidade e calor aumentaram pelo segundo ano consecutivo, registrando um crescimento de 2,4% em 2022. Esse aumento deve-se principalmente à crise energética na Europa e ao consequente uso ampliado de combustíveis fósseis na geração de eletricidade. Além disso, observou-se um aumento nas emissões no setor de refino de óleo mineral (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

Um fator-chave na recente redução das emissões no EU ETS tem sido a valorização do mercado de permissões de emissão, ou seja, o aumento do preço do carbono. Com a emissão de carbono se tornando mais cara, os produtores de energia estão migrando do carvão para fontes de energia menos intensivas em carbono, como gás e renováveis. Medidas de eficiência energética, energia renovável mais acessível e mudanças na estrutura econômica também têm sido fatores importantes (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

O gráfico na figura 36 ilustra como o valor das permissões de emissões negociadas no EU ETS aumentou de menos de €10 por tonelada métrica de carbono para mais de €90 desde o início de 2018.

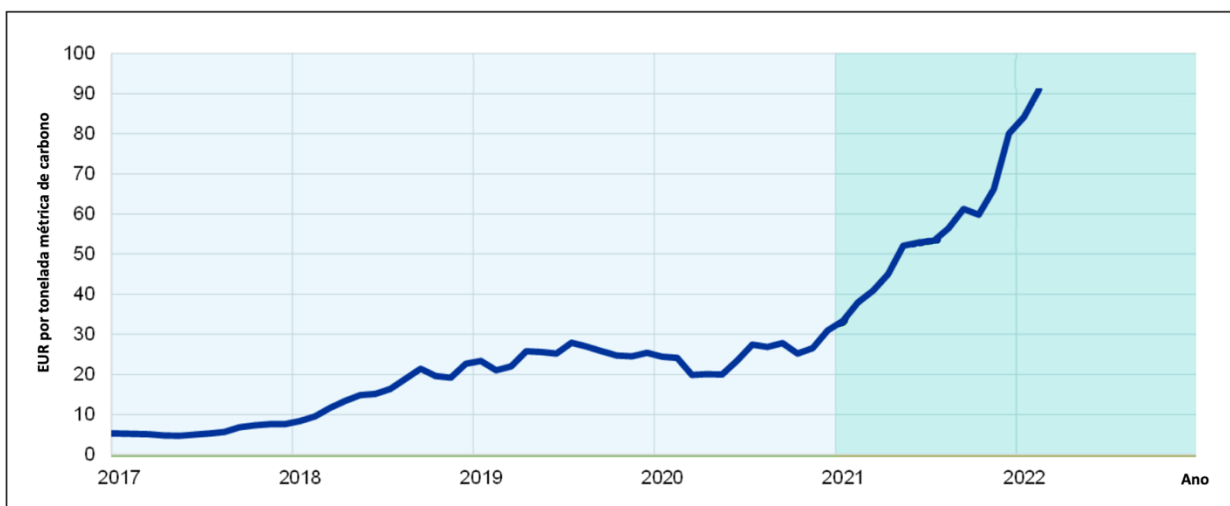


Figura 36 - Evolução de preços no EU ETS no período 2017-2022
 Fonte: adaptado de EUROPEAN CENTRAL BANK (2022)

Comentários de mercado indicam que os principais fatores por trás do aumento dos preços das permissões de emissão desde o início de 2018 provavelmente foram a adoção de políticas climáticas cada vez mais rigorosas na UE e globalmente, bem como várias alterações no *design* do mercado do EU ETS (EUROPEAN CENTRAL BANK, 2022).

A introdução da Diretiva EU ETS revisada, *Directive (EU) 2018/410*, em abril de 2018, que estabelece o quadro para o quarto período de negociação (quarta fase do EU ETS de 2021-2030), parece ter reforçado a credibilidade do sistema. Além disso, o anúncio do *European Green Deal pela Comissão Europeia* no final de 2019 e a aprovação de um novo objetivo de redução de emissões em toda a UE pelo Conselho Europeu no final de 2020 também são relatados como tendo impulsionado os preços das permissões de emissão (EUROPEAN CENTRAL BANK, 2022).

Quanto à curva ascendente de aumento dos preços a partir de 2021, o *European Central Bank (2022)* sugere que ela reflete uma combinação de fatores:

- (1) O clima particularmente frio na Europa no início de 2021 aumentou a demanda por energia. A curto prazo, dada a rigidez na produção, uma maior demanda por energia traduz-se em um aumento na demanda por permissões de emissão, resultando em preços mais altos.

- (2) O anúncio do pacote legislativo *Fit for 55* pela Comissão Europeia fortaleceu o papel do EU ETS na estratégia de descarbonização da UE.

(3) A quarta fase do EU ETS, que começou em 2021, implica uma oferta decrescente de permissões de emissão ao longo do tempo e parâmetros atualizados para a Reserva de Estabilidade do Mercado.

(4) Os preços mais altos do gás incentivaram os produtores de eletricidade a mudar do gás para a geração de energia mais intensiva em CO₂ em usinas a carvão, aumentando assim a demanda por permissões de carbono.

Diante do aumento notável nos preços das permissões de emissão nos últimos dois anos, não seria surpresa que a especulação financeira antecipe uma tendência de aumento, principalmente como resposta à intensificação dos objetivos de descarbonização na UE.

Na sua grande maioria os Estados-Membros da UE empregam as receitas do EU ETS em mudanças climáticas e fins energéticos; todavia, embora a Alemanha tenha o maior aporte de verbas, com 100% do investimento revertidos em ações contra mudanças do clima, este país apresentou praticamente o dobro das emissões dos demais grandes emissores da UE (Itália, Polônia e França) no ano de 2022 e permanece sendo o grande emissor europeu, ainda que com uma tendência de redução gradativa de emissões (figura 37). De forma geral, os grandes emissores europeus permanecem sendo os grandes contribuintes do bloco nos últimos anos.

De 2013 a 2022 o EU ETS arrecadou um montante de 139,5 bilhões de euros (ICAP, 2024); sendo no exercício de 2022 um total de 38,8 bilhões de euros em receitas de leilão, representando um aumento de 7,7 bilhões de euros em comparação ao ano anterior. Dessa quantia, 29,7 bilhões de euros foram alocados diretamente aos Estados-Membros, os quais reportaram a aplicação média de 76% destes fundos em projetos voltados para o clima e energia - um patamar equivalente ao ano de 2021 e consistente com a média de 75% registrada entre 2013 e 2020 (COMISSÃO EUROPEIA, 2023d).

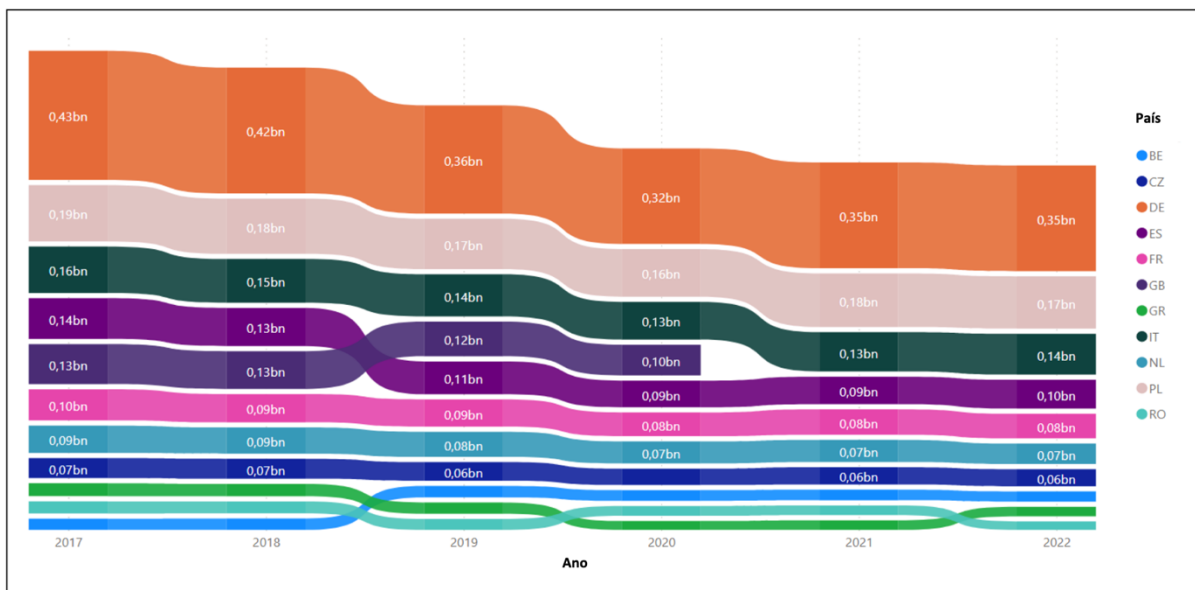


Figura 37 - Top 10 emissores da UE, 2017-2022
 Fonte: CAPTUREMAP (2022)

3.2.2 Últimas movimentações e perspectivas futuras do mercado regulado de carbono na UE

Ao longo dos anos, as políticas climáticas da UE tornaram-se progressivamente mais restritivas, como exemplificado pelas alocações de emissões no EU ETS com custos mais altos, gerando reduções sistemáticas de emissões de CO₂e. No atual contexto de políticas reguladas na UE, um elemento notável, que faz parte desta evolução, é o Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (*Carbon Border Adjustment Mechanism - CBAM*, em inglês), além do pacote legislativo *Fit for 55*.

No contexto do *European Green Deal*, em 14 de julho de 2021, a Comissão Europeia propôs o CBAM como parte do pacote legislativo *Fit for 55*. Este conjunto de propostas legislativas visa alinhar a política climática europeia com o objetivo de reduzir as emissões de GEE em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990 (COMISSÃO EUROPEIA, 2023f). As propostas do pacote legislativo *Fit for 55* são apresentadas no quadro 3.

Quadro 3 - Propostas do pacote *Fit for 55* da UE

| "Fit for 55" - Propostas | Status |
|---|-------------------|
| Reforma do EU ETS | Adotado |
| Novo sistema de comércio de licenças de emissão da UE para os combustíveis destinados aos edifícios e transportes rodoviários | Adotado |
| Fundo Social para o Clima | Adotado |
| Regulamento Partilha de Esforços | Adotado |
| Regulamento Uso do Solo, Florestas e Agricultura | Adotado |
| Normas de emissões de CO ₂ para veículos de passageiros e comerciais | Adotado |
| CBAM | Adotado |
| Diretiva de Energias Renováveis | Adotado |
| Diretiva de Eficiência Energética | Adotado |
| Regulamento de Infraestrutura para Combustíveis Alternativos | Adotado |
| Regulamento ReFuelEU Aviação | Adotado |
| Regulamento FuelEU Transportes Marítimos | Adotado |
| Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios | Acordo provisório |
| Regulamento da UE relativo à redução das emissões de metano no setor da energia | Acordo provisório |
| Regras atualizadas da UE para descarbonizar os mercados do gás e promover o hidrogênio | Acordo provisório |

Fonte: elaboração própria com base nos dados da COMISSÃO EUROPEIA (2023f)

O CBAM aplica-se aos bens especificados importados para a UE de países não-membros, conforme estabelecido no Regulamento UE 2023/956 do Parlamento Europeu e do Conselho de 10 de maio de 2023 e é um mecanismo significativo dentro da política climática da UE, tendo como objetivo principal mitigar o fenômeno conhecido como fuga de carbono. Este fenômeno, conforme explicado pela Agência Ambiental da Irlanda (EPA IE, 2023), refere-se à transferência da produção de bens para países onde os custos associados à emissão de carbono são menores ou inexistentes.

O CBAM irá substituir as alocações gratuitas anteriormente concedidas aos exportadores, trazendo medidas de controle de mercado que consideram aspectos ambientais, visando prevenir a perda de competitividade das empresas europeias

frente aos produtos importados a preços menores devido à ausência de compensação de emissões (ICC BRASIL, 2023).

Em termos gerais, o CBAM tem como objetivo assegurar um preço mais preciso para bens importados para a UE, levando em consideração as emissões de carbono associadas à sua produção. Indiretamente, o CBAM pode ser visto como um incentivo para que países exportadores para a UE adotem medidas para reduzir suas emissões de carbono, como o Brasil por exemplo.

A fase transitória do CBAM iniciou-se em 1º de outubro de 2023. Durante este período inicial, as obrigações limitam-se ao reporte de informações, com obrigações financeiras previstas para começarem a partir de 2026 (EPA IE, 2023).

Os produtos sujeitos ao CBAM estão listados no Anexo 1 do Regulamento EU 2023/956 e identificados através de códigos específicos, incluindo categorias como cimento, eletricidade, fertilizantes/adubos, ferro e aço, alumínio e produtos químicos.

Em 2023 também ocorreu a revisão do EU ETS para tornar o sistema mais robusto; para 2024 está prevista a extensão do sistema para o setor marítimo e mais adiante, em 2027, um novo sistema para edificações, transporte rodoviário e indústrias de pequeno porte. Isso permitirá uma cobertura de precificação de carbono para 75% das emissões da UE (COMISSÃO EUROPEIA, 2023e).

Além disso, até 2028, deverá ser lançado um novo ETS para a UE que terá uma meta climática mais ambiciosa, de pelo menos 55% de redução líquida de emissões em 2030 com ano base 1990. Para alcançar esse objetivo, espera-se que o novo EU ETS inclua as novas emissões previstas a partir de 2024 e 2027 (ICC BRASIL, 2023).

É inegável que a implementação do CBAM e as alterações no EU ETS pela UE marcam um avanço significativo em direção à mitigação da fuga de carbono e de um controle mais abrangente e restrito de emissões.

O CBAM, embora tenha um grande foco ambiental atuando na fuga de carbono, também levanta debates importantes sobre as implicações econômicas no comércio internacional. Por um lado, o mecanismo é reconhecido por seu papel na atuação direta contra a fuga de carbono; por outro, há preocupações de que possa funcionar como uma barreira protecionista a favor dos produtos europeus.

As ampliações do escopo do Sistema de Comércio de Emissões Europeu, o EU ETS, previstas para 2024 e 2027, adicionam outra camada de complexidade ao panorama regulatório europeu, trazendo à tona questões sobre seus impactos econômicos, especialmente em setores de alta demanda energética. Isso pode, indiretamente, afetar os consumidores, que enfrentariam aumentos nos preços devido às pressões por reduções nas emissões de carbono.

Ambas as iniciativas refletem o compromisso da UE com a liderança no combate às mudanças climáticas, mas carregam desafios significativos. A eficácia do CBAM depende não só de sua aceitação internacional, mas também da habilidade em promover equidade climática sem prejudicar as relações comerciais. Paralelamente, a implementação bem-sucedida do novo EU ETS requer uma estratégia que minimize impactos negativos sobre a economia e usuários de produtos e serviços no continente europeu.

Ademais, é importante que ambos os instrumentos sejam suficientemente adaptáveis para responder a um contexto geopolítico e econômico em constante mudança. O êxito dessas políticas será determinado não apenas pela diminuição das emissões de carbono, mas também pela habilidade da UE em cumprir suas ambições, fomentando o crescimento econômico e evitando tensões comerciais em nível internacional.

3.2.3 O caminho da transição energética na UE passa pela NDC e pelos planos energéticos da UE

A NDC da UE, definida em 16 de outubro de 2023, estipula que a UE deve reduzir suas emissões de GEE em, no mínimo, 55% até 2030, tomando como ano-base 1990 (UNFCCC, 2023b).

Em contraste com o Brasil, a UE encontra-se na terceira revisão de suas NDC, mas sem um histórico de retrocessos nas ambições de reduções de emissões. A primeira e segunda NDC mantiveram o compromisso de redução mínima de 40% das emissões de GEE em comparação com o ano-base de 1990 (UNFCCC, 2015b; UNFCCC, 2016), sendo que, foi na terceira revisão de 2023, que houve um aumento na ambição de redução por parte do continente europeu. Dadas

as aspirações e o histórico da UE, somadas as iniciativas em curso, a exemplo da expansão do EU ETS para outros setores, é de se esperar uma nova revisão de NDC até 2025 com maiores metas de redução de emissões.

No que diz respeito ao planejamento energético e as projeções de consumo de energia na UE, eles são geridos pela Diretoria Geral de Energia (*Directorate General for Energy* - ENER, em inglês), que integra a Comissão Europeia. Esta entidade é responsável pelo desenvolvimento e implementação de políticas que visam assegurar energia segura, sustentável e acessível para cidadãos e empresas.

A Diretoria Geral de Energia da UE coordena as Estratégias Nacionais de Longo Prazo (*National Long-Term Strategies*, em inglês) e os Planos Nacionais de Energia e Clima (*National Energy and Climate Plans* - NECPs, em inglês) (COMISSÃO EUROPEIA, 2023i; COMISSÃO EUROPEIA, 2023j). As Estratégias Nacionais de Longo Prazo devem abranger uma perspectiva de, pelo menos, 30 anos, sendo revistas e atualizadas a cada década. Os NECPs delineiam como os Estados-Membros da UE planejam abordar questões como descarbonização, eficiência energética, segurança energética, o mercado interno de energia e as áreas de pesquisa, inovação e competitividade (COMISSÃO EUROPEIA, 2023i; COMISSÃO EUROPEIA, 2023j).

Os NECPs vigentes de cada Estado-Membro da UE são os planos para o período de 2021-2030, que recentemente passaram por atualizações submetidas em 2023 (COMISSÃO EUROPEIA, 2023j).

3.2.4 A UE frente ao *roadmap* da IEA e a trajetória modelada pelo PCC

No item 3.1.3 deste capítulo, foi apresentado um cenário de referência global para transição energética, o relatório *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector* da IEA, além da trajetória delineada de redução de emissões setoriais pelo IPCC para limitar o aumento de temperatura terrestre em até 1,5°C. Estes documentos elencam os pilares fundamentais para atingir emissões líquidas nulas de carbono no setor energético e na economia de forma geral, que incluem eletrificação, eficiência energética, mudança de comportamento social, energias

renováveis, hidrogênio, bioenergia, e tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

Tanto a Estratégia Nacional de Longo Prazo quanto o Plano Nacional de Energia e Clima da UE apresentam seus pilares de forma sucinta. Nos termos dos próprios documentos, as estratégias centrais são a eficiência energética e a segurança energética, o mercado interno de energia e a pesquisa, inovação e competitividade.

Na EU a NDC adota uma abordagem com propostas setoriais, diferenciando-se assim da NDC do Brasil. Conforme NDC europeia submetida em 2023, as metas estabelecidas são:

- (1) Reduzir em 62% as emissões dos setores abrangidos pelo EU ETS e do setor marítimo até 2030, comparativamente aos níveis de 2005.
- (2) Inclusão de um quadro de precificação de carbono separado para a combustão de combustíveis no transporte rodoviário e em edifícios, além de em setores adicionais para precificar emissões a partir de 2027 sem alocação gratuita, contribuindo para uma redução de 42% das emissões até 2030, em relação aos níveis de 2005, nos setores cobertos.
- (3) No âmbito do Regulamento Revisto sobre a Distribuição de Esforços, a legislação da UE estabelece metas individuais vinculativas e aprimoradas para a redução das emissões de GEE de cada Estado-Membro. Essas metas são aplicáveis aos setores não abrangidos pelo atual EU ETS, incluindo transportes domésticos (exceto aviação), edifícios, agricultura, resíduos e pequenas indústrias. O objetivo global é reduzir as emissões de GEE da UE em 40% até 2030, em comparação com os níveis de 2005.
- (4) No setor Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas, a UE adotou uma meta de remoção líquida de 310 milhões de toneladas de CO₂e de GEE até 2030.
- (5) Relativamente a carros e veículos novos de transporte de cargas pequenos e médios, reduzir as emissões de CO₂ em 55% para carros novos e 50% para furgões novos entre 2030 e 2034, com o objetivo de alcançar uma redução de 100% das emissões de CO₂ a partir de 2035 para estes veículos.
- (6) Redução do consumo final de energia em 11,7% até 2030.

(7) Cada Estado-Membro da UE reduzirá suas emissões em relação aos níveis de 2005 até 2030 (figura 38).

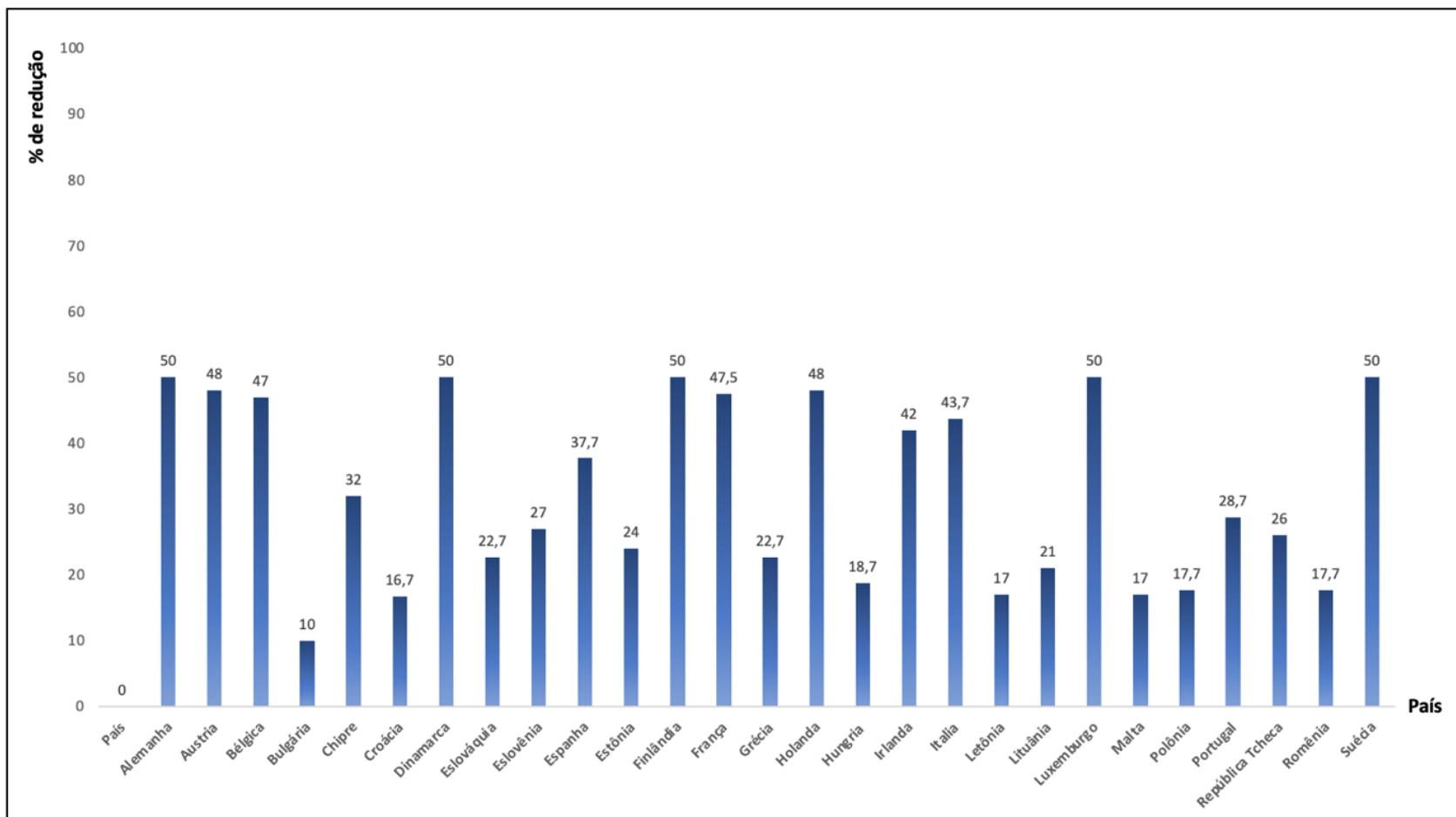


Figura 38 - Metas de redução de emissões dos Estados-Membro da EU
 Fonte: elaboração própria com base nos dados da UNFCCC (2023b)

Já se reconhece a relevância dos marcos da transição energética para alcançar as metas de longo prazo. Os governos, com seus planos energéticos voltados para a neutralidade de carbono, desempenham um papel central no direcionamento dos planejamentos nacionais e subnacionais.

Por isso políticas e medidas mais robustas por parte dos Estados-Membros são essenciais em diversos setores para atingir as metas de clima e energia estabelecidas.

A comparação entre a rota proposta pela IEA e a redução de emissões setoriais apontada pelo IPCC, ilustradas nas figuras 21, 22 e 23 do Item 3.1.3, com a projeção do progresso setorial para 2030 na UE (figura 39) e a trajetória de redução de emissões de CO₂e em um cenário de 1,5 °C na UE (figura 40), revela que os setores de energia, transporte e indústria continuam sendo atores-chave na transição energética, conforme proposto pela IEA e apontado IPCC.

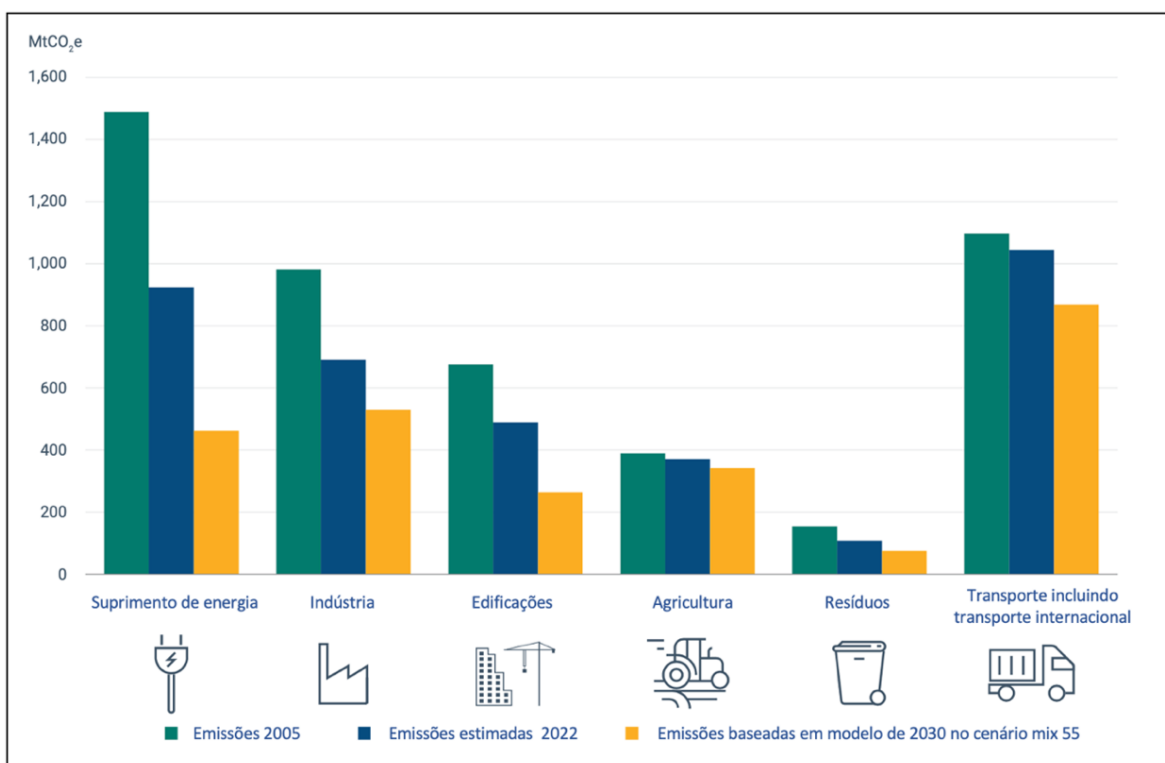


Figura 39 - Projeção de progresso setorial 2030 na UE
 Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2019c)

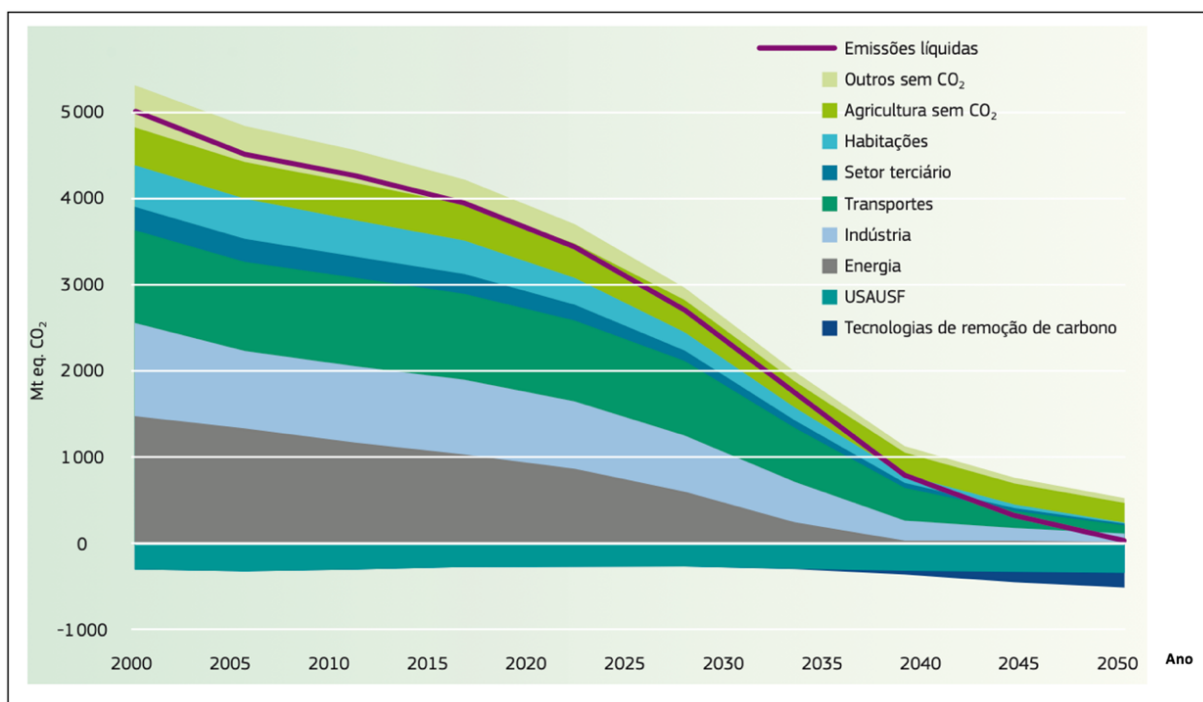


Figura 40 - Trajetória de emissões de CO₂e num cenário de 1,5 °C na EU
 Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2019c)

Atualmente, a infraestrutura energética da UE é predominantemente baseada em combustíveis fósseis. Contudo, todos os cenários projetados apontam para uma transformação significativa até meados deste século em que os países europeus têm estabelecido metas ambiciosas de redução de emissões de GEE com estratégias bem direcionadas em diferentes setores.

Esses movimentos evidenciam que a descarbonização é uma pauta central nas agendas econômica e ambiental da UE, que segue se destacando nos seus resultados e ações para conter o aquecimento global.

Em combate ao maior agente de emissões de GEE na região europeia, a transição energética é um dos pilares dessa mudança, onde a UE tem promovido ativamente a substituição de fontes de energia fóssil por alternativas renováveis. Essa iniciativa, embora tenha encontrado obstáculos como a invasão da Ucrânia pela Rússia, e também seja desafiadora, é viável, considerando avanços tecnológicos e a crescente competitividade econômica das energias renováveis.

3.2.5 Cenários de energias limpas e combustíveis fósseis na UE

Com o intuito de mitigar e minimizar os efeitos adversos das mudanças climáticas, a UE empreende esforços significativos para se posicionar como o primeiro continente a alcançar a neutralidade climática até o ano de 2050 (COMISSÃO EUROPEIA, 2021a).

É importante observar que, após atingir seu ápice em 2006, o consumo de energia na UE já demonstrava uma tendência de declínio antes mesmo do advento da crise financeira global de 2007-2009. Projeta-se que esta diminuição no consumo de energia será temporariamente interrompida no período entre 2020-2025. Este fenômeno é atribuído principalmente à retomada da demanda energética pós-pandemia da Covid-19 (COMISSÃO EUROPEIA, 2021b). A figura 41 ilustra a projeção do consumo final de energia na UE até 2050. Esses dados fornecem uma visão abrangente e quantitativa das tendências de consumo energético na região conforme projeções da Comissão Europeia.

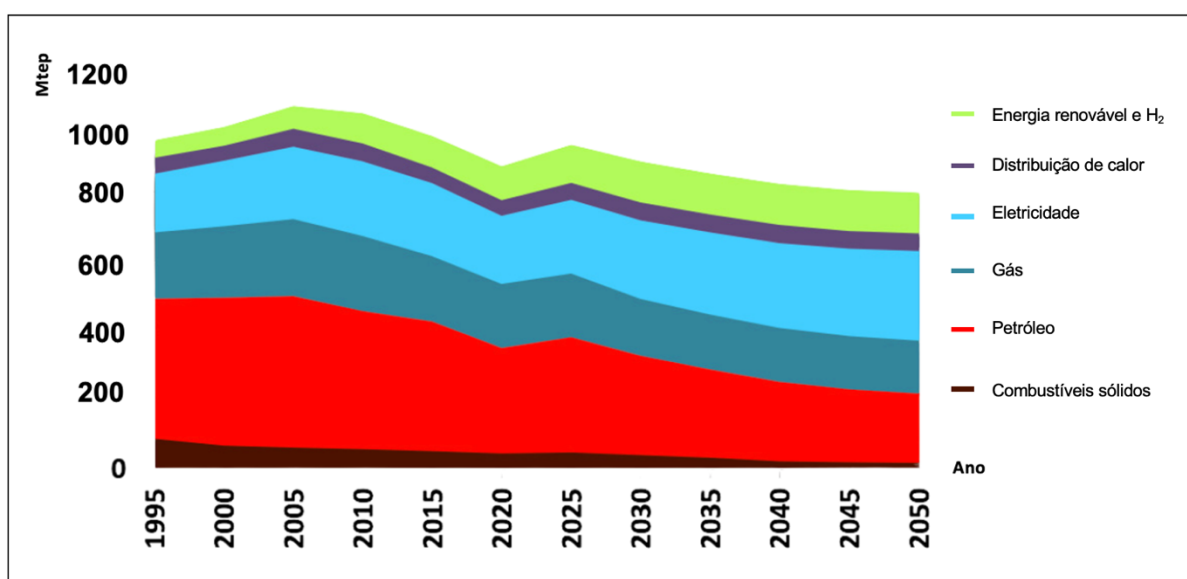


Figura 41 - Consumo de energia final por combustível na UE até 2050
Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2021b)

Observa-se uma tendência de decréscimo no consumo final de petróleo ao longo do tempo, bem como de combustíveis sólidos. Contudo, o petróleo ainda representa uma parcela considerável da demanda total de energia na UE.

Ainda que o continente europeu continue se destacando no cenário de reduções de emissões, a ambiciosa meta de figurar como líder na transição energética pode apresentar um pouco de discrepância quando confrontada com a persistência dos combustíveis fósseis no seu *mix* energético.

A dependência contínua de fontes de energia não-renováveis, conforme indicado pelas projeções da Comissão Europeia, desencadeia uma reflexão crítica sobre a coerência das políticas energéticas europeias, ainda que o histórico de avanços seja favorável.

Esse fato sugere que as atuais políticas, embora progressistas no discurso, podem não ser suficientemente assertivas para contrabalançar os interesses estabelecidos no setor de energia fóssil.

Essa dicotomia revela a complexidade do processo de transição energética; que não se trata apenas de uma mudança tecnológica, mas também social, política e econômica, que requer o enfrentamento de barreiras históricas e a reconfiguração de diversos sistemas que estão conectados.

3.2.6 Potencial das bioenergias na UE

A bioenergia desempenha um papel importante nas metas da UE. No geral, o setor de bioenergia cresceu substancialmente no continente europeu nos últimos anos conforme pode ser visto nas figuras 42 e 43.

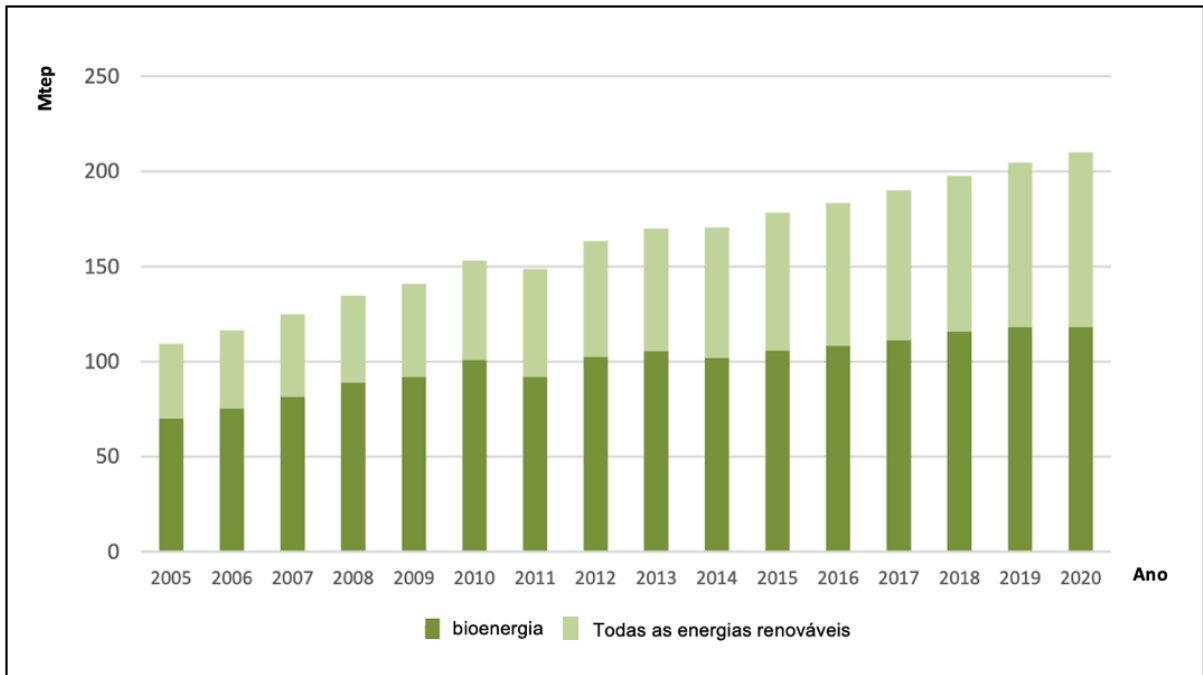


Figura 42 - Bioenergia e energias renováveis produzidas na UE (2005-2020)
 Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2022d)

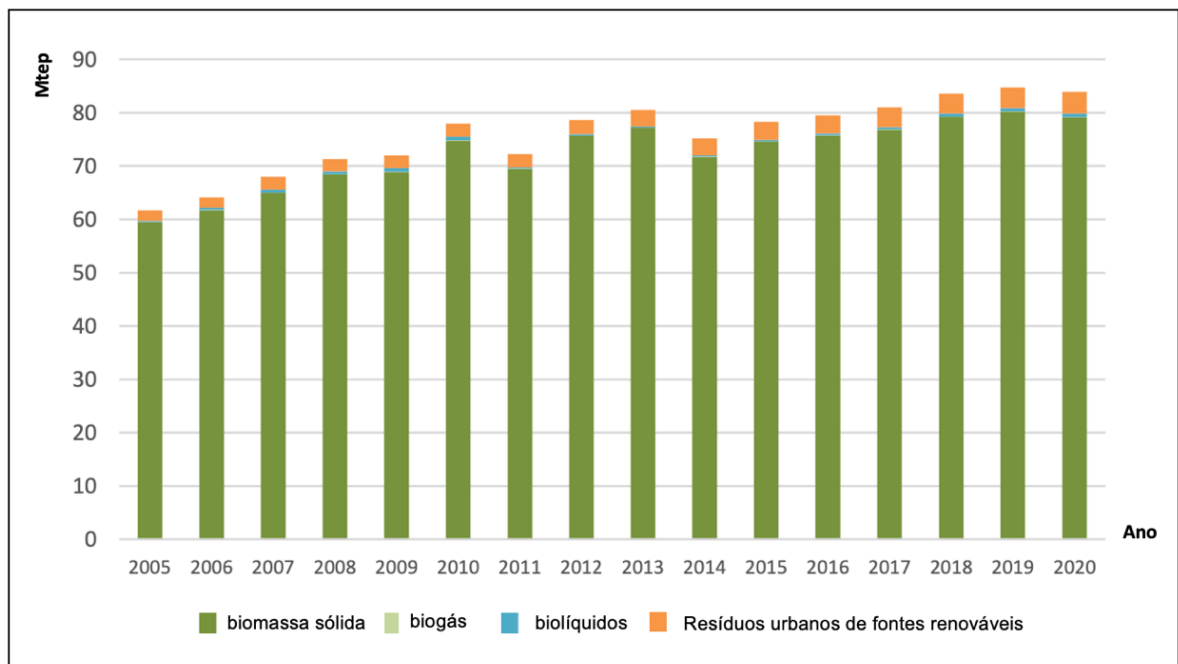


Figura 43 - Evolução da produção de bioenergia na EU a partir de diferentes matérias-primas (2005-2020)
 Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2022d)

A visão de longo prazo da Comissão Europeia para uma economia próspera, moderna, competitiva e neutra em termos de carbono projeta que, até 2050, o consumo bruto interno de bioenergia na UE oscilará entre 170 e 252 Mtep, variando conforme o cenário considerado (COMISSÃO EUROPEIA, 2019d).

De forma resumida, os cenários apresentados pela Comissão Europeia, inseridos no contexto do pacote *Fit for 55*, evidenciam uma tendência de aumento no uso de biomassa no consumo energético. Além disso, estima-se que a participação da biomassa não só cresça em termos percentuais, mas também em valores absolutos: de aproximadamente 150 milhões de toneladas para um pouco mais de 200 milhões de toneladas em média (COMISSÃO EUROPEIA, 2020).

É importante ressaltar que o incremento efetivo no uso de bioenergia está fortemente atrelado ao desenvolvimento de medidas voltadas para a economia de energia, a eficiência energética, a eletrificação e a expansão de outras fontes de energias renováveis. No entanto, em todos os cenários previstos, a Comissão Europeia antecipa um aumento médio de 69% no uso de bioenergia, principalmente para apoiar a descarbonização da indústria pesada, o transporte de longa distância e a geração de emissões negativas (COMISSÃO EUROPEIA, 2020).

A análise dos cenários propostos pela Comissão Europeia, no contexto do pacote *Fit for 55*, evidencia uma política mais ampla de transição energética no continente europeu e que os Estados-Membros também tem clareza quanto da importância da bioenergia na matriz energética como uma alternativa aos combustíveis fósseis.

3.2.7 O potencial da eletrificação no transporte na UE

O setor de transporte é responsável por aproximadamente um quarto das emissões de GEE na UE. Notavelmente as emissões oriundas do transporte têm apresentado um aumento nos últimos anos. Ademais, projeta-se um crescimento significativo nas necessidades de transporte na Europa até o ano de 2050 (ETIPWIND, 2020).

Dentro deste contexto, o transporte rodoviário destaca-se como o maior emissor, sendo responsável por três quartos das emissões de CO₂ e do consumo

de energia do setor de transporte da UE. Dessa forma, a eletrificação dos veículos, é uma estratégia mais eficaz para reduzir essas emissões. Além disso, a eletrificação contribui para a diminuição da demanda de energia primária e para a redução da dependência da UE em relação às importações de combustíveis fósseis (ETIPWIND, 2020).

Até 2050, espera-se que toda a frota de veículos de passageiros na UE seja alimentada por eletricidade, seja diretamente ou indiretamente, uma trajetória que se alinha ao *roadmap* da IEA.

Tal qual no Brasil e no mundo, em 2023, a eletromobilidade teve um destaque com quebra de recorde na UE. Foi observado, neste ano, um aumento nas vendas de veículos eletrificados de 2.7 milhões em 2022 para 3.4 milhões durante os primeiros quatro meses de 2023 (figura 44).

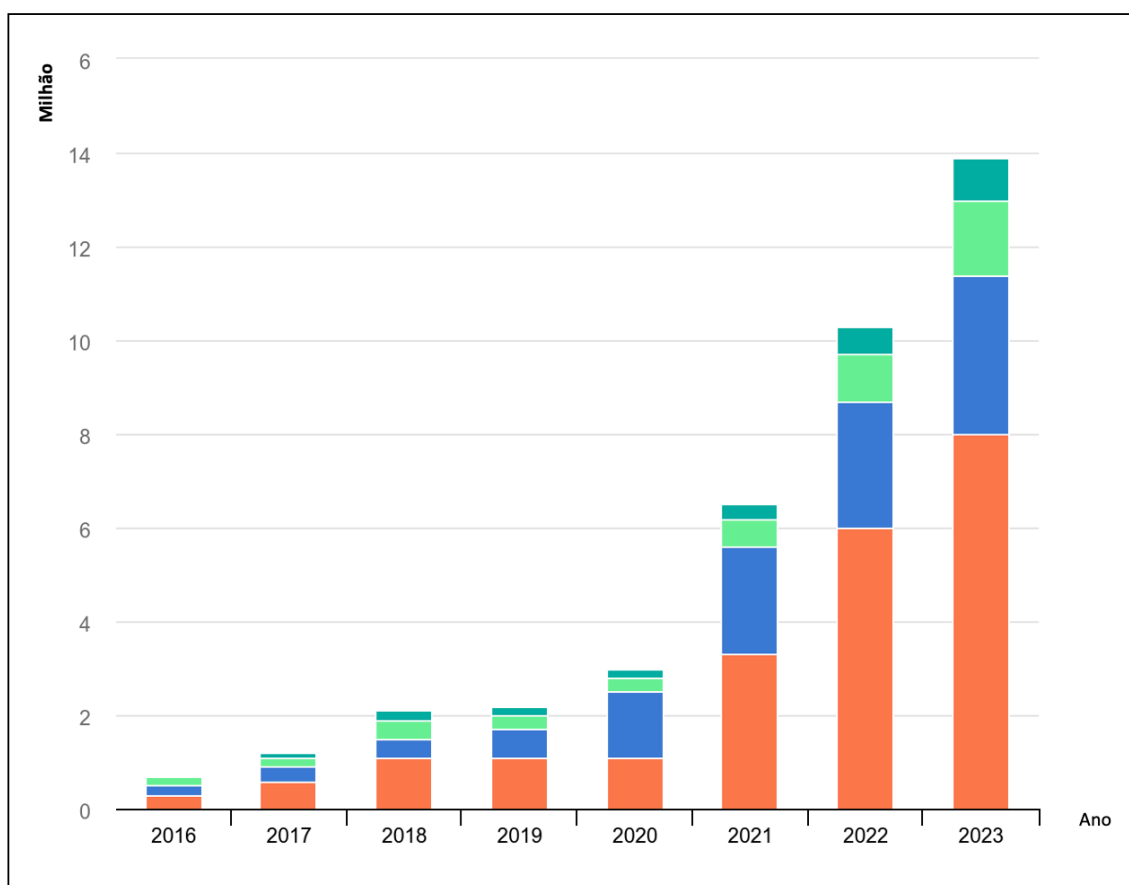


Figura 44 - Venda de veículos elétricos (2016-2023*)

*Primeiro quadrimestre

Fonte: IEA (2023d)

A UE reconhece o papel do setor de transportes nas emissões de GEE, por isso está buscando alcançar uma redução nas emissões relacionadas ao transporte até 2050, onde a crescente onda de aquisições de veículos elétricos está atuando como uma das peças da estratégia da transição energética europeia.

A transição para a eletrificação do setor de transporte, então, segue se consolidando como um dos pilares para mitigar as mudanças climáticas e atingir os objetivos de neutralidade climática europeia. Portanto, a transição para veículos elétricos não é apenas preferível, mas essencial.

Mas ainda que os números sejam expressivos, tal qual no Brasil, porém em menor proporção, o potencial da eletrificação dos transportes encontra alguns desafios. Esforços adicionais são necessários para alcançar uma transição plena para a eletrificação do setor de transporte. O que significa adotar uma abordagem holística que inclua não apenas regulamentações já existentes na UE, mas também incentivos para fabricantes e consumidores, investimentos em infraestrutura de carregamento e políticas que promovam a sustentabilidade em todo o ciclo de vida dos veículos.

3.3 APRENDIZADOS E PONTOS DE ATENÇÃO PARA O BRASIL

A experiência internacional da UE demonstra que mercados de carbono bem regulados e estruturados podem incentivar a inovação tecnológica e facilitar a transição para economias de baixo carbono vistos resultados comprovados de emissões de CO₂e dentro do EU ETS.

Para o Brasil, adaptar-se a tendência de precificação de carbono não representa apenas uma resposta às necessidades ambientais, mas também adequação a um novo cenário de modelo econômico frente à demanda crescente por práticas sustentáveis nas cadeias de valor globais.

Ao olhar para o exemplo da UE, líder em políticas de precificação de carbono, o Brasil pode aprender sobre a importância de um SCE bem projetado, que incentive reduções eficazes de emissões enquanto promovem a inovação tecnológica, inclusive por aportes financeiros oriundo do SCE.

Todavia, um ponto de atenção é que as políticas de precificação de carbono podem implicar no realocamento fiscal do ônus do carbono entre diferentes instrumentos fiscais (impostos e taxas), em vez de promover uma mudança efetiva em seu preço total. Sendo assim, desconsiderar práticas de precificação indireta pode levar a uma avaliação distorcida dos efeitos de um preço direto do carbono sobre a economia quando se leva em consideração introduzir impostos sobre carbono e, simultaneamente, reduzir impostos sobre combustíveis, por exemplo.

Neste sentido, é importante que as regulamentações brasileiras andem em harmonia para assegurar que a precificação de carbono represente uma verdadeira alteração no custo total, e não apenas uma mudança fiscal neutra.

Além disso, ao abordar a implementação da precificação de carbono, é importante conhecer potenciais consequências e impactos distributivos que tais políticas acarretam. O estabelecimento dos preços do carbono é resultante de uma intrincada combinação de políticas energéticas e iniciativas complementares direcionadas à mitigação das emissões CO₂. Isso implica que o valor atribuído ao carbono pode não se alinhar necessariamente com os custos marginais associados à sua redução. Em outras palavras, o preço fixado pode não refletir com precisão o custo efetivo para diminuir uma dada unidade de emissão de carbono.

Quanto aos impactos distributivos, por exemplo, podem resultar em efeitos adversos, como a sobrecarga econômica em outras camadas da sociedade que podem enfrentar aumentos desproporcionais nos custos de energia e bens de consumo.

Com tudo isso, a precificação do carbono demanda um equilíbrio delicado, que reconheça os custos e benefícios associados à redução das emissões de carbono, ao mesmo tempo em que se atenta para sua justiça distributiva.

No Brasil, a transição para uma economia resiliente e de baixo carbono encontra diversos desafios, incluindo políticas setoriais que distorcem incentivos (por exemplo, nas áreas de agricultura, uso da terra e energia), a falta de regulamentações importantes (como as relativas à eletromobilidade) e o desafio de avanço de ações.

Outro aprendizado importante é que o Brasil também deve considerar a importância de mecanismos de ajuste de carbono nas fronteiras para proteger a

competitividade de suas indústrias em um cenário de precificação de carbono globalmente assimétrico. Esses mecanismos podem ajudar a evitar não só a fuga de carbono, mas também competição desleal de mercado por economias sem restrições de emissões.

A precificação de carbono é um meio e não o fim. Isso implica que a integração de políticas de precificação de carbono com outras medidas de políticas públicas, como subsídios para energias renováveis, eficiência energética e a promoção de tecnologias de baixo carbono, é essencial.

Todo o processo de transição energética e redução das emissões de CO₂ apresenta-se como um desafio complexo e multifacetado, especialmente para países com um perfil de emissões desafiador como o Brasil.

No Brasil, o setor energético, embora beneficiado por uma matriz relativamente limpa com predominância de energia hidrelétrica, enfrenta seus próprios desafios na busca por uma transição energética sustentável. O país ainda apresenta uma dependência significativa de fontes fósseis em determinados segmentos, além de um potencial que ainda precisa ser melhor explorado quando se trata de fontes renováveis não hídricas.

A experiência da UE nesse contexto fornece um modelo referencial marcado por um conjunto de políticas e iniciativas estratégicas voltadas à mitigação climática e à sustentabilidade climática e energética.

O compromisso com a eficiência energética e a expansão das fontes renováveis de energia, com metas setoriais bem definidas, estão no cerne das estratégias europeias.

Para avançar na transição energética, o Brasil deve buscar uma diversificação maior de sua matriz energética, explorando seu potencial para energia solar, eólica e biomassa. Essas medidas não apenas promovem a adoção de energias limpas, como também podem contribuir para a geração de empregos e para o desenvolvimento econômico sustentável.

A implementação e o fortalecimento de normas de eficiência energética representam outra frente crucial para a redução do consumo energético e das emissões de GEE. A experiência europeia ressalta a eficácia de regulamentações rigorosas aplicadas a edifícios, indústrias e veículos, incentivando a modernização

das infraestruturas e a adoção de tecnologias mais eficientes. Para o Brasil, tais medidas exigem uma abordagem coordenada que envolva todos os setores da economia, assegurando que a eficiência energética se torne um pilar central da política energética nacional.

Inspirar-se no modelo do Sistema de Comércio de Emissões (ETS) da UE pode oferecer ao Brasil uma ferramenta poderosa para incentivar a redução de emissões no setor energético. A criação de um mercado de carbono nacional, adequado às especificidades do Brasil, incentivaria as empresas a investir em tecnologias limpas e eficientes, estabelecendo um mecanismo de precificação do carbono que reflita os custos ambientais das emissões de GEE.

A transição energética no Brasil, embora repleta de desafios, apresenta um vasto campo de oportunidades para o país alinhar sua matriz energética com os objetivos globais de sustentabilidade e redução de emissões

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia constitui um pilar essencial para o avanço das sociedades. Contudo, a dependência dos combustíveis fósseis transformou o setor energético no principal emissor de gases de efeito estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO₂), responsável por aproximadamente três quartos das emissões globais.

O uso excessivo e a queima histórica de combustíveis fósseis, juntamente com a crescente e contínua emissão de CO₂ na atmosfera, intensificaram o aquecimento global, tornando as mudanças climáticas um dos maiores desafios ambientais e sociais da atualidade.

As emissões de CO₂ relacionadas à energia aumentaram nos últimos anos; em 2023, houve um aumento de 1,1% em relação a 2022, estabelecendo um novo recorde de 37,4 Gt de CO₂.

No Brasil, o setor de energia é um dos que apresentam maior crescimento das emissões, com um aumento de 114% entre 1990 e 2019. Ademais, no ano de 2020, foram emitidas 393,7 milhões de toneladas de CO₂e, o que representa 23,2% do total das emissões no país. Cabe destacar que o Brasil tem um cenário distinto do restante do mundo, onde as maiores emissões de CO₂e são tem origem no uso e ocupação do solo, o que inclui atividades de desmatamento.

No cenário europeu, por outro lado, o setor de energia corresponde ao maior contribuinte das emissões de CO₂e tendo representado 79,2% das emissões em 2020. No entanto, em um cenário distinto do Brasil, foram evidenciadas reduções das emissões no setor de energia em cerca de 31% entre 1990 e 2020.

Organismos internacionais e a comunidade científica têm alertado constantemente sobre os riscos reais e potenciais que as mudanças climáticas representam para as pessoas e diferentes ecossistemas. A Agência Internacional de Energia (IEA), por exemplo, alertou que o pico das emissões de GEE ocorrerá em meados desta década, enquanto o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destacou que, considerando o cenário das políticas atuais, é provável que o aquecimento global ultrapasse o limite de 1,5°C durante o século XXI, aumentando o desafio de mantê-lo abaixo de 2°C.

Esses riscos globais promovem discussões em amplos aspectos sobre as mudanças climáticas e a transição energética, que estão intrinsecamente ligadas a uma reconfiguração geopolítica no século XXI, pois a governança energética e climática, bem como políticas reguladoras dos países desempenham um papel central para mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

No âmbito regulatório, a precificação do carbono surge como uma medida efetiva, incentivando a redução das emissões de CO₂, bem como o investimento em tecnologias limpas. Cabe destacar que atribuir um preço ao carbono emitido é uma ação relevante, mas não é a principal medida, ou seja, ela deve ser complementar à transição energética.

No que diz respeito ao cenário da transição energética, o Brasil já possui uma matriz energética notável pela grande participação de fontes renováveis, que representaram cerca de 47,5% da oferta interna no país em 2022, sendo a renovabilidade das fontes três vezes superior à média global. Além disso, a geração de energia elétrica brasileira conta com uma matriz predominantemente limpa, com expressiva participação hidráulica.

Outros destaques são o panorama e a projeção das energias renováveis no Brasil que, colocam o país em uma posição de vantagem, oferecendo a oportunidade de liderar a transição energética global e se destacar como um provedor mundial de bioenergias, dada sua capacidade de produção.

A projeção 2020-2032 indica um aumento 4,1 % ao ano na produção de etanol de cana-de-açúcar e de milho, passando de 31 para 47 bilhões de litros, além do aumento no potencial de produção de biogás de biomassa residual de cana-de-açúcar, também no período 2020-2033, de 27 para 35 bilhões de Nm³.

Em relação à eletrificação, apesar de o Brasil não ter a mesma ordem de grandeza de compras de nações como China e a UE, as aquisições de veículos elétricos cresceram de forma a superar todas as expectativas, com um aumento de 91% em 2023 em comparação a 2022, atingindo a venda de 93.927 veículos elétricos nacionalmente.

Embora o potencial de energias renováveis no Brasil seja favorável, é necessário superar críticas ao modelo de gestão da matriz energética brasileira e aos investimentos previstos até 2032 no parque de refino nacional de petróleo. Além

disso, na COP28, o Brasil também foi criticado por sua adesão à Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), o que conflita com o compromisso assumido durante a COP de triplicar as energias renováveis até 2030.

Outro ponto de críticas se refere à tendência de regressão nas ambições de reduções de emissões de GEE nas revisões das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) desde 2020.

As revisões posteriores à NDC original de 2016, estabeleceram metas para 2025 que trouxeram uma diminuição absoluta na emissão de CO₂e significativamente menor, reduzindo a meta de 1,79 Gt em 2020 para 1,32 Gt em 2023. Da mesma forma, a meta estabelecida para 2030 demonstra um declínio considerável, partindo de 1,62 Gt em 2020 para 1,20 Gt em 2023.

O Brasil também enfrenta o desafio de implementar um sistema eficaz de precificação de carbono que contribua para o cumprimento de suas metas de NDC. Embora o país ainda não disponha de um mercado de carbono regulado, progressos significativos foram observados em 2023 na direção da criação de tal mercado, com esforços voltados para a implementação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) seguindo o modelo de Sistema de Comércio de Emissões (SCE).

Na trajetória para regulamentar o SBCE, outros desafios surgiram, como a exclusão do agronegócio dos limites de emissão, que causou intensos debates, e a definição do que constitui uma “fonte de emissão”, que ainda gera dúvidas. Além disso, as propostas de criação de créditos de carbono no mercado regulado, por meio da Cota Brasileira de Emissões (CBE), e no mercado voluntário, através do Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE), trouxeram pontos controversos junto à Comissão de Valores Mobiliários (CVM).

Enquanto o Brasil ainda não se destacou com reduções progressivas de CO₂ no setor energético ou no uso e ocupação do solo na abordagem da governança de carbono, a UE já demonstra liderança na transição energética, com uma tendência decrescente no consumo de energias não renováveis, apesar de ainda apresentar uma matriz energética majoritariamente fóssil, com participação de 17,4% de energias renováveis em 2020, principalmente devido à sua carência de recursos energéticos próprios.

A UE tem se destacado no cenário da transição energética não só pelos resultados na redução de emissões de CO₂, mas também por demonstrar um compromisso firme com a transição energética, reduzindo tanto a oferta interna quanto a importação de petróleo e derivados de petróleo entre 2000 e 2020 de 44,6 para 21,3 Mtep e 578,5 para 461,5 Mtep respectivamente.

O ponto relevante é crescimento da produção de bioenergia na UE, de pouco mais de 60 Mtep em 2005 para cerca de 80 Mtep, além de quase duplicar sua soma de bioenergia e todas as energias renováveis produzidas entre 2005 e 2020, atingindo mais de 200 Mtep neste último ano.

A eletrificação do transporte na UE segue uma trajetória exponencial, com as vendas de veículos que ultrapassaram o triplo entre 2021 e 2023, atingindo quase quatorze milhões de veículos apenas no primeiro quadrimestre de 2023.

Apesar da matriz energética predominantemente fóssil, a UE avança com sucesso na descarbonização de sua economia com políticas ambientais cada vez mais restritivas, com um SCE, o *EU Emission Trading System* (EU ETS), que registrou uma redução de 32% nas emissões de CO₂e desde a sua implantação em 2005 e uma NDC, cuja revisão atual prevê uma redução de, no mínimo, 55% até 2030, sem histórico de retrocessos, além de outras ações direcionadas.

Os avanços do cenário regulatório da UE também contemplam progressos no EU ETS, incluindo em 2024 emissões do setor marítimo e em 2027 um novo sistema para edificações, transporte rodoviário e indústria de pequeno porte; isso permitirá uma ampliação da cobertura de 40% para 75% das emissões de GEE na UE.

Das discussões legislativas em avanço, se destaca o pacote legislativo *Fit for 55*, onde uma das ações de maior repercussão global foi a proposta do Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (CBAM) para tributar bens especificados importados para a UE de países não-membros, visando mitigar a fuga de carbono impondo custos adicionais aos bens exportados para a UE de países com legislações menos restritivas.

Enquanto o Brasil avança na discussão sobre a precificação do carbono, observar os progressos e os desafios enfrentados por outras regiões, como a UE, pode oferecer *insights* valiosos para o desenvolvimento de um mercado de carbono

nacional eficiente, que fomente a inovação tecnológica e reduza as emissões CO₂ de forma significativa.

É crucial, também, para o Brasil reconhecer os desafios associados à precificação do carbono, especialmente no que tange aos impactos distributivos e à necessidade de ajustes fiscais que reflitam uma real alteração no custo das emissões.

A experiência da UE também sublinha a importância de precificar o carbono como uma medida secundária e complementar, em meio à implementação de diversas regulamentações rigorosas. Essas medidas, se integradas, podem posicionar o Brasil como um dos líderes na transição para uma economia de baixo carbono. Ademais, o Brasil deve explorar plenamente seu potencial de vastas áreas propícias para a geração de energia solar e eólica, além do uso da biomassa.

Embora o país possua muitas particularidades e enfrente barreiras de governança e econômicas que tornam as mudanças mais lentas, é crucial não se perder diante do grande potencial de renovabilidade das fontes que já possui.

A descarbonização do setor energético brasileiro trará a neutralidade climática esperada para o Brasil somente se o país encontrar uma solução efetiva que atue na causa raiz de suas maiores emissões de CO₂e, o uso e a ocupação do solo. Descarbonizar o setor energético brasileiro é um fator secundário, mas ainda assim significativo por corresponder a um quarto das emissões brasileiras.

4.1 LIMITAÇÕES

Uma das principais limitações identificadas esteve relacionada à coleta e disponibilidade de dados. A heterogeneidade nas bases de dados sobre emissões de GEE, CO₂ e CO₂e representou um desafio considerável, especialmente devido às diferenças nos mecanismos de apresentação das informações. Essa variação demandou um esforço significativo para padronizar as informações necessárias.

A generalização dos dados também se mostrou uma limitação, pois os resultados obtidos refletem as políticas em vigor durante o período de estudo. Consequentemente, não é possível afirmar com certeza o nível de resistência

política à implementação da precificação do carbono em diferentes regiões, considerando os variados contextos sociais e econômicos.

Especificamente no que tange aos artigos acadêmicos sobre o mercado de carbono, observa-se que a grande maioria das publicações se origina de pesquisas na área de Economia. Isso pode restringir a compreensão para outros grupos de estudantes e influenciar na interpretação dos conceitos.

Além disso, dada a vastidão territorial do Brasil e a falta de integração entre as bases governamentais estaduais, outra limitação encontrada foi a dificuldade em avaliar os diferentes estágios de progresso na transição para uma economia de baixo carbono entre os estados.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos sobre os impactos econômicos de mercados regulados de carbono nas produções de diversos setores, no emprego e na inflação de bens e serviços integrados à cadeia do setor de energia no Brasil. Esse enfoque permitiria uma compreensão mais ampla das consequências econômicas da implementação de políticas de precificação de carbono, bem como de suas implicações para a competitividade e sustentabilidade dos setores envolvidos.

Além disso, recomenda-se expandir a pesquisa para abranger outras regiões que possuam mercados regulados de carbono estabelecidos em distintos contextos geográficos e econômicos. Isso contribuiria para enriquecer o entendimento sobre a aceitação e a eficácia do mercado de carbono na redução de emissões de CO₂, oferecendo *insights* valiosos sobre como diferentes estratégias de implementação e adaptação podem influenciar os resultados em termos de mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, seria relevante avaliar o papel das políticas complementares, como incentivos à inovação tecnológica e ao desenvolvimento de fontes de energia renovável, na promoção de uma transição energética.

REFERÊNCIAS

ABC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. “Na COP28, mundo parece não ter compreendido o perigo”, diz Carlos Nobre. Rio de Janeiro, RJ, 2024. Disponível em: <https://www.abc.org.br/2023/12/15/na-cop-28-mundo-parece-nao-ter-compreendido-o-perigo-diz-carlos-nobre/>. Acesso em: 08 jan. 2024.

ABVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Em ano de recordes, veículos *plug-ing* avançam. São Paulo, SP, 2023. Disponível em: <http://www.abve.org.br/em-ano-de-recordes-veiculos-plug-in-ganham-mercado/>. Acesso em: 31 mar. 2024.

ALMEIDA, J. R. *et al.* Energia e Sustentabilidade. **Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente: Avanços, Retrocessos e Novas Perspectivas**. 2022. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/livros/livro-sociedade-tecnologia-e-meio-ambiente-avancos-retrocessos-e-novas-perspectivas-vol2>. Acesso em: 02 ago. 2023.

AMAR, B. *et al.* Climate change exposure and internal carbon pricing adoption. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 7, p. 2854-2870, mar. 2022.

ANTJE, K. *et al.* Calling energy inequalities into the transition agenda. **Energy Research and Social Science**, v. 101, mai. 2023.

ARAUJO, I. L.; COSTA, M, H. K; MAKUCH, Z. Mudanças climáticas e a contribuição da tecnologia de CCS para os desafios da mitigação do clima. **Ambiente e Sociedade**, v. 25, p. 1-21, jul. 2025.

ARRUDA, H. B. O. Mapeamento das Emissões de Gases de Efeito Estufa em uma Empresa do Setor Energético. **Conexões, Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 3, p. 108-118, jul. 2018.

BANCO MUNDIAL. **Data bank**. CO₂ emissions (metric tons per capita). 2023a. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>. Acesso em: 27 set. 2023. Base de dados.

BANCO MUNDIAL. Carbon Pricing Dashboard. 2023b. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>. Acesso em: 29 out. 2023.

BANCO MUNDIAL. Measuring Total Carbon Pricing. 2023c. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099548206152339098/pdf/IDU124d2b624145531468a1a4d418173bf51a4fd.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2023.

BANCO MUNDIAL. Relatório sobre clima e desenvolvimento para o país 2023. 2023d. Disponível em: <https://www.worldbank.org/pt/country/brazil/brief/brasil-ccdr>. Acesso em: 19 dez. 2023.

BANCO MUNDIAL. GDP (current US\$). 2024. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=EU-DE-AT-BE-BG-CY-HR-DK-SK-SI-ES-EE-FI-FR-GR-NL-HU-IE-IT-LV-LT-LU-MT-PL-PT-CZ-SE-RO>. Acesso em: 28 mar. 2024.

BARBADO; N.; LEAL; A, C. Cooperação global sobre mudanças climáticas e a implementação do ODS 6 no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e29110313290, mar. 2021.

BICHARA, J, P.; OLIVEIRA, G. C. A inaplicação da contribuição nacionalmente determinada brasileira: uma análise sobre o caminho percorrido pelo Brasil nas ações climáticas mundiais. **Revista FIDES**, v. 14, n. 1, p. 77-100, jun. 2023.

BITTENCOURT, S. R. M.; BUSCH, S. E.; CRUZ, M. R. O mecanismo e desenvolvimento limpo no Brasil. Legado do MDL: impactos e lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil como subsídios para novos mecanismos. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9474>. Acesso em: 11 dez. 2023.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Painel NDC - nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil. Rio de Janeiro, RJ. 2023. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-emitidas#:~:text=%C3%9Altima%20atualiza%C3%A7%C3%A3o%3A%2017.11.2023.&text=*Emiss%C3%B5es%20que%20ser%C3%A3o%20emitidas%20ou,leil%C3%B5es%20aconteceram%20no%20mesmo%20per%C3%Adodo. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 109, 29 dez. 2009.

BORGES, F, Q; RODRIGUES, J, L; COSTA, B, L. Desenvolvimento local sustentável: um diagnóstico das estratégias de geração de eletricidade na Alemanha, **Revista DELOS**, v. 14, n. 38, p. 30-41, jun. 2021.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil. 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1029046-camara-aprova-projeto-que-regulamenta-o-mercado-de-carbono-no-brasil-acompanhe/>. Acesso em: 02 jan. 2024.

CAPTUREMAP. 8 key learnings from the latest EU ETS emission data for 2022 2023. Disponível em: <https://www.capturemap.no/key-learnings-from-the-latest-eu-ets-emission-data-for-2022/>. Acesso em: 14 jan. 2024.

CEBDS - CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Navegando por cenários de precificação de carbono. Guia prático sobre seus diferentes mecanismos, aplicações e ferramentas para adaptar a estratégia de negócio. 2015. Disponível em: https://www.carlupe.com/wp-content/uploads/2017/03/CDP_Cebds_Guia_precificacao_carbono.pdf. Acesso em: 22 out. 2023.

CEBDS - CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Precificação de Carbono: o que o setor empresarial precisa saber para se posicionar. 2016. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/precificacao-de-carbono-o-que-o-setor-empresarial-precisa-saber-para-se-posicionar/>. Acesso em: 21 out. 2023.

CEBDS - CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Precificação de Carbono - O que você precisa saber. 2018. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/precificacao-de-carbono-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 21 out. 2023.

CEBDS - CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Mercado de carbono – Guia CEBDS. 2021a. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/mercado-de-carbono-guia-cebds/>. Acesso em: 21 out. 2023.

CHIQUETE, H. S. E. *et al.* Potencial de oferta do hidrogênio como vetor energético no Brasil com base na análise da técnica de dinâmica de sistemas. *In: SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL*, 15., 2023, Santa Maria. **Anais** [...]. Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30581>. Acesso em: 13 dez. 2023.

CHOVANCOVÁ, J.; TEJ, J. Decoupling economic growth from greenhouse gas emissions: the case of the energy sector in V4 countries, *Equilibrium. Quarterly Journal of Eco- nomics and Economic Policy*, v. 15, n. 2, p. 235–251, jun. 2020.

CLIMATE WATCH. GHG emissions. 2023. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/countries/EUU?end_year=2020&filter=2216&source=Climate%20Watch&start_year=1990. Acesso em: 21 out. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. EU ETS Handbook. 2015. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-03/ets_handbook_en.pdf. Acesso em: 30 jan. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho europeu, ao conselho, ao comitê econômico e social europeu, ao comitê das regiões e ao banco europeu de investimento. 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773>. Acesso em: 02 set. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. Atingir a neutralidade climática até 2050. Visão estratégica a longo prazo para uma economia da União Europeia próspera, moderna, competitiva e com impacto neutro no clima. 2019a. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-pt/format-PDF>. Acesso em: 02 set. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. European Commission, Directorate-General for Climate Action, Going climate-neutral by 2050 – A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy. 2019b. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1>. Acesso em: 23 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Atingir a neutralidade climática até 2050. Visão estratégica a longo prazo para uma economia da União Europeia próspera, moderna, competitiva e com um impacto neutro no clima. 2019c. Disponível em: <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1>. Acesso em: 23 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Brief on biomass for energy in the European Union. 2019d. Disponível em: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109354/biomass_4_energy_brief_online_1.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people SWD/2020/176 final. 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020SC0176>. Acesso em: 23 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy – Modelling needs to integrate all three aspects of sustainability. 2021a. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124579>. Acesso em: 23 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. EU Reference Scenario 2020. Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050. 2021b. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-219903975>. Acesso em: 23 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Clean Energy Technology Observatory: Bioenergy in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. 2022d. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130730>. Acesso em: 25 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Energy in figures. Statistical Pocketbook. 2022d. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/eu-energy-statistical-pocketbook-and-country-datasheets_en. Acesso em: 02 set. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. Key figures on Europe – 2023 edition. 2023a. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-key-figures/w/ks-ei-23-001>. Acesso em: 02 set. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. Shedding light on energy – 2023 edition. 2023b. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2023#types-energy-consumed>. Acesso em: 02 set. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. GHG emissions of all world countries. 2023c. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0cde0e23-5057-11ee-9220-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-294885178>. Acesso em: 21 out. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. EU carbon market continues to deliver emission reductions. 2023e. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/eu-carbon-market-continues-deliver-emission-reductions-2023-10-31_en. Acesso em: 13 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. 'Fit for 55': Council adopts key pieces of legislation delivering on 2030 climate targets. 2023f. Disponível em: https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/?utm_source=dsms-auto&utm_medium=email&utm_campaign=%27Fit+for+55%27%3a+Council+adopts+key+pieces+of+legislation+delivering+on+2030+climate+targets. Acesso em: 14 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Fit for 55: Delivering on the proposals. 2023g. Disponível em: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en. Acesso em: 14 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Progress Report 2023 Shifting gears: Increasing the pace of progress towards a green and prosperous future Climate Action. 2023h. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/system/files/202311/com_2023_653_glossy_en_0.pdf. Acesso em: 14 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. National long-term strategies EU countries' long-term strategies to meet their Paris Agreement commitments and the energy union objectives. 2023i. Disponível em: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-long-term-strategies_en. Acesso em: 14 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. National energy and climate plans EU countries' 10-year national energy and climate plans for 2021-2030. 2023j. Disponível em: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en. Acesso em: 14 jan. 2024.

COUTINHO, I.; DIAS, N. Transição energética e grandes empresas de petróleo: o protagonismo das europeias na entrada no setor de renováveis. **Revista Conjuntura Global**, v. 11, n. especial, p. 21-39, 2022.

CRUZ, P. M.; DANIELI, J. A.C.; SOUZA, M. V. A. Perspectiva transnacional da sustentabilidade e a nova matriz energética global. **Revista de Ciências Jurídicas**, v. 28, n. 1, p. 1-14, jan. 2023.

DELGADO, F. FILGUEIRAS, R. A crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética brasileira. 2022. Disponível em: https://ibre.fgv.br/sites/ibre.fgv.br/files/arquivos/u65/04ce2022_fernanda_delgado.pdf. Acesso em 29 ago. 2023.

DUARTE, B. B.; TUPIASSU, L.; NOBRE, S. O mercado de carbono na política de mitigação das mudanças climáticas. **Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo**, v. 6, n. 2, p. 93-108, dez. 2020.

EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Greenhouse gas emissions under the EU Emissions Trading System. 2023a. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-under-the>. Acesso em: 13 jan. 2024.

EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Greenhouse gas emissions under the EU Emissions Trading System. 2023b. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-under-the>. Acesso em: 13 jan. 2024.

EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Trends and projections in Europe 2023. 2023c. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2023>. Acesso em: 13 jan. 2024.

EPA IE - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY IRELAND. EU Carbon Border Adjustment Mechanism. 2023. Disponível em: <https://www.epa.ie/our-services/licensing/climate-change/eu-carbon-border-adjustment-mechanism/>. Acesso em: 15 jan. 2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Precificação de carbono: riscos e oportunidades para o Brasil. 2020a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-549/NT%20EPE-DEA-GAB-014-2020%20-%20Precifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20C_final_05012021.pdf. Acesso em: 29 ago. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. PNE 2050. Plano Nacional de energia. 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 19 dez. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica. Energia e Meio Ambiente - Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2032. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>. Acesso em 19 dez. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional. Ano base 2022. 2023a Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em 30 ago. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil. 2023b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-726/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital_.pdf. Acesso em: 30 ago. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia. 2023c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>. Acesso em: 27 dez. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Abastecimento de derivados de petróleo. 2023f. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE%202032_Caderno%20de%20Abastecimento%20de%20Derivados_2022-12-26.pdf. Acesso em: 04 jan. 2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Oferta de Biocombustíveis. 2023g. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>. Acesso em: 04 jan. 2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Eletromobilidade. 2023h. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Eletromobilidade_PDE%202032_rev2.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

ENERGY INSTITUTE. Statistical Review of World Energy. 2023. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 19 out. 2023.

ENERGY TRANSITION COMMISSION. Mind the Gap: How Carbon Dioxide Removals Must Complement Deep Decarbonisation to Keep 1.5°C Alive. 2023. Disponível em: <https://www.energy-transitions.org/publications/mind-the-gap-cdr/>. Acesso em 03 jul. 2023.

ESCADA, A, B.; ANDRADE, D, C. (Des)Caminhos do setor elétrico no Brasil e a mudança global do clima. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 36, n. 1, p. 43-61, nov. 2023.

ETIPWIND - EUROPEAN TECHNOLOGY & INNOVATION PLATFORM ON WIND ENERGY. Getting fit for 55 and set for 2050. 2021. Disponível em: <https://etipwind.eu/publications/getting-fit-for-55/>. Acesso em: 25 jan. 2024.

EUROPEAN CENTRAL BANK. The role of speculation during the recent increase in EU emissions allowance prices. 2022. Disponível em: https://www.ecb.europa.eu/pub/economic-bulletin/focus/2022/html/ecb.ebbox202203_06~ca1e9ea13e.en.html. Acesso em 13 jan. 2024.

EUROSTAT. Archive: EU energy mix and import dependency. 2023a. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:EU_energy_mix_and_import_dependency. Acesso em: 20 out. 2023.

EUROSTAT. Energy Dashboard. 2023b. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_dashboard/endash.html?geo=EU27_2020&year=2021&language=EN&detail=1&nrg_bal=&unit=MTOE&chart=chart_one,chart_two,chart_tree,chart_four,chart_five,chart_eight&modal=0. Acesso em: 02 set. 2023.

FERNANDES, E. A.; LEITE, G. B. Atuação dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Revista de Economia Política**, v. 41, n. 2, p. 351-371, jun. 2021.

FERREIRA, L. J.; DIAS, L. P.; LIU, J. Adopting Carbon Pricing Tools at the Local Level: A City Case Study in Portugal. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1812-1832, fev. 2022.

FGV ENERGIA. A transição energética no setor de transportes para nações em desenvolvimento: a perspectiva brasileira. 2022. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/da78b996-605e-4593-b1e3-ffb1178e61cb>. Acesso em: 28 jul. 2023.

FIESP - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Modelos de Mercado de Carbono e Desafios para o Brasil - Nota Técnica 2. 2023. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=286561>. Acesso em: 19 nov. 2023.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. Ed. Atlas, 2002, cap. 4, p. 41.

GONÇALVES, V. K.; VECCHIA, V. D. Limits of carbon pricing in a climate-changing world. **Revista Direito e Práxis**, v. 13 n. 4, p. 2504–2528, out. 2022.

GROTERA et al. Energy policy implications of carbon pricing scenarios for the Brazilian NDC implementation. **Energy Policy**, v. 160, jan. 2022.

HAFNER, M.; RAIMONDI, P. P. Priorities and challenges of the EU energy transition: From the European Green Package to the new Green Deal. **Russian Journal of Economics**, v. 6, n. 4, p. 374-389, dez. 2020.

HAFNER, M.; TAGLIAPIETRA, S. The Geopolitics of the Global Energy Transition. Ed. Springer Open, 2020, cap. 1, p. v-xix.

HAFNER, M.; TAGLIAPIETRA, S. A Critical, Temporal Analysis of Saudi Arabia's Initiatives for Greenhouse Gas Emissions Reduction in the Energy Sector. **Sustainability**, v. 14, n. 19, 2022.

IBGC - INSTITUTO BRASILEIRO DE GOVERNANÇA CORPORATIVA. Governança Climática no Brasil: Contexto e Desafios dos Conselhos de Administração. 2022. Disponível em: <https://conhecimento.ibgc.org.br/Paginas/Publicacao.aspx?PubId=24586>. Acesso em: 22 out. 2023.

ICAP - INTERNATIONAL CARBON ACTION PARTNESHIP. EU Emissions Trading System (EU ETS). 2024. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets>. Acesso em: 14 jan. 2024.

ICS - INSTITUTO CLIMA E SOCIEDADE. Explicando o mercado de carbono na era do Acordo de Paris. 2021. Disponível em: <https://climaesociedade.org/publicacoes/explicando-os-mercados-de-carbono-na-era-do-acordo-de-paris/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

ICC BRASIL - INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE BRASIL. Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono. 2023. Disponível em: https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2023/11/RELATORIO_ICCBR_2023.pdf. Acesso em: 19 dez. 2023.

ICS - INSTITUTO CLIMA E SOCIEDADE. Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. 2021. Disponível em: <https://laclima.org/files/explicando-mercados-rev.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Efficiency Outlook for India – Sizing up the opportunity. 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-outlook-for-india-sizing-up-the-opportunity>. Acesso em: 26 ago. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net Zero. A roadmap for the Global Energy Sector. 2021a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ebafc81-74ed-412b-9c60-5cc32c8396e4/NetZeroBy2050-AroadmapfortheGlobalEnergySector-SummaryforPolicyMakers_CORR.pdf. Acesso em: 26 dez. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World total final consumption by source. 2021b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>. Acesso em: 30 mar. 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2022. 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 26 ago. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy and Climate Model Documentation. 2022b. Disponível em: <https://www.a.org/reports/global-energy-and-climate-model>. Acesso em: 26 ago. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Statistics Data Browser. 2022c. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WEOEUR&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. Acesso em: 02 set. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Greenhouse Gas Emissions from Energy. 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy#documentation>. Acesso em: 26 jul. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2023. 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 19 dez. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net Zero Roadmap. A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. 2023c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>. Acesso em: 26 dez. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Electric car sales break new records with momentum expected to continue through 2023. 2023d. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>. Acesso em: 01 abr. 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. CO₂ emissions in 2023. A new record high but, is there light at the end of the tunnel? 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>. Acesso em: 02 mar. 2024.

IETA - INTERNATIONAL EMISSIONS TRADING ASSOCIATION. Cap and trade: the basics. 2019. Disponível em: <https://ieta.wildapricot.org/Emissions-Trading-101-Library>. Acesso em: 25 out. 2023.

IETA - INTERNATIONAL EMISSIONS TRADING ASSOCIATION. Greenhouse gas Market report 2022. 2023. Disponível em: <https://www.ieta.org/resources/ghg-market-report/2022-annual-report/>. Acesso em: 25 out. 2023.

INTERNATIONAL MONETARY FUND. Carbon Taxes or Emissions Trading Systems? Instrument Choice and Design. 2022. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/staff-climate-notes/Issues/2022/07/14/Carbon-Taxes-or-Emissions-Trading-Systems-Instrument-Choice-and-Design-519101>. Acesso em: 26 out. 2023.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 29 set. 2023.4

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 01 ago. 2023.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. History of the IPCC. 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/history/>. Acesso em: 27 mar. 2024.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Indicadores quantitativos da OCDE e o Brasil. 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12346/5/RI_Indicadores_quantitativos_OCDE_Brasil_v5_Pub_Preliminar.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

KÄNZIG, D. R. The Unequal Economic Consequences of Carbon Pricing. **NBER Working Papers**, n. w31221, mai. 2023

KARSTENSEN, J.; PETERS, G. P.; ANDREW, R. M. Trends of the EU's territorial and consumption-based emissions from 1990 to 2016. *Climate Change*, v. 151, n. 2, p. 131-142, nov. 2018.

KOCHANEK, E. Evaluation of energy transition scenarios in poland. **Energies**, v. 14, n. 19, set. 2021.

KRELL, A. J; SOUZA, C. B. C. The sustainability of the Brazilian energy matrix: the regulatory framework for renewable energies and the principle of sustainable development. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 11, n. 2, p. 157-188, ago. 2020.

LAMPIS, A. *et al.* Possibilidades e limites da transicao energética: uma analise a luz da ciencia pós-normal. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 103, p. 183–200, fev. 2021.

LEFEVRE, G. B.; BREVIGLIERI, G. B.; OSORIO, G. I. Dez recomendações para um mercado de carbono regulado no Brasil. **Caminhos para a sustentabilidade**, v. 21, n. 1, p. 35-41, mar. 2022.

LEITE, A. C. C.; ALVES, E. E. C.; PICCHI, L. A cooperação multilateral climática e a promoção da agenda da transição energética no Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, p. 379-403, jul. 2022.

LUEDEMANN, G. *et al.* Texto para Discussão (TD) 2877: Gastos federais, alavancagem de capital privado e receitas advindas da venda de reduções certificadas de emissões (RCES) no contexto do mecanismo de desenvolvimento limpo no Brasil (2000 a 2020). 2023. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11975>. Acesso em: 19 nov. 2023.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023.

MAAT, E. P. Leading by Example, Ideas or Coercion? The Carbon Border Adjustment Mechanism as a Case of Hybrid EU Climate Leadership. **European Papers**, v. 7, n. 1, p. 55-67, abr. 2022.

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. 2023. Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/janeiro/camara-aprova-projeto-que-regulamenta-o-mercado-de-carbono-no-brasil>. Acesso em: 02 jan. 2024/

MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2022. Diretrizes para uma estratégia nacional para neutralidade climática. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/clima/diretrizesparaumaestrategianacionalparaneutralidadeclimatica_vdefeso.pdf. Acesso em: 26 dez. 2022.

MME - Ministério de Minas e Energia. 2023. Transição energética: a mudança de energia que o planeta precisa. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transicao-energetica-a-mudanca-de-energia-que-o-planeta-precisa>. Acesso em: 30 mar. 2024.

MOURA, C. E. R. Tributação do carbono na América Latina e perspectivas para o Brasil. **E-legis**, n. 39, p. 238-257, set. 2022.

MUNHOZ, L. Regulação do Mercado de Carbono Brasileiro. **AgroAnalysis. Fundação Getúlio Varga**. 2023. Disponível em: https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-09/2023_09.pdf. Acesso em: 17 nov. 2023.

NAIS, L. R. A. Quais os desafios e oportunidades para as grandes empresas da indústria química que atuam no Brasil a partir da regulação do mercado de emissões de gases de efeito estufa. 2023. 96 p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Públicas) – Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2023.

NASSAR, Y. F. *et al.* Estimation of CO2 emission factor for the energy industry sector in libya: a case study. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 9, p. 13998-14026, fev. 2021.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Ação Civil Pública contra o Ministério do Meio Ambiente. 2021a. Disponível em: <https://jusclima2030.jfrs.jus.br/wp-content/uploads/2021/11/Inicial-Laboratorio-do-Observatorio-do-Clima-1.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020. 2021.b Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 19 out. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de mudanças climáticas do Brasil. 2023a. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Nota Técnica: O Brasil conseguirá cumprir sua "nova velha" NDC em 2025?. 2023b. Disponível em: https://storage.epbr.com.br/2023/11/Nota-Te%CC%81cnica_-O-Brasil-conseguira%CC%81-cumprir-sua-nova-velha-NDC-em-2025.pdf. Acesso em: 05 abr. 2024.

OLIVEIRA, Y. P. L. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 1, p. 2-20, jan. 2022.

OLIVEIRA, I. G. S. Créditos de metano: um instrumento para mitigação das emissões de gases de efeito estufa provenientes de resíduos sólidos. **Revista de Ciências Jurídicas e Sociais - IURJ**, v. 4, n. 1, p. 69-85, set. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. “Um passo em direção à justiça”, diz Guterres sobre acordos da COP27. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/208223-%E2%80%9Cum-passo-em-dire%C3%A7%C3%A3o-%C3%A0-justi%C3%A7a%E2%80%9D-diz-guterres-sobre-acordos-da-cop27>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Ações urgentes contra mudanças climáticas são necessárias para garantir um futuro habitável, alerta IPCC. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/224004-ações-urgentes-contramudança-climática-são-necessárias-para-garantir-um-futuro-habitável#:~:text=O%20Painel%20Intergovernamental%20sobre%20Mudanças,pela%20mudança%20global%20do%20clima>. Acesso em: 31 ago. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. O que são mudanças climáticas. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 27 mar. 2024.

OSIČKA, J.; ČERNOCH, F. European energy politics after Ukraine: The road ahead. **Energy Research and Social Science**, v. 91, ago. 2022.

PANTOJA, S. M.; VALENTE, P. O. Taxação de Carbono: impactos nos indicadores nos indicadores Econômicos de E&P, **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2022**. 2022. Disponível em: <https://biblioteca.ibp.org.br/rioolegas/pt-BR/search/39485?exp=>. Acesso em: 26 mar. 2023.

PASTORE, L. M. *et al.* Rising targets to 55% GHG emissions reduction - The smart energy systems approach for improving the Italian energy strategy. **Energy**, v. 259, ago. 2022.

QUITO, B. *et al.* Spatiotemporal influencing factors of energy efficiency in 43 european countries: A spatial econometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 182, ago. 2023.

QUREITEM, G.; AL-KHATIB, I. A.; ANAYAH, F. Inventory of main greenhouse gas emissions from energy sector in Palestine. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 63, dez. 2020.

RAHMAN, M. M. *et al.* A Critical, Temporal Analysis of Saudi Arabia's Initiatives for Greenhouse Gas Emissions Reduction in the Energy Sector. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 12651-12670, out. 2022.

RIDELENSKY, J. C. F.; SANTOS, A. R. Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL uma coletânea de projetos aprovados no Brasil na última década, **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e38711427087, mar. 2022.

ROSA, M. *et al.* Diversification, concentration and renewability of the energy supply in the European Union. **Energy**, v. 253, ago. 2022.

RODRIGUES, L.; MATOS, S.; VALENTE, F. Bioenergia e o xadrez da transição energética. **AgroAnalysis. Fundação Getúlio Varga**. 2023. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/agroanalysis/article/view/89932>. Acesso em: 17 nov. 2023.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões Brutas. Ranking. 2023. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=states-netemissions-by-sector>. Acesso em: 11 dez. 2023.

SENADO FEDERAL. Entrada do Brasil na OPEP+ ofusca assinatura de acordo para triplicar energias renováveis. 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/12/04/entrada-do-brasil-na-opep-ofusca-assinatura-de-acordo-para-triplicar-energias-renovaveis>. Acesso em: 05 jan. 2024.

SEVERINO, A, J. Metodologia do Trabalho Científico. Ed. Cortez, 2014, cap. 3, p. 107.

SIKORA-ALICKA, J. EU ETC Market Fundamental Changes. *Studies in Logic*, v. 68. N. 1, p. 447-462, dez. 2023.

SILVA, K. Z; COLOMBO, R. Climate change: Anthropic influence, impacts and perspectives. **Fronteiras**, v. 8, n. 3, p. 47–68, set. 2019.

SILVEIRA, P, G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Opinião Jurídica**, v. 17, n. 33, p. 123-148, set. 2017.

STAVINS, R. N. The Relative Merits of Carbon Pricing Instruments: Taxes versus Trading. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 16, n. 1, p. 62–82, jan. 2022.

TAX FOUNDATION. Looking Back on 30 Years of Carbon Taxes in Sweden. 2020. Disponível em: <https://taxfoundation.org/research/all/eu/sweden-carbon-tax-revenue-greenhouse-gas-emissions/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

TORRES, C.; FERMAN, R. K. S.; SBRAGIA, I. Projetos de MDL no Brasil: oportunidade de mercado para empresas e para novas entidades operacionais designadas. **Ambiente & Sociedade**, v. XIX, n. 3, p. 199-214, jul. 2016.

TUTAK, M.; BRODNY, J. Renewable energy consumption in economic sectors in the EU-27. The impact on economics, environment and conventional energy sources. A 20-year perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 345, fev. 2022.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Paris Agreement. 2015a. Disponível em: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Funfccc.int%2Ffiles%2Fmeetings%2Fparis_nov_2015%2Fapplication%2Fpdf%2Fparis_agreement_english_.pdf%0AVisible%3A%200%25%20. Acesso em: 02 abr. 2024.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States. 2015b. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/LV-03-06-EU%20INDC.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2024.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. The update of the nationally determined contribution of the European Union and its Member States. 2020. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/EU_NDC_Submission_December%202020.pdf. Acesso em: 14 jan. 2024.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. The Explainer: The Paris Agreement. 2021. Disponível em: <https://unfccc.int/news/the-explainer-the-paris-agreement>. Acesso em: 27 mar. 2024.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Federative Republic of Brazil Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement under the UNFCCC. 2023a. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil%20First%20NDC%202023%20adjustment.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2023.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. The update of the nationally determined contribution of the European Union and its Member States. 2023b. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-10/ES-2023-10-17%20EU%20submission%20NDC%20update.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Broken Record Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>. Acesso em: 19 dez. 2023.

UNEPCCC - UNPEC COPENHAGEN CLIMATE CENTRE. CDM Pipeline. 2023 Disponível em: <https://unepccc.org/cdm-ji-pipeline/>. Acessado em: 10 dez. 2023. Base de dados.

VERCILLO, U. E.; TRENNEPOHL, N. Mercado de carbono e sustentabilidade: desafios regulatórios e oportunidades. *Revista de Direito Socioambiental*, v. 01; n. 02, p. I-V, jan. 2023.

VEZZONI, R. Green growth for whom, how and why? The REPowerEU Plan and the inconsistencies of European Union energy policy. **Energy Research and Social Science**, v. 101, mai. 2023.

VISUAL CAPITALIST. Mapped: Carbon Pricing Initiatives Around the World. Vancouver, BC, 2023. Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/cp/carbon-pricing-initiatives-around-the-world/>. Acesso em: 05 de jan. 2024.

WALTER, A. Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, p. 155-188, ago. 2021.

WEDY, G.; PIMENTEL, C.; AMARAL, W. The Carbon Market and its Regulation in Brazil. Sabin Center for Climate Change Law. 2022. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4212795. Acesso em: 19 dez. 2023.

WIERTZ, T.; KUHN, L.; MATTISSEK, A. A turn to geopolitics: Shifts in the German energy transition discourse in light of Russia's war against Ukraine. **Energy Research and Social Science**, v. 98, mar. 2023.

WOO, M. K. 2022. Carbon pricing ethics. **Philosophy Compass**, v. 17, n. 1, jan. 2022.

WORLD ENERGY DATA. World Final Energy. 2023 Disponível em: <https://www.worldenergydata.org/world-final-energy/>. Acesso em: 23 ago 2023.

ZHANG, Y.; TANG, K. Analysis on evolution characteristics and influencing factors of global energy pattern under anti-globalization background. **Acta Paediatrica**, v. 9, n. 8, p. e18824-18838, jul. 2023.

ZIELINSKI et al. COP27 climate change conference: Urgent action needed for Africa and the world. **Wiley**, v. 111, n. 12, p. 2259–2261, out. 2022.

ZOU, C. *et al.* The role of new energy in carbon neutral. **Petroleum Exploration and Development**, v. 48, n. 2, p. 480-491, abr. 2021.