



Universidade de Brasília (UnB)
Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS)
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável (PPGCDS)

Emilly Caroline Costa Silva

**Análise de sistemas integrados e
desafios à transição energética global**

Brasília

2024

Emilly Caroline Costa Silva

Análise de sistemas integrados e desafios à transição energética global

Documento submetido para exame de defesa de dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília.

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Strapasson

Brasília, 26 de setembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Strapasson
Universidade de Brasília (UnB)
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Antonio Cesar Pinho Brasil Junior
Universidade de Brasília (UnB)
Examinador Interno

Prof. Dr. João Onofre Pereira Pinto
Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Estados Unidos
Examinador Externo

Ficha Catalográfica

SS586a SILVA, EMILLY
Análise de sistemas integrados e desafios à transição
energética global / EMILLY SILVA; orientador Alexandre
Strapasson. -- Brasília, 2024.
132 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico em Desenvolvimento
Sustentável) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. Transição Energética. 2. Mudança do Clima. 3. Dinâmica
de Sistemas. 4. Cenários Energéticos. 5. Mitigação. I.
Strapasson, Alexandre , orient. II. Título.

Agradecimentos

Agradeço à minha querida mãe, Norma, meu maior exemplo, minha maior incentivadora e melhor amiga. Ela me dá forças e sempre apoia os meus sonhos. Agradeço também aos meus cachorros, Chorão e Juju, que são a luz da minha vida, a base da minha felicidade diária, e me ensinam todos os dias sobre a forma mais pura de amor.

Ao meu irmão caçula, Murillo, que, à sua maneira, esteve ao meu lado e compreendeu, tornando-se uma parte essencial dessa etapa da minha vida, sou profundamente grata.

Um agradecimento especial ao meu professor orientador, Prof. Dr. Alexandre Strapasson, pelo suporte acadêmico, pela parceria e por me guiar nesta fase da minha trajetória. Também agradeço aos membros da banca, Prof. Dr. Antonio Brasil Junior (UnB), Profa. Dra. Virginia Parente (USP) e Prof. João Onofre Pereira Pinto (ORNL), por terem gentilmente aceitado avaliar o meu trabalho. Minha gratidão se estende ao Prof. Dr. Saulo Rodrigues Pereira Filho (UnB), pela valiosa orientação na fase inicial da minha pesquisa.

Aos meus colegas e amigos de trabalho do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), grandes impulsionadores que ocupam um espaço imenso no meu coração, também agradeço. Ao meu líder, Marcelo Poppe, e às minhas parceiras de trabalho, Barbara Bressan, Daniella Fartes, Gabriela Britto e Alina Cordeiro, assim como aos amigos do trabalho e da corrida, Jackson Maia e José Salomão, sou grata todos os dias por tê-los ao meu redor.

Às minhas amigas Stela e Julia Woo, Beatriz Oliveira e Itiane Thayna, que estiveram presentes em todos os momentos e me viram amadurecer ao longo dos anos, transformando nossa amizade em algo muito especial, meu sincero agradecimento.

Agradeço, ainda, à minha querida prima, Anna Lis, e ao meu lindo sobrinho, Bernardo, que tornam meus dias mais especiais com seu carinho e presença.

Por fim, agradeço aos demais colegas do CGEE e do CDS por todo o suporte.

Emilly Caroline

Resumo

Esta dissertação trata da transição energética global e seus impactos na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2050, com base na aplicação de modelos de dinâmica de sistemas (*system dynamics*), como as Calculadoras 2050. A transição energética é essencial para mitigar as mudanças climáticas e está diretamente ligada à evolução histórica da matriz energética, caracterizada por uma dependência crescente de combustíveis fósseis, desde a Revolução Industrial. O Acordo de Paris e as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) representam os principais compromissos internacionais para enfrentar essa crise climática. O objetivo geral da dissertação é analisar cenários de transição energética em níveis global, regional e nacional, identificando riscos e oportunidades para uma redução acelerada das emissões de GEE, por meio de modelagem integrada de sistemas. Além disso, são propostas recomendações ao aprimoramento desses modelos e ao planejamento energético voltado à mitigação das mudanças climáticas. Utilizou-se como método, revisão de literatura e análise internacional comparada, com base nos seguintes modelos dinâmicos (Calculadoras 2050): SINAPSE (Brasil), IESS (Índia), GAIN Energy Calculator (Estados Unidos), EUCalc (Europa) e Global Calculator (mundial). Foram simulados cenários energéticos que integram diferentes trajetórias de descarbonização e tecnologias energéticas, levando-se em conta fatores socioeconômicos e políticos. Os resultados revelam que, embora os países apresentem esforços ambiciosos em suas NDCs, esses ainda são insuficientes para atingir as metas globais do Acordo de Paris. Ao analisar as NDCs à luz dos modelos utilizados, demonstra-se que, sem políticas mais ambiciosas, a concentração de GEE continuará a aumentar, colocando em risco os limites de aquecimento global estabelecidos pelo IPCC. Os modelos também permitem identificar os setores mais críticos para uma mitigação mais profunda das respectivas matrizes energéticas. A União Europeia tem avançado em direção a metas mais ambiciosas, enquanto países como o Brasil e a Índia enfrentam desafios socioeconômicos que dificultam o cumprimento de suas metas climáticas. Os Estados Unidos ainda apresentam elevadas emissões per capita de GEE, provenientes de combustíveis fósseis. Globalmente, nota-se um descompasso entre os discursos políticos de mitigação e as simulações realizadas. Conclui-se que a governança climática eficaz e a cooperação internacional são essenciais para promover uma transição energética justa e eficaz. Para acelerar a descarbonização em escala global, é necessário aprimorar as políticas de mitigação, fortalecer os mecanismos de financiamento e alinhar as ações globais com os potenciais identificados, por meio da modelagem integrada de sistemas energéticos.

Palavras-chave: mudança do clima; transição energética; dinâmica de sistemas; cenários energéticos; mitigação.

Abstract

This dissertation addresses the global energy transition and its impacts on reducing greenhouse gas (GHG) emissions by 2050, based on the application of system dynamics models, such as the 2050 Calculators. The energy transition is essential for mitigating climate change and is directly linked to the historical evolution of the energy mix, characterized by a growing dependence on fossil fuels since the Industrial Revolution. The Paris Agreement and the Nationally Determined Contributions (NDCs) represent the main international commitments to tackle this climate crisis. The general objective of this dissertation is to analyze energy transition scenarios at the global, regional and national levels, identifying risks and opportunities for an accelerated reduction in GHG emissions through integrated systems modeling. It also proposes recommendations for improving these models and for energy planning aimed at mitigating climate change. The method used was a literature review and international comparative analysis, based on the following dynamic models (Calculadoras 2050): SINAPSE (Brazil), IESS (India), GAIN Energy Calculator (United States), EUCalc (Europe) and Global Calculator (worldwide). Energy scenarios were simulated that integrate different decarbonization trajectories and energy technologies, considering socio-economic and political factors. The results show that although countries are making ambitious efforts in their NDCs, these are still insufficient to achieve the global goals of the Paris Agreement. Analysing the NDCs in the light of the models used shows that, without more ambitious policies, the concentration of GHGs will continue to increase, putting the global warming limits set by the IPCC at risk. The models also make it possible to identify the most critical sectors for deeper mitigation of the respective energy mixes. The European Union has made progress towards more ambitious targets, while countries such as Brazil and India face socio-economic challenges that make it difficult to meet their climate targets. The USA still presents a high per capita GHG emission, based on fossil fuels. Globally, there is a mismatch between the political discourse on carbon mitigation and the simulations. It is concluded that effective climate governance and international cooperation are essential to promote a just and effective energy transition. To accelerate decarbonization on a global scale, it is necessary to improve mitigation policies, strengthen financing mechanisms and align global actions with identified potentials through integrated energy system modelling.

Keywords: climate change; energy transition; system dynamics; energy scenarios; mitigation.

Lista de Figuras

Figura 1 - Interface web da visão geral da calculadora global.	26
Figura 2 - Cenário IEA 4DS e destaque para quadro de tecnologias renováveis	32
Figura 3 - Ranking de emissões brasileiras por setor em 2022.	35
Figura 4 - Interfaceweb do SINAPSE.	36
Figura 5 - Emissões brasileiras de CO ₂ - cenário BAU.....	38
Figura 6 - Comparação de emissões brasileiras de CO ₂ totais, setor energético e recorte para eletricidade - cenário BAU.....	39
Figura 7 - Emissões de energia por setor - cenário BAU.....	40
Figura 8 - Comparação de emissões brasileiras de CO ₂ totais, setor energético e recorte para eletricidade - setor - Políticas de P&D sem arrependimento.....	42
Figura 9 - Comparação de emissões brasileira nos cenários BAU e Políticas de P&D sem arrependimento.....	43
Figura 10 - Emissões de energia por setor - Políticas de P&D sem arrependimento.	44
Figura 11 - Comparação de emissões entre cenários BAU, P&D sem arrependimento e Extremamente Ambicioso.....	45
Figura 12 - Interfaceweb da IESS 2047.	49
Figura 13 - Emissões de energia por setor da Índia - cenário BAU.....	51
Figura 14 - Porcentagem de emissões de energia da Índia - cenário BAU.	52
Figura 15 - Capacidade instalada de energia elétrica ao longo dos anos da Índia - cenário BAU.	53
Figura 16 - Porcentagem de recursos energéticos não-fósseis na matriz elétrica da Índia ao longo dos anos - cenário BAU.	53
Figura 17 - Emissões de energia por setor na Índia - cenário otimista.....	54
Figura 18 - Porcentagem de emissões de energia da Índia - cenário otimista.....	55
Figura 19 - Porcentagem de recursos energéticos não fósseis na matriz elétrica da Índia ao longo dos anos - cenário otimista.	55
Figura 20 - Capacidade instalada de energia elétrica da Índia ao longo dos anos - cenário otimista.	56
Figura 21 - Comparação das emissões gerais de energia da Índia ao longo dos anos para os cenários BAU e Otimista.....	57
Figura 22 - Matriz energética dos EUA por fonte de energia em 2022.	60
Figura 23 -Produção de energia nos EUA pelas principais fontes, 1950-2022.....	61
Figura 24 - Emissões de GEE por setor, ano-base 2021.	62
Figura 25 - Interfaceweb GAIN Energy Calculator.	64
Figura 26 - Projeção de emissões de GEE dos Estados Unidos - cenário BAU.....	66
Figura 27 - Projeção de demanda e oferta de Energia dos Estados Unidos - cenário BAU.....	67

Figura 28- Projeção de emissões de GEE dos Estados Unidos - cenário otimista.	68
Figura 29 - Projeção de demanda e oferta de energia dos Estados Unidos - cenário otimista. ...	70
Figura 30 - Emissões de GEE da UE por setor, ano-base 2019.	73
Figura 31 - Matriz energética da UE em 2020.	74
Figura 32 - Interfaceweb EUCALC.	76
Figura 33 - Emissões gerais de GEE da UE por setor - cenário EU Reference.	79
Figura 34 - Oferta de Energia por ano da UE - cenário EU Reference.	80
Figura 35 - Prospecção das emissões de GEE dos países mais emissores da EU - cenário EU Reference.....	81
Figura 36 - Emissões gerais de GEE da UE por setor - cenário Life.	82
Figura 37 - Oferta de Energia por ano da UE - cenário Life.....	83
Figura 38 - Prospecção das emissões de GEE dos países mais emissores da UE - cenário Life. 85	
Figura 39 - Comparação de emissões totais em 2050 dos cenários Life e EU Reference.....	86
Figura 40 - Metas de Emissões absolutas para 2030 conforme NDCs.....	92
Figura 41 - Comparações de emissões absolutas entre países cenários BAU.	93
Figura 42 - Comparações de emissões absolutas entre países em cenários mais otimistas.....	94
Figura 43 - Forçamento radiativo dos RCPs 2.6, 6.0 e 8.5.	97
Figura 44 - Emissões anuais globais por fonte RCP2.6.	98
Figura 45 - Geração de energia RCP2.6.....	99
Figura 46 - Demanda de energia RCP2.6.....	101
Figura 47 - Emissões anuais globais por fonte RCP6.0.	102
Figura 48 - Geração de energia RCP6.0.....	103
Figura 49 - Demanda de energia RCP6.0.....	104
Figura 50 - Emissões anuais globais por fonte RCP8.5.	105
Figura 51 - Geração de energia RCP8.5.....	106
Figura 52 - Demanda de energia RCP8.5.....	107
Figura 53 - Análise de sensibilidade em relação as reduções de emissões da GC, com níveis variados de configuração para diferentes rotas.	108
Figura 54 -Projeções de Emissões de CO ₂ para 2050 por Fonte de Energia no Cenário IEA 4DS.	110
Figura 55 – Trajetórias de emissões GEE a partir para o setor de tecnologias energéticas.	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Links das calculadoras climáticas.	25
Tabela 2 - Comparação das Emissões absolutas para 2030.	90
Tabela 3- Mecanismos de cooperação internacional.....	118

Lista de Siglas e Acrônimos

AEA – Agência Europeia do Ambiente

AIM - *Asia-Pacific Integrated Model*

BAU – *Business as Usual*

BEN - Balanço Energético Nacional,

BITS - *Birla Institute of Technology and Science*

CAT – *Climate Action Tracker*

CCS - Captura e armazenamento de carbono

CCT - *International Council on Clean Transportation;*

CEM – *Clean Energy Ministerial*

CO_{2e} - Dióxido de carbono equivalente

COP – Conferência das Partes

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

DECC - *Department of Energy and Climate Change*

DESNZ - *Department for Energy Security and Net Zero*

DOE – Departamento de Energia

EC - Tratado da Carta da Energia

EIA - *Energy Information Administration,*

EPA - *Environmental Protection Agency*

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EUA - Estados Unidos da América

EUCalc - *European Calculator*

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

G20 - Grupo dos 20

G7 - Grupo dos 7

G8 - Grupo dos 8

- GAIN** - *Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear*
- GBA** - *Global Biofuel Alliance*
- GC** – Calculadora Global
- GEE** - Gases de Efeito Estufa
- IDH** - Índice de Desenvolvimento Humano
- IEA** - Agência Internacional de Energia
- IESS** – Cenários de Segurança Energética da Índia
- IIASA** - Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados
- ILAC** – Iniciativa para Energia na América Latina e Caribe
- INDC** - Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada
- INMETRO** - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
- IPCC** - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- IRA** - *Inflation Reduction Act*
- IREI** - Iniciativa Internacional de Energias Renováveis
- IRENA** – Agência Internacional de Energia Renovável
- ISA** - Aliança Solar Internacional
- LTS** - *Long-Term Strategy*
- LULUCF** - Land use, land-use change, and forestry
- MCTI** – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
- MESSAGE** - *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*
- MI** – *Mission Innovation*
- MInfra** – Ministério da Infraestrutura
- MMA** - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
- MOP** - Projeto opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa
- NDC** – Contribuições Nacionalmente Determinadas

NEP - *National Education Policy*

NIES - *National Institute for Environmental Studies*

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ODM – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONG – Organização Não Governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

ONUUDI - *Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial*

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PBL - Netherlands Environmental Assessment Agency

PIB - Produto Interno Bruto

QCN – Quarta Comunicação Nacional

RCP – *Representative Concentration Pathways*

SAF - *Sustainable Aviation Fuels*

SE4ALL - Energia Sustentável para Todos

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SINAPSE - Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões

UCL – *University College London*

UE - União Europeia

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNEP/PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

Sumário

1.	Introdução	15
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivos Específicos.....	18
1.3	Questões de pesquisa.....	18
1.4	Hipótese.....	19
1.5	Estrutura da dissertação.....	19
2.	Contexto da Pesquisa	20
2.1	Mudanças climáticas e os impactos da transição energética	20
2.2	Convenção do Clima e Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC)	22
2.3	Calculadoras 2050	24
2.3.1	Calculadoras global (GC) e nacionais	25
3	Metodologia	28
3.1	NDCs e simulação nas calculadoras nacionais.....	29
3.2	Descrição dos modelos e premissas para elaboração de cenários globais	30
3.3	Limites e incertezas metodológicas.....	32
4	Análises nacionais e regionais	34
4.1	Brasil.....	34
4.1.1	Calculadora Brasileira – SINAPSE	36
4.1.1.1	Cenários.....	36
4.1.2	Avaliações e recomendações	46
4.2	Índia.....	48
4.2.1	Calculadora Indiana – IEES	49
4.2.1.1	Cenários.....	50
4.2.2	Avaliações e recomendações	58
4.3	Estados Unidos	59
4.3.1	Calculadora Estadunidense	63
4.3.1.1	Cenários.....	64
4.3.2	Avaliações e recomendações	71
4.4	União Europeia.....	72

4.4.1	Calculadora da União Europeia.....	75
4.4.1.1	Cenários.....	77
4.4.2	Avaliações e recomendações	87
4.5	Análise Internacional Comparada.....	89
5	Análise Global.....	96
5.1	Representative Concentration Pathway (RCP)	96
5.1.1	RCP 2.6.....	97
5.1.2	RCP 6.0.....	101
5.1.3	RCP 8.5.....	104
5.2	Análise de sensibilidade da GC para o setor de energia	107
5.2.1	Trajetórias usando análise de sensibilidade de forma agregada.....	111
5.3	Avaliações e recomendações.....	113
6	Conclusão	119
6.1	Recomendações para estudos futuros.....	121
7	Referências.....	123

1. Introdução

A relação entre os seres humanos e a energia passou por transformações significativas ao longo da história, mas novas transições se anunciam, com o recente avanço das mudanças climáticas. Na antiguidade, as sociedades dependiam principalmente dos alimentos como fonte de energia para suas necessidades básicas de sobrevivência. Na medida em que as sociedades se organizam, novos recursos começam a ser explorados, como a madeira para combustão e os animais para o transporte e o trabalho. Esse progresso gradual culminou na Revolução Industrial, um ponto de inflexão que marcou uma profunda transformação na matriz energética global. A partir desse momento, a dependência de fontes como o carvão mineral, combinada com avanços tecnológicos, acelerou a diversificação das fontes de energia e o desenvolvimento industrial (Lannelongue *et al.*, 2021; Cheng *et al.*, 2021).

Além do avanço na exploração e uso do carvão mineral, esse período testemunhou os primeiros passos na história da exploração de petróleo e gás natural. A descoberta do petróleo remonta ao século XVIII, mas foi no século XIX que as primeiras perfurações comerciais foram realizadas, inaugurando, assim, o surgimento da indústria do petróleo. O gás natural, por sua vez, foi frequentemente encontrado junto a depósitos de petróleo, mas sua exploração como fonte de energia separada também se intensificou durante esse período (Smil, 2018). Esses avanços tecnológicos na exploração de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) desempenharam um papel fundamental na revolução industrial e na transformação da sociedade, impulsionando o desenvolvimento econômico e a urbanização em diversos países. O mundo contemporâneo tornou-se dependente dessas fontes em todos os setores da economia. Ocorre que essas fontes são fósseis e, portanto, limitadas e não-renováveis. Além disso, sua combustão é a principal responsável pelo aquecimento global e pela mudança global do clima (Akrofi *et al.*, 2022).

Os compromissos climáticos firmados no Acordo de Paris e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 das Nações Unidas inspiraram diversas iniciativas de enfrentamento da mudança do clima em âmbitos globais, regionais e nacionais (Mikulčić *et al.*, 2021). O Acordo de Paris, aprovado por 195 países durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em dezembro de 2015, representa um marco para as políticas de combate às mudanças climáticas. O principal objetivo do Acordo é limitar o aumento da temperatura neste século em níveis significativamente inferiores a 2°C em

relação aos níveis pré-industriais e empregar esforços para limitar esse aumento a 1,5°C (UNFCCC, 2015).

Nesse contexto, as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) representam os compromissos assumidos pelos países signatários do Acordo de Paris para enfrentar as mudanças climáticas, por meio de metas de redução de suas respectivas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e da promoção da adaptação aos impactos climáticos. Essas metas são fundamentais não apenas para limitar o aumento da temperatura global, mas também para impulsionar a inovação tecnológica e a cooperação internacional na transição para uma economia de baixo carbono (UNFCCC, 2020).

Os sistemas energéticos constituem o centro das ações de mitigação do aquecimento global, devido à sua relevância nas emissões de GEE (Losekann *et al.*, 2019). Esses compromissos internacionais estimularam novos interesses no desenvolvimento tecnológico da produção e utilização energia, variando de abordagens de redução de emissões a dimensões de justiça no acesso a transições de energia (Akrofi *et al.*, 2022). O sistema mundial está passando por um profundo reordenamento e com o setor energético não está sendo diferente. A cooperação entre países para implementação de medidas de mitigação e novos caminhos para a transição energética global é um processo complexo (Wang *et al.*, 2019).

Esta pesquisa se justifica pela necessidade de uma compreensão mais profunda sobre as dinâmicas e disparidades da transição energética global por meio da modelagem comparada de sistemas integrados, sob uma metodologia análoga, qual seja, a Calculadora 2050, que são modelos baseados em dinâmica de sistemas (*system dynamics*) e que permitem avaliar a implementação de políticas de mitigação. Embora existam muitos estudos sobre transições energéticas, ainda há uma escassez de análises que propiciem um entendimento comparativo de como os países, com diferentes capacidades econômicas e tecnológicas, podem planejar suas trajetórias rumo à descarbonização, com base nos modelos aqui utilizados. A literatura atual, embora rica em análises nacionais e regionais, frequentemente carece de uma exploração abrangente das interações entre diferentes países, especialmente entre aqueles que apresentam contextos socioeconômicos e ambientais diversos, como o Brasil e a Índia, em contraste com economias mais desenvolvidas, como os Estados Unidos e a União Europeia, e sobre como esses países estão inseridos no contexto global.

O estudo busca preencher essa lacuna ao oferecer uma análise comparativa das NDCs e das tecnologias energéticas que impulsionam a transição para uma economia de baixo carbono. Ao adotar uma abordagem baseada em modelos dinâmicos de sistemas, a pesquisa visa contribuir a um melhor entendimento das possibilidades e limitações enfrentadas pelos países, ao seguir por diferentes trajetórias de transição energética. Esse tipo de abordagem oferece *insights* valiosos sobre como as políticas energéticas podem ser melhoradas para atender não apenas às necessidades ambientais globais, mas também às demandas de justiça climática. A justiça climática, em particular, é uma questão central para os países em desenvolvimento, que, embora contribuam menos historicamente para as emissões globais, estão entre os mais vulneráveis aos impactos climáticos.

Além disso, a relevância prática desta pesquisa reside no potencial de influenciar diretamente no aprimoramento de políticas públicas. Ao proporcionar uma análise detalhada de como diferentes tecnologias energéticas impactam a redução de GEE, o estudo traz críticas aos cenários observados e sugestões para a implementação de políticas de transição energética de forma eficaz e mais célere. A cooperação internacional, impulsionada por iniciativas como as NDCs, pode ser reforçada por uma compreensão mais detalhada das diferenças regionais e nacionais, contribuindo para um esforço global mais coordenado. Busca-se, assim, não apenas uma contribuição teórica, mas também recomendações práticas às agendas de governança climática e desenvolvimento sustentável. Portanto, ao comparar as NDCs e os impactos das tecnologias nos diferentes contextos nacionais, com base em modelos dinâmicos robustos, espera-se que este estudo traga uma melhor compreensão dos caminhos futuros da descarbonização global e das possibilidades de uma transição energética justa e equitativa.

1.1 Objetivo Geral

Analisar cenários de transição energética global, regional e nacional, identificando riscos e oportunidades para uma redução acelerada das emissões de gases de efeito estufa, com base em modelagem integrada de sistemas, assim como propor recomendações de aprimoramento dos modelos utilizados e de planejamento energético, para mitigação das mudanças climáticas.

1.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos objetivos específicos que direcionam e orientam as ações a serem realizadas. Cada objetivo específico aborda uma área ou aspecto relacionado ao objetivo geral e contribui de forma complementar para o seu cumprimento, conforme descrito abaixo:

- Simular cenários energéticos de mitigação de gases de efeito estufa, por meio das Calculadoras 2050¹, em nível global e para países selecionados² como Brasil, Índia, Estados Unidos e União Europeia;
- Analisar as NDCs dos países selecionados e seus compromissos firmados no âmbito do Acordo de Paris, para cenários de 2030 e 2050, com recorte energético, visando entender o panorama atual do processo de transição energética e o planejamento futuro;
- Comparar os cenários simulados, a fim de identificar padrões, divergências e melhores práticas;
- Analisar os impactos de diferentes tecnologias sobre as emissões de gases de efeito estufa, com base nas Calculadoras 2050 e respectivas NDCs, incluindo análise de sensibilidade para o contexto global.

1.3 Questões de pesquisa

O presente estudo visa responder os seguintes problemas de pesquisa:

- Como a transição energética global pode se desdobrar em diversos cenários, incluindo suas consequências para as emissões de gases de efeito estufa e a participação das diferentes fontes de energia até 2030 e 2050?
- De que maneira a dinâmica de sistemas pode ser utilizada para modelar e simular os impactos das NDCs dos países selecionados (Brasil, Índia, Estados Unidos e União Europeia) nos cenários de transição energética para 2030 e 2050?
- Quais são as principais diferenças e potenciais sinergias nas trajetórias de transição energética dos países selecionados, e como essas trajetórias podem influenciar globalmente a redução das emissões de gases de efeito estufa até 2050?

¹ A lista completa de Calculadoras 2050 já existentes está disponível em: <https://www.imperial.ac.uk/2050-calculator/completed-calculators/>

² As premissas utilizadas para a seleção desses países estão detalhadas no Capítulo 3 - Metodologia.

1.4 Hipótese

A hipótese deste estudo é que “a modelagem integrada de sistemas, por meio de modelos como as Calculadoras 2050, pode auxiliar na identificação de cenários mais eficazes para uma transição energética global, regional e nacional, contribuindo ao aprimoramento de políticas climáticas e de ações de planejamento energético”. Tal aprimoramento pode se dar por meio de técnicas como a otimização por vizinhança, que envolve explorar soluções próximas à atual em um conjunto de possibilidades, avaliando diferentes variações para encontrar alternativas mais eficazes e apropriadas, sendo particularmente útil para resolver problemas complexos com múltiplos critérios e restrições. O atendimento da hipótese proposta, está amparado nos objetivos e nas questões de pesquisa apresentadas, considerando os desafios globais das mudanças climáticas e a necessidade urgente de se reduzir as emissões de gases de efeito estufa de forma mais acelerada. A hipótese é, portanto, uma suposição a ser confirmada ou rejeitada pelo trabalho. A hipótese nula seria a de que esses modelos não seriam úteis ou apropriados para tais análises comparadas e sugestões de apoio a políticas públicas de clima e energia.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em sete capítulos. O presente Capítulo 1, consiste em uma breve introdução, onde são apresentadas a importância do tema, a justificativa do trabalho, a hipótese, os objetivos e a estrutura do trabalho. O Capítulo 2 oferece um contexto da pesquisa, por meio de revisão de literatura sobre aspectos relacionados à agenda internacional de mudança do clima, às NDCs e às Calculadoras 2050, que são elementos importantes à compreensão dos capítulos subsequentes. O Capítulo 3 traz a metodologia do trabalho, onde são descritos os modelos utilizados e como a pesquisa foi realizada. O Capítulo 4 apresenta as análises nacionais e regionais, enquanto o Capítulo 5, as análises globais, ambos contendo um detalhamento dos respectivos setores energéticos, NDCs e calculadoras, assim como resultados e discussão sobre as simulações realizadas. Em seguida, o Capítulo 6 traz a conclusão da pesquisa, onde são resumidos os principais achados e consequências do estudo, à luz da hipótese e objetivos inicialmente apresentados, assim como são oferecidas recomendações de trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas ao longo da dissertação.

2. Contexto da Pesquisa

Este capítulo tem por finalidade fornecer uma visão geral dos principais conceitos utilizados na pesquisa e que serão importantes à compreensão dos resultados. Muitos dos temas abordados aqui serão aprofundados nos capítulos 4 e 5. Inicialmente, é apresentado um contexto sobre as mudanças climáticas e seu impacto nas diretrizes para a transição energética. Em seguida, traça-se um panorama das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e das calculadoras climáticas, tanto em nível nacional, quanto global.

2.1 Mudanças climáticas e os impactos da transição energética

As mudanças climáticas causadas pelas atividades humanas estão provocando perturbações perigosas e generalizadas na natureza, afetando vidas ao redor do mundo. Mesmo com os esforços para reduzir os riscos, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), em seu sexto relatório de avaliação (AR6), relata que as pessoas e os ecossistemas menos capazes de lidar com essas alterações são os mais atingidos. Nesse sentido, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 13 destaca que todos os países enfrentam os efeitos adversos das mudanças climáticas globais, embora o nível desses impactos e a capacidade de adaptação possam variar substancialmente. As de GEE continuam a crescer, com os níveis atuais sendo 50% maiores do que em 1990. Mudanças climáticas estão gerando consequências que já podem ser identificadas como irreversíveis a longo prazo, caso medidas urgentes não sejam tomadas (PNUD Brasil, 2021).

Na última década, desafios domésticos e internacionais têm pressionado os líderes mundiais a priorizar as mudanças climáticas no topo da agenda política. Este desafio redefine muitos aspectos das transições energéticas e tecnológicas (De La Peña *et al.*, 2022). De acordo com o relatório de emissões do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (UNEP, 2021), as emissões globais de GEE atingiram 59,1 GtCO₂e (giga toneladas de CO₂ equivalente) em 2019, principalmente impulsionadas pelo uso de combustíveis fósseis em setores como geração de energia elétrica, transporte e processos industriais. Isso destaca a necessária redução dessas emissões associadas ao setor energético global.

O setor energético apresenta uma grande variedade de tecnologias, com diferentes níveis de emissões; entretanto, as estruturas dos sistemas atuais estão predominantemente

voltadas para fontes de energia fóssil, que são grandes emissores de carbono. Isso cria um desafio considerável de reestruturação de cadeias produtivas de diversos setores da economia, destacando a necessidade urgente de políticas energéticas que apoiem efetivamente essa transformação (Losekann *et al.*, 2019). Cabe também destacar que o setor energético é complexo e envolve múltiplas instituições e atores, tanto privados quanto públicos, abrangendo aspectos econômicos, sociais, ambientais, geopolíticos e tecnológicos (Ferreira *et al.*, 2021). Por outro lado, a transição energética global promete importantes oportunidades de desenvolvimento social e econômico. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), mais de 10 milhões de pessoas em todo o mundo já estão empregadas no setor de energia renovável (IRENA, 2018b; Quitzwow *et al.*, 2019).

Os recentes sinais no setor energético indicam que uma grande transformação está em curso e se refletirá nas próximas décadas (Kober *et al.*, 2020). Segundo a IRENA, o objetivo principal da atual transição energética é transformar um sistema energético global baseado em combustíveis fósseis, em um sistema de zero emissões líquidas. Espera-se que essa consolidação ocorra na segunda metade do século atual, devido aos esforços globais para mitigar as mudanças climáticas, causadas pelo impacto das atividades humanas no sistema terrestre (IRENA, 2023).

O setor de energia tem um longo histórico de modelos energéticos que sustentam as principais políticas energéticas (Strachan *et al.*, 2009; Elizondo *et al.*, 2017). Cenários de energias alternativas frequentemente lidam com questões difíceis de definir, como a linha de base, as taxas de mudança tecnológica e os mecanismos de substituição do próprio modelo (Ockwell *et al.*, 2008; Strachan *et al.*, 2009; Söderholm *et al.*, 2011; Elizondo *et al.*, 2017). Cenários energéticos são permeados por incertezas, frequentemente decorrentes de variações nas fontes de dados e classificações. Quando informações comparáveis se tornam disponíveis e as premissas são atualizadas, decisões mais informadas podem ser tomadas em todas as escalas (Devezas *et al.*, 2008; Elizondo *et al.*, 2017). Portanto, o uso de ferramentas de modelagem de sistemas integrados, com classificação de dados e metodologias comuns, pode fornecer informações valiosas para formuladores de políticas. A análise fundamentada de apoio ao processo decisório ao ou planejamento de contingência sob uma variedade de cenários alternativos, especialmente cenários normativos que delineiam caminhos alternativos, é crucial para se alcançar os objetivos desejados (Smil, 2000; Elizondo *et al.*, 2017).

2.2 Convenção do Clima e Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC)

As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) surgiram como um componente essencial do Acordo de Paris, um marco histórico nas negociações climáticas internacionais. O Acordo de Paris foi adotado durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) em dezembro de 2015, com o objetivo de fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas. As NDCs foram propostas como uma maneira de superar as limitações do Protocolo de Kyoto, que estabelecia metas de redução de emissões apenas para os países desenvolvidos, deixando de fora os países em desenvolvimento, que também são grandes emissores de gases de efeito estufa (GEEs). Com as NDCs, todos os países são incentivados a contribuir para os esforços globais de mitigação, dentro de suas próprias capacidades e circunstâncias (UNFCCC, 2015), embora ainda não existam formas de retaliação internacional ao seu descumprimento.

Inicialmente, as NDCs eram conhecidas como INDCs (Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada). As INDCs representavam os compromissos voluntários de cada país para reduzir suas emissões de GEEs e enfrentar os desafios das mudanças climáticas. Elas eram “pretendidas” até que o país ratificasse o Acordo de Paris, tornando-se automaticamente NDC. Portanto, as NDCs são um componente central aos esforços globais para combater as mudanças climáticas (UNFCCC, 2015). Cerca de 198 países e a União Europeia aderiram ao Acordo de Paris, comprometendo-se a implementar suas respectivas NDCs. No entanto, algumas exceções notáveis surgiram, como a retirada temporária dos Estados Unidos durante a administração do governo Trump (jan/2017 a jan/2021), que anunciou logo nos primeiros meses de seu mandato a intenção de se retirar do Acordo de Paris, processo finalizado apenas em novembro de 2020. No entanto, sob a administração Biden (jan/2021 até o presente, ou seja, set/2024), os Estados Unidos reintegraram prontamente o Acordo de Paris, em fevereiro de 2021, reafirmando seu compromisso com a mitigação das mudanças climáticas e a implementação das NDCs (*The White House*, 2021).

As NDCs delineiam os planos de ação climática pós-2020. Essas metas têm como objetivo principal a redução de emissões de GEE até 2030 e desempenham um papel fundamental na luta para frear o avanço das mudanças climáticas, funcionando como uma métrica global para a colaboração entre os países (Silva *et al.*, 2017). Além disso, alguns

países signatários do Acordo de Paris estenderam suas metas até 2050, buscando a obtenção de emissões líquidas zero (net-zero), incluindo o Brasil. Essas metas de longo prazo refletem um compromisso mais amplo com a sustentabilidade e resiliência climática, indo além dos objetivos imediatos delineados nas NDCs de 2030.

Em consonância com as determinações do Acordo de Paris e suas NDCs, surge a necessidade de uma rápida transição na matriz global de energia, uma vez ser esse o maior desafio à mitigação de emissões de GEE, a exceção do Brasil e alguns poucos países, onde o desmatamento e a produção agropecuária têm sido os principais vetores, ainda que as emissões de energia do Brasil também sejam relevantes. Por isso, a descarbonização do setor de fornecimento de energia está presente de forma significativa nas NDCs. (Nunes, 2022).

Especialistas do setor indicam que as metas estabelecidas podem ser alcançadas principalmente por meio da implantação intensiva de tecnologias renováveis (Nunes, 2022). Por meio das NDCs, os países têm a oportunidade de acelerar a transição energética e promover a sustentabilidade ambiental. A implementação bem-sucedida das NDCs pode resultar em uma maior diversificação da matriz energética, uma redução significativa das emissões de GEE, a criação de empregos verdes e o fomento ao desenvolvimento sustentável (De La Peña *et al.*, 2022), desde que implementadas com equilíbrio socioambiental.

No entanto, é importante ressaltar que as NDCs são compromissos voluntários e variam entre os países em termos de ambição e abrangência. Além disso, a implementação das NDCs enfrenta desafios, como a mobilização de recursos financeiros, a capacidade institucional e a superação de barreiras tecnológicas (de Oliveira, 2021). Portanto, é necessário um esforço contínuo e colaborativo entre os países para garantir que as NDCs sejam efetivamente implementadas e contribuam para uma transição energética bem-sucedida, em direção a um futuro de baixo carbono (McCollum *et al.*, 2018).

Nesse sentido, as partes da UNFCCC têm discutido o *Global Stocktake*, que é um processo de avaliação global estabelecido pelo Acordo de Paris para revisar o progresso das ações climáticas em relação às metas de longo prazo do acordo. O *Global Stocktake* avalia o progresso coletivo, examinando como as NDCs e as políticas e medidas implementadas estão contribuindo para limitar o aumento da temperatura média global a bem abaixo de 2°C, e preferencialmente a 1,5°C, em comparação com as emissões

projetadas pelo cumprimento das NDCs, identificando sérias discrepâncias (UNFCCC, 2023).

2.3 Calculadoras 2050

As Calculadoras 2050 (em inglês, 2050 Calculators) são modelos baseados em dinâmica de sistemas (system dynamics) voltados à simulação de cenários de mitigação de emissões de GEE. A dinâmica de sistemas é uma abordagem que utiliza modelos baseados na variação de estoques e fluxos ao longo do tempo para entender e simular sistemas complexos. Esses modelos podem ser desenvolvidos em diversos tipos de software ou linguagens, como Stella, Vensim, C, Python, MS Excel e KNIME. A abordagem foi inicialmente desenvolvida pelos trabalhos do professor Jay Forrester do MIT nas décadas de 1960 e 1970 e, posteriormente, utilizada por diversos pesquisadores (Meadows, 2022).

As Calculadoras 2050 representam uma iniciativa internacional, capitaneada inicialmente pelo Governo Britânico e instituições como o Imperial College London, visando desenvolver modelos de energia que fossem relativamente simples de serem utilizados, em interface web, com acesso livre e totalmente transparentes em termos de metodologia, tendo como público-alvo governos, lideranças empresariais, organizações não-governamentais (ONGs) e pesquisadores interessados no tema de descarbonização de alguma região ou país. Esse projeto teve a intenção de ajudar a desenvolver políticas baseadas em evidências, para a definição de macro estratégias e não para análise de investimentos em projetos específicos. A ideia original foi desenvolver uma calculadora para uso do Reino Unido, mas o bem-sucedido projeto agora está sendo usado em mais de 30 países, incluindo o Brasil (Imperial College London, 2023).

A iniciativa das Calculadoras 2050 teve início no Reino Unido, que desenvolveu sua calculadora nacional (UK 2050 Calculator), em 2011, para analisar seu plano de mitigação de carbono (*The Carbon Plan*). Os responsáveis pelo desenvolvimento desse model estavam então lotados no antigo Department of Energy and Climate Change (DECC), atualmente, Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ), e trabalharam em conjunto para criar a ferramenta.

Essas equipes eram compostas por profissionais de diversas áreas, incluindo modelagem de sistemas energéticos, política de mudanças climáticas, economia e ciência ambiental. Eles colaboraram para desenvolver os modelos, estabelecimento de premissas

e dados subjacentes utilizados na Calculadora Britânica, que posteriormente inspirou outras iniciativas globais. É importante ressaltar que a composição exata da equipe pode variar, mas o processo de criação envolveu a expertise multidisciplinar desses especialistas, incluindo parceiros de instituições de pesquisa (Imperial College London, 2023). Similarmente, outros países com calculadoras disponíveis construíram os seus modelos, ou seja, envolvendo especialistas locais em seu desenvolvimento, inclusive para dar legitimidade ao processo. A Tabela 1 apresenta os *links* disponíveis para acesso as calculadoras utilizadas nesse estudo.

Tabela 1 - *Links* das calculadoras climáticas.

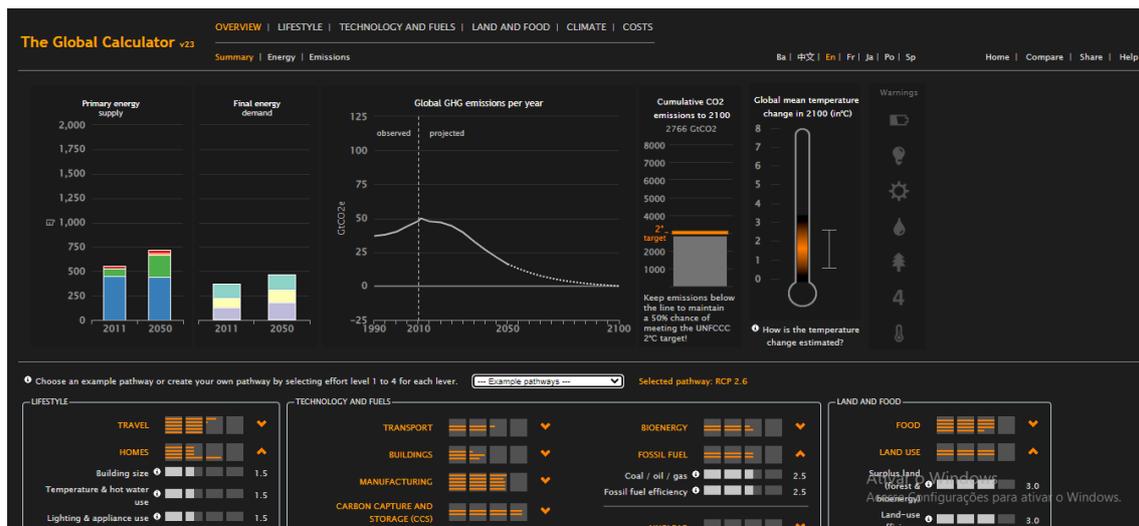
Países	Links
Global	www.globalcalculator.net
Brasil	https://brazil.energypolicy.solutions/scenarios/home
Índia	https://iess2047.gov.in
Estados Unidos	https://gain.ornl.gov/
União Europeia	https://www.european-calculator.eu/

Fonte: Elaboração da autora, com base em dados das Calculadoras (2024).

2.3.1 Calculadoras global (GC) e nacionais

Tanto a calculadora global, quanto as calculadoras nacionais possuem habilidades de simular cenários de emissões anuais e cumulativas dos principais GEE (dióxido de carbono, metano e óxido nitroso) decorrentes de um grupo de escolhas tecnológicas, bem como a escolha de um estilo de vida médio da população (GC, 2017). Essas escolhas são definidas pelo usuário da calculadora, que utiliza essas entradas como base para cálculos integrados entre os diferentes setores da economia, com base em dinâmica de sistemas (Strapasson *et al.*, 2020). A GC assim como as calculadoras nacionais compartilham de abordagens metodológicas muito parecidas, possibilitando criação e análise de cenários existentes, para tópicos como: estilo de vida, tecnologias e combustíveis, uso da terra e comida, clima e informações sobre custos (Elizondo *et al.*, 2017). É importante entender que o algoritmo da ferramenta foi desenvolvido de forma que todos os temas estejam integrados e conectados, para que a GC reaja ao cenário levando em consideração todas as variáveis no painel “*overview*” como mostrado na Figura 1, obtida por captura de tela da versão online da calculadora global. A Figura 1 é aqui apresentada de forma ilustrativa, apenas para que se tenha uma ideia do tipo de interface web apresentada.

Figura 1 - Interface web da visão geral da calculadora global.



Fonte: captura de tela obtida pela autora, utilizando a Calculadora Global 2050.

A principal diferença entre a GC e as calculadoras nacionais é o escopo geográfico e a abrangência das análises. Enquanto a primeira visa fornecer uma visão global das trajetórias energéticas e de emissões até 2050, as calculadoras nacionais estão focadas em um país específico. A GC, por exemplo, permite que os usuários explorem diferentes cenários de políticas e tecnologias em escala global, considerando a interação entre os países e as interdependências no sistema energético global, incluindo projeções sobre a mudança da temperatura média global (Chilvers *et al.*, 2017). Um modelo similar à CG, porém mais resumido e com diferentes premissas e abordagens metodológicas para a escala global, é o En-Roads, desenvolvido pelo MIT Sloan e a Creative Interactive (Climate Interactive, 2024.). Para efeitos desta dissertação, contudo, apenas os modelos 2050 Calculator foram utilizados, por consistência metodológica para comparação de cenários.

Quanto às calculadoras nacionais, elas são projetadas para fornecer análises mais detalhadas e específicas para um determinado país (Strapasson *et al.*, 2020). As calculadoras nacionais consideram as características e condições nacionais, como a matriz energética atual, o mix de fontes de energia disponíveis, as políticas nacionais e as metas climáticas do país em questão. Essas calculadoras são úteis para avaliar as opções de políticas energéticas e os caminhos de transição específicos para um país, levando em consideração suas circunstâncias particulares. As calculadoras nacionais geralmente são desenvolvidas pelos governos, institutos de pesquisa ou organizações relacionadas à energia e ao meio ambiente de cada país. Elas podem ser adaptadas às necessidades e contextos específicos de cada nação, fornecendo análises mais detalhadas e

personalizadas para apoiar a tomada de decisões em nível nacional (Strapasson *et al.*, 2020).

3 Metodologia

Os procedimentos metodológicos baseiam-se na revisão de literatura, na utilização de modelos de dinâmica de sistemas (Calculadoras 2050) e na análise internacional comparada. As etapas metodológicas são as seguintes:

- i. **Levantamento de Referencial Teórico:** foi realizada uma revisão de literatura sobre o contexto internacional das mudanças climáticas, com foco na transição energética global e na utilização de modelos baseados em dinâmica de sistemas, como as Calculadoras 2050. Foram abordados conceitos e definições fundamentais, bem como os princípios da modelagem utilizada.
- ii. **Simulação de Cenários Energéticos:** foram simulados cenários energéticos utilizando as calculadoras globais, além das calculadoras específicas de países e regiões (como a União Europeia). Essas simulações permitiram análises das possíveis trajetórias energéticas. Neste trabalho, a União Europeia é considerada como 'região', pois, como um bloco econômico, suas políticas energéticas e climáticas têm um impacto significativo nas emissões globais. Essas simulações permitiram análises das possíveis trajetórias energéticas.
- iii. **Análise das NDCs e Foco Energético:** foram analisadas as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) dos países selecionados, com foco específico no setor de energia. A lista de países inclui Brasil, Índia, Estados Unidos e União Europeia. A China também foi considerada, mas sua calculadora está temporariamente indisponível na versão em inglês.
- iv. **Comparação de Cenários Simulados:** foram comparados os cenários simulados com as metas das NDCs utilizando as calculadoras nacionais, identificando-se oportunidades de avanço nas estratégias de mitigação e destacando áreas onde melhorias significativas podem ser alcançadas.
- v. **Projeção de Impactos Futuros Globais:** esta etapa envolveu a projeção de impactos futuros através de três cenários do IPCC (RCP2.6, RCP6.0 e RCP8.5) utilizando a Calculadora Global. Foi conduzida uma análise de sensibilidade utilizando diferentes tecnologias de energias renováveis para entender os impactos globais de cada fonte energética. Além disso, foram desenvolvidas trajetórias usando análise de sensibilidade de forma agregada para fornecer dados sobre diferentes cenários de emissões de GEE ao longo do tempo. A análise buscou fornecer uma visão geral das interações entre governança climática e a cooperação

internacional e seu impacto no cumprimento das metas das NDCs para a transição energética, enfatizando a necessidade de colaboração entre países para uma descarbonização eficiente e sustentável do sistema energético global.

3.1 NDCs e simulação nas calculadoras nacionais

Nesta etapa, foram selecionados países de diferentes regiões e a União Europeia, para uma análise das NDCs acordadas e atualizadas, com recortes específicos para energia, comparando com simulações aqui propostas, utilizando suas respectivas calculadoras nacionais ou regionais. Os países foram escolhidos com base em alguns critérios previamente definidos, levando-se em consideração:

- a. Possuir NDC;
- b. Ter altas emissões de GEE, em relação à média global;
- c. A respectiva Calculadora 2050 deve estar publicada e disponível em inglês;
- d. Ser uma economia influente em sua região;
- e. Ter população significativa (superior a 200 milhões de habitantes).

Com base nos critérios estabelecidos, além da Calculadora Global, foram selecionadas as seguintes calculadoras: Brasil, Índia, Estados Unidos, e União Europeia. China, em particular, possui calculadora, porém, disponível apenas em mandarim. A decisão de optar por um determinado tamanho populacional foi motivada pela compreensão de que, em geral, uma população com mais de 200 milhões de habitantes tem o potencial de gerar um impacto expressivo nas emissões globais. O tamanho da população está diretamente relacionado ao consumo de energia, produção de resíduos, demanda por recursos naturais e níveis de atividades econômicas, influenciando assim as emissões de gases de efeito estufa. Uma população maior geralmente implica em um maior consumo de energia, especialmente nos setores de transporte, indústria e residencial, embora o nível de renda per capita e outros aspectos socioeconômicos também sejam relevantes. Isso pode resultar em um aumento nas emissões de gases de efeito estufa decorrentes da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural.

Além disso, buscou-se realizar uma análise de maior impacto global e que fosse relativamente comparável entre os países de maior emissão. No entanto, esse critério não reduz a importância dos esforços de mitigação em países menos populosos ou de menor

emissão. Buscou-se, aqui, focar em análises macroestratégias de mitigação, com alto potencial de impacto global.

Após análise das metas estabelecidas para o setor de energia nas NDCs, foram simulados cenários energéticos, nas calculadoras dos países, tendo como objetivo identificar se os caminhos a percorrer serão suficientes para o controle das ações climáticas. Os modelos podem ser acessados livremente de forma online (Tabela 1). Além disso, essas simulações permitiram identificar se as NDCs estão sendo cumpridas conforme os prazos inicialmente planejados.

As calculadoras nacionais consideram particularidades de cada país, já que foram concebidas por especialistas locais e instituições experientes no assunto. A calculadora brasileira, por exemplo, que foi originalmente desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em colaboração com a COPPE/UFRJ, possui uma particularidade de já possuir as metas das NDCs apontadas nos gráficos. A versão atual da calculadora brasileira chama-se Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões (Sinapse) e foi desenvolvida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e instituições parceiras.

3.2 Descrição dos modelos e premissas para elaboração de cenários globais

A Calculadora Global (GC, do inglês *Global Calculator*) foi desenvolvida utilizando referências climáticas existentes, incluindo os dados da *IEA energy data* da Agência Internacional de Energia, do modelo *TIAM (TIMES Integrated Assessment Model)* da *University College London (UCL)* (para estimativas de custo) e dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), entre outras fontes. De acordo com Strapasson *et al.* (2020), envolvidos em seu desenvolvimento, a GC combina todos os setores da economia global em um único modelo sistêmico integrado, derivando variáveis de interconexão entre os diferentes setores ao longo do tempo.

A calculadora permite diversas análises de cenários pré-estabelecidos e a simulação e projeção de novos, em diversos níveis de mitigação de emissões, inclusive tecnológicos, conforme abordado nas seções subsequentes. Além disso, a GC permite uma nova abordagem para avaliar a dinâmica de demanda e oferta de energia, inclusive fluxos representados em diagramas de Sankey. Foram realizadas análises comparativas

de três cenários do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), os *Representative Concentration Pathways* (RCPs), já simulados pela calculadora e disponíveis publicamente em sua interface. Os RCPs descrevem diferentes cenários socioeconômicos e tecnológicos que levam a diferentes níveis de emissões de GEE ao longo do tempo. Eles foram desenvolvidos para cobrir uma ampla gama de possíveis futuros climáticos, quanto maior o número do RCP, maior é o forçamento radiativo e, portanto, o aquecimento global projetado. Os cenários RCP que serão utilizados nessa análise são:

- RCP 2.6: É um cenário de mitigação, que representa uma trajetória em que as emissões são rapidamente reduzidas e as concentrações de GEE estabilizam em um nível relativamente baixo. Esse cenário tem como objetivo limitar o aquecimento global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais (IPCC, 2014).
- RCP 6.0: É um cenário intermediário-alto, que representa uma trajetória de emissões mais elevadas, sem ações significativas de mitigação. Esse cenário resulta em concentrações atmosféricas mais altas de GEE e um aquecimento global significativo até o final do século (IPCC, 2014).
- RCP 8.5: É um cenário de alto forçamento radiativo, que representa uma trajetória em que as emissões de GEE continuam aumentando ao longo do tempo. Esse cenário resulta em concentrações atmosféricas muito altas de GEE e um aquecimento global substancialmente maior (IPCC, 2014).

De forma a complementar o uso da GC, foi realizada uma análise de sensibilidade tecnológica, selecionando a rota da IEA 4DS, Figura 2, como linha de base e simulando as emissões de GEE a partir do estímulo de tecnologias de geração de energia renováveis. A versão da GC (v. 23) utilizada nesta pesquisa é a mais recente disponível. Essa figura também mostra (à direita) um exemplo do detalhamento das categorias contempladas, com espécie alavancas (*levers*) de mitigação, às quais possuem quatro níveis (*levels*) de aumento gradual do esforço de mitigação pretendido até 2050, sendo o nível 1 um cenário pessimista e o nível 4 altamente ambicioso, embora ainda tecnicamente possível.

Figura 2 - Cenário IEA 4DS e destaque para quadro de tecnologias renováveis



Fonte: captura de tela obtida pela autora, utilizando a Calculadora Global 2050.

Nesse tipo de análise, diferentes variáveis tecnológicas são alteradas dentro do modelo para avaliar seu impacto nas métricas desejadas. Essa abordagem pode ajudar a identificar as tecnologias mais promissoras, avaliar os riscos e incertezas associados a certas tecnologias e orientar a tomada de decisões estratégicas para promover a transição energética de forma mais eficiente e sustentável.

Para fornecer dados e informações sobre diferentes caminhos de emissões de GEE ao longo do tempo, foram desenvolvidos também trajetórias usando análise de sensibilidade de forma agregada de emissões até 2050. Essa abordagem metodológica permitiu analisar como diversos cenários podem impactar as emissões globais, levando em consideração variáveis como adoção de tecnologias de energias renováveis, e mudanças nas políticas energéticas. Além disso, a análise destacou a importância da cooperação internacional na implementação de políticas e estratégias eficazes para a transição energética global.

3.3 Limites e incertezas metodológicas

É importante ressaltar que as análises e modelos propostos neste projeto apresentam diversas incertezas. Essas incluem: a dificuldade de representação refinada das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) nas calculadoras utilizadas; possíveis diferenças metodológicas entre os modelos empregados; a constante atualização das bases de dados utilizadas como linha de base; as mudanças nas perspectivas tecnológicas; e futuras atualizações nos normativos internacionais no âmbito da UNFCCC, entre outras variáveis. Tais incertezas devem ser levadas em consideração ao interpretar e generalizar os resultados deste estudo.

Além disso, esclarecer que as calculadoras, apesar de possuírem objetivos comuns, por exemplo, apoiar a tomada de decisão e dar suporte a políticas públicas, cada uma delas possui suas próprias especificidades e por diversas vezes formatos de dados diferentes. A utilização e análise dos dados dependerão de fatores atrelados não apenas ao recorte que está sendo feito no projeto, mas também da característica individual de cada calculadora. As incertezas específicas de cada modelo, identificadas ao longo das análises realizadas, estão descritas nos resultados e discussão desta pesquisa, apresentados nos Capítulos 4 e 5.

4 Análises nacionais e regionais

Neste capítulo, são apresentadas análises nacionais e regionais, com foco em diferentes cenários de emissões que consideram os impactos do setor energético no Brasil, Índia, Estados Unidos e União Europeia. Esta análise abrangente inclui uma avaliação das trajetórias de cada país em relação às suas metas climáticas, destacando as políticas energéticas adotadas e seus efeitos projetados nas emissões de gases de efeito estufa. Além disso, foi realizada uma análise comparativa, ressaltando os principais resultados alcançados por cada país e as tendências observadas ao longo do tempo. Essa abordagem fornece *insights* para compreender como diferentes estratégias nacionais podem contribuir para mitigar as mudanças climáticas globais.

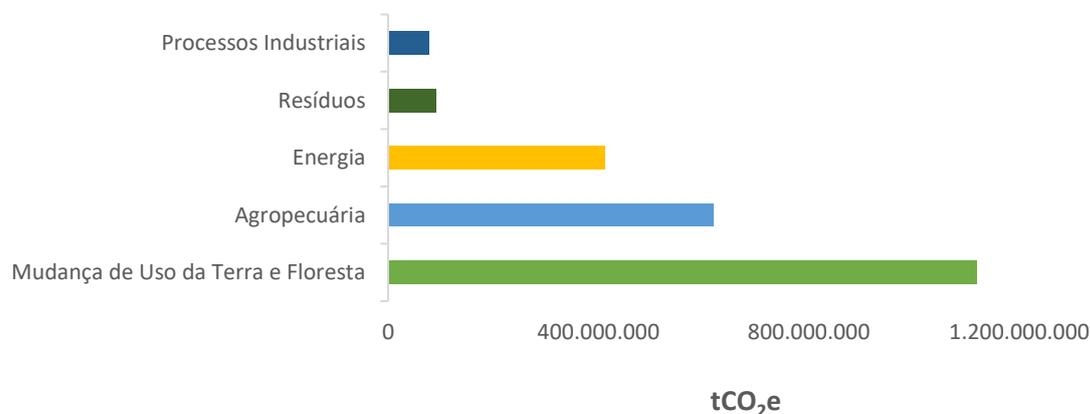
4.1 Brasil

O Brasil detém uma importância "histórica, simbólica e material" (BRICS Policy Center, 2023) no contexto das discussões internacionais sobre meio ambiente e clima. Com uma população estimada em 203 milhões de pessoas e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,754, colocando-o na 87ª posição global e o país figura como a 9ª maior economia do mundo. (Banco Mundial, 2022; Informoney, 2023). O Brasil é o maior país da América do Sul e o quinto maior país do mundo, com um território 8,5 milhões de km² e possui cerca de 12% das reservas de água doce e 20% da diversidade biológica do planeta, distribuída através de seis biomas e pela costa marinha de 3,5 milhões de km² (MMA, 2024). Segundo o "Emissions Gap Report" do PNUMA, em 2020, o Brasil ocupou a 7ª posição na lista dos maiores emissores globais de GEE, levando em conta o inventário de emissões do setor de uso e mudança de uso da terra (LULUCF) (UNEP, 2022).

A Figura 3 apresenta dados da plataforma do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), que é a principal plataforma de monitoramento de emissões de gases de efeito estufa na América Latina e uma das maiores bases de dados nacionais de emissões do mundo (SEEG, 2024). As emissões brasileiras são em grande parte devido ao uso da terra e ao desmatamento de florestas, seguido pelo setor agropecuário; entretanto, apesar do país possuir uma matriz energética mais limpa que a média global, o setor energético também possui sua parcela significativa nas emissões brasileiras. Por outro lado, o Brasil possui um grande potencial para realizar uma transição bem-sucedida de sua matriz energética, devido ao perfil de suas energias

renováveis, às condições geográficas favoráveis, à disponibilidade de recursos energéticos e à expertise acumulada no setor.

Figura 3 - Ranking de emissões brasileiras por setor em 2022.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SEEG (2024).

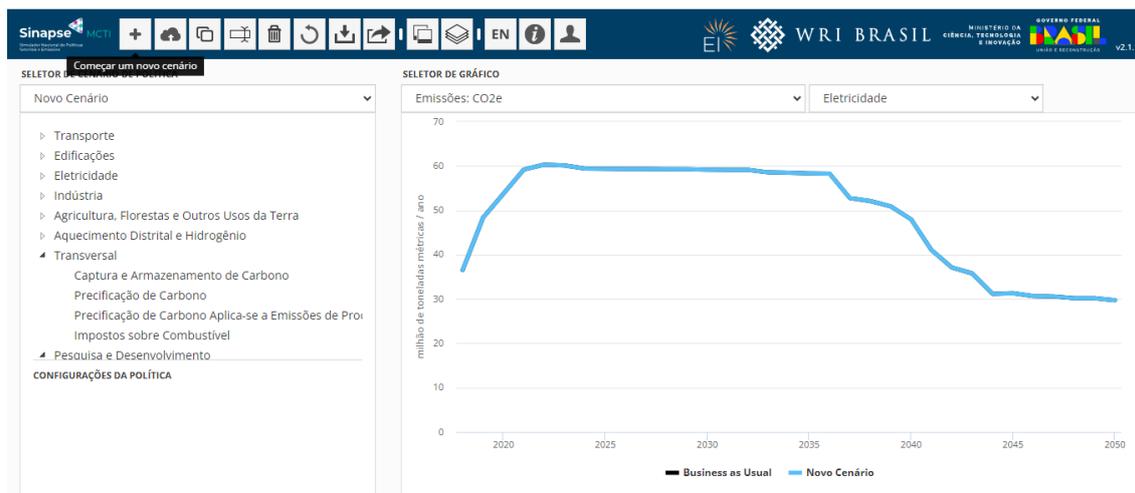
Até o momento, o Brasil submeteu à UNFCCC quatro versões de sua NDC. A primeira delas, foi enviada às Nações Unidas em 2015. Desde então, foram realizadas três atualizações, nos anos de 2020, 2022 e 2023. Apesar do considerável número de atualizações, a NDC brasileira tem seguido uma trajetória contrária ao seu propósito inicial de se tornar mais ambiciosa ao longo do tempo. As versões de 2020 e 2022 adotaram uma nova base de cálculo para as emissões, resultando em metas menos desafiadoras em comparação com os objetivos anteriores. No entanto, em novembro de 2023, a versão mais recente da NDC do Brasil retornou aos parâmetros iniciais, resultando em uma espécie de "volta às origens" para a NDC nacional (Talanoa, 2023).

A NDC brasileira não estabelece metas claras para o setor energético, ao contrário de alguns outros países, como a Índia. A versão corrigida da NDC do Brasil de 2023 define limites absolutos para as emissões de gases de efeito estufa nos anos de 2025 e 2030, abandonando a meta anterior de redução percentual com base em 2005. Além disso, reafirma-se o objetivo de longo prazo de atingir a neutralidade climática até 2050. O exercício proposto neste estudo, como mencionado anteriormente, consiste em comparar os cenários energéticos com as metas de emissões globais da NDC dos países selecionados. Para o caso brasileiro, a análise foi conduzida de forma a compreender como o setor energético pode e deve impactar nas emissões gerais do país, e como esse setor influencia no alcance das metas para os cenários de 2030 e 2050.

4.1.1 Calculadora Brasileira – SINAPSE

O Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões (SINAPSE), Figura 4, é como foi nomeado a versão 2.1.1 da calculadora de cenários climáticos brasileira. Esse simulador é o instrumento oficial do governo brasileiro utilizado para projetar cenários de implementação de políticas públicas setoriais e avaliar o potencial de redução de emissões de GEE, com o objetivo de alcançar as metas estipuladas pelo país ao Acordo de Paris. A ferramenta possibilita a simulação de cenários futuros utilizando 48 políticas destinadas a seis setores distintos, que vão desde o desmatamento até o transporte rodoviário. Além disso, ela permite avaliar o número de vidas preservadas (mortes evitadas) devido à redução nas emissões, entre outros aspectos (MCTI, 2024). Apesar das diversas possibilidades, este trabalho concentra-se especificamente no setor de energia e no impacto desse setor nas emissões dos cenários futuros. Portanto, o uso da calculadora foi direcionado para esse objetivo específico.

Figura 4 - Interfaceweb do SINAPSE.



Fonte: captura de tela obtida pela autora, utilizando a Sinapse.

4.1.1.1 Cenários

A seguir, serão apresentados dois cenários de implementação de políticas setoriais elaborados no Sinapse. O primeiro é o cenário BAU (*business as usual*), que representa a continuidade dos padrões de emissões observados no ano-base de 2018, sem alterações significativas. O objetivo foi analisar o comportamento das emissões de energia no contexto geral, considerando a falta de mudanças expressivas no setor e a eventual ausência de sucesso na transição energética do país ao longo das próximas décadas. Foram examinados, também, o impacto do setor energético no cumprimento das metas estabelecidas pela NDC brasileira. O segundo cenário analisado é conhecido como

"Políticas de P&D sem arrependimento", uma abordagem alternativa ao cenário BAU e disponível na própria calculadora. Nesse cenário, enfatiza-se o estímulo à aplicação de políticas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) no Brasil. A designação "sem arrependimento" é utilizada porque as medidas adotadas são do tipo "*no-regret*", ou seja, são vantajosas e lucrativas ao longo da vida útil da tecnologia. Assim como no primeiro cenário, o objetivo de analisar este cenário foi de entender os impactos das emissões de energia com o incentivo de políticas públicas.

4.1.1.1.1 Cenário BAU

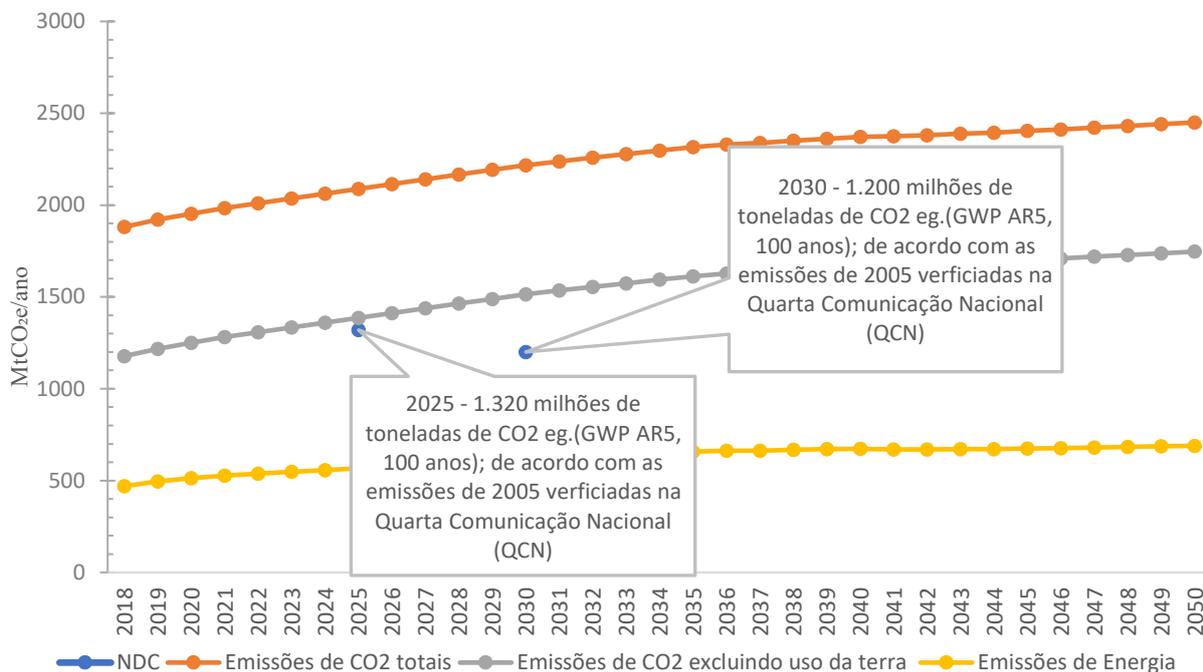
Um cenário BAU, ou cenário de base, é uma projeção que assume que as atividades e práticas atuais continuarão inalteradas no futuro, sem a implementação de novas políticas, estratégias ou intervenções significativas. De acordo com o WRI Brasil (2021), o cenário BAU foi construído no SINAPSE a partir de projeções calibradas até 2050, utilizando os cenários elaborados para o Brasil com base em fontes de dados nacionais e internacionais. Essa abordagem permitiu identificar e corrigir inconsistências nas projeções, muitas vezes derivadas de inadequações nos dados de entrada considerados em cada setor. As referências utilizadas para a construção desse cenário na calculadora foram:

- MOP: Projeto opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil, ano 2017;
- BEN: Balanço Energético Nacional, ano 2019;
- ICCT: *International council on clean transportation*;
- EIA: *U.S Energy Information Administration, ano 2019*.
- IEA: *World Energy Outlook*, ano 2018;
- *Commit Project*.

Esse cenário confirma os dados anteriormente apresentados sobre o impacto das emissões do país relacionadas ao uso da terra e floresta. a Figura 5 ilustra a projeção das expectativas anuais das emissões até 2050, considerando as emissões totais, excluindo o uso da terra, as emissões de energia e as metas da NDC para os anos de 2025 e 2030. Os dados apresentados indicam que, em cenário BAU, as emissões totais tendem a continuar crescendo e se afastando consideravelmente dos compromissos estabelecidos pelo Brasil em sua NDC. É interessante observar que mesmo sem o impacto das emissões de uso da

terra, não será possível alcançar as metas desejadas. Isso enfatiza a importância das emissões do setor energético no contexto brasileiro

Figura 5 - Emissões brasileiras de CO₂- cenário BAU.



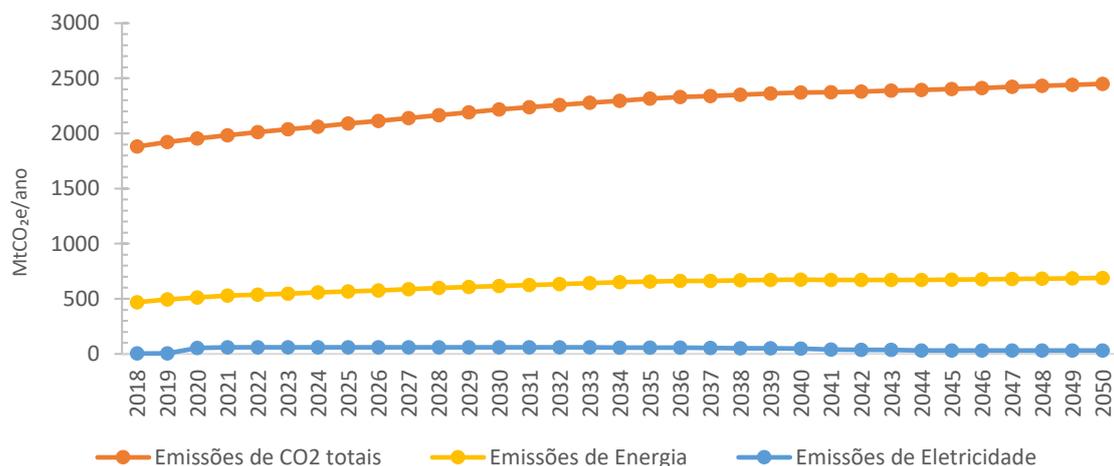
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

É importante ressaltar que o Brasil possui uma matriz energética com características muito diferentes da matriz mundial. Somando-se lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica, solar e outras fontes renováveis, as energias renováveis no país totalizam 49,1%, representando quase metade da matriz energética primária (EPE, 2024). Entretanto, apesar de possuir uma matriz com alto índice de renováveis, principalmente quando comparada globalmente, e poder se orgulhar disso no âmbito internacional, é necessário lembrar que 50,9% são provenientes de fontes não-renováveis, o que demonstra ainda uma significativa dependência dessas fontes. Isso corresponde a um aspecto negativo, especialmente considerando os compromissos assumidos na NDC em relação à redução das emissões de gases de efeito estufa. Apesar de não ser o setor que mais emite GEE, o Brasil precisa dar especial atenção para alcançar a independência dos combustíveis fósseis e completar sua transição energética de forma justa e sustentável.

Por outro lado, o setor elétrico nacional apresenta um percentual ainda mais significativo do uso de fontes renováveis. Em 2023, a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira atingiu impressionantes 89,2% (EPE, 2024). Esses dados são

refletidos na Figura 6, onde há uma comparação entre fontes de emissão, com um recorte especial para as emissões de eletricidade. Mesmo no cenário BAU, as emissões provenientes desse setor oscilam entre estabilidade e queda, resultado de importantes avanços nos últimos anos.

Figura 6 - Comparação de emissões brasileiras de CO₂ totais, setor energético e recorte para eletricidade - cenário BAU.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

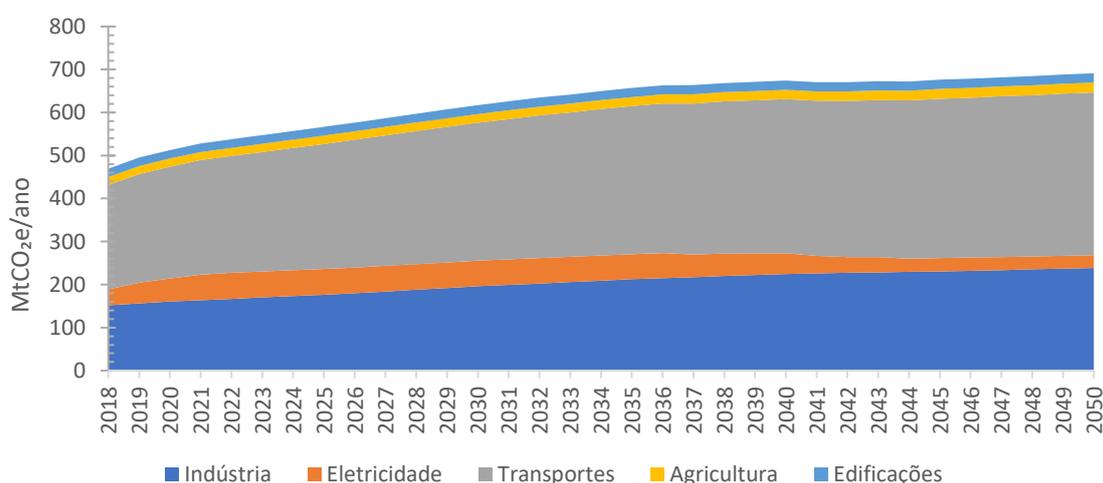
A hidroeletricidade, por exemplo, desempenha um papel fundamental nesse cenário, atuando não apenas como uma fonte renovável de energia, mas também como um reservatório e regulador do sistema. As hidrelétricas têm a capacidade de armazenar energia durante os períodos de alta produção e liberá-la quando a demanda é maior, ajudando a manter a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Isso é especialmente importante em um contexto em que há uma crescente participação de fontes intermitentes, como a energia eólica e solar fotovoltaica, cuja geração pode variar de acordo com as condições climáticas (ENGIE Brasil, 2023). Em 2023, a geração eólica no país cresceu 17,4%, adicionando 14,1 TWh à matriz energética, enquanto a geração solar fotovoltaica teve um aumento significativo de 68,1% (potência adicionada). Em contraste, a geração termelétrica sofreu uma queda de 1,9%, reduzindo sua participação no total de geração elétrica para 19,2% (potência reduzida) (EPE, 2024). Essa dinâmica reforça a importância das hidrelétricas na compensação das variações na geração dessas fontes renováveis e na manutenção da confiabilidade do sistema elétrico brasileiro.

É importante destacar que, apesar dos esforços e dos resultados positivos obtidos com o setor elétrico, a Figura 5 e a Figura 6 desse cenário enfatizam que a meta de

neutralidade de carbono até 2050, reafirmada na versão atualizada da NDC em 2023, não será atingida apenas com os avanços observados até o momento. Embora a participação das energias renováveis na matriz elétrica brasileira seja expressiva, ainda há desafios a serem enfrentados para alcançar a neutralidade de carbono. A análise desses dados ressalta a necessidade de implementação de medidas adicionais e mais ambiciosas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em outros setores, além do elétrico, visando cumprir os compromissos estabelecidos na NDC e contribuir efetivamente para o combate às mudanças climáticas.

A Figura 7 analisa detalhadamente o setor energético e suas emissões no contexto brasileiro. Ela evidencia que, ao discutir as emissões de energia, os setores de transporte e indústria se destacam negativamente, enquanto agricultura e edificações têm um impacto relativamente menor nas emissões totais neste contexto específico. O setor de transporte, segundo especialistas do WRI Brasil, é uma das fontes de emissões que mais cresce no país (WRI Brasil, 2024). Apesar de contar com o etanol e biodiesel, considerados fontes de energia relativamente limpas em comparação aos combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, e amplamente disponíveis nos postos de combustível em todo o país, seja diretamente ou em misturas, o uso destes últimos continua a crescer (EPE, 2024).

Figura 7 - Emissões de energia por setor - cenário BAU.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

As emissões totais de CO₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira, em 2023, alcançaram 427,8 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e), representando um aumento de 0,8% em comparação a 2022. As emissões foram distribuídas pelos setores da seguinte forma: o setor de transportes contribuiu com 217,0

MtCO_{2e} (50,7%), as indústrias emitiram 73,9 MtCO_{2e} (17,3%), as residências foram responsáveis por 18,4 MtCO_{2e} (4,3%) e outros setores totalizaram 118,4 MtCO_{2e} (27,7%). Este panorama reflete os desafios contínuos no controle e mitigação das emissões de gases de efeito estufa no Brasil.

As projeções desse cenário apresentam uma trajetória de aumento das emissões de CO_{2e} no setor de transportes destaca a importância dos dados de 2023 apresentados no Balanço Energético Nacional (BEN) de 2024. Em 2023, o setor de transportes no Brasil registrou um crescimento significativo no consumo de energia, impulsionado por aumentos de 19,2% no uso de biodiesel, 6,9% na gasolina e 6,3% no etanol (anidro + hidratado). Apesar dos avanços no uso de biodiesel e etanol, a persistente dependência de combustíveis fósseis, como a gasolina, demonstra que o crescimento no consumo de energia está alinhado com a tendência de aumento das emissões observada no cenário BAU.

No mercado de veículos leves, o etanol viu sua participação diminuir em relação à gasolina automotiva, enquanto no transporte rodoviário de cargas, o consumo de biodiesel cresceu devido ao aumento da mistura obrigatória com diesel mineral. Esses movimentos contribuíram para um aumento na participação de fontes renováveis na matriz energética do setor, que alcançou 22,5% em 2023 (EPE, 2024). Essas tendências indicam que, sem intervenções mais agressivas e uma transição acelerada para fontes de energia de baixo carbono, o setor de transportes continuará a ser um dos principais responsáveis pelas emissões totais de CO_{2e} no Brasil.

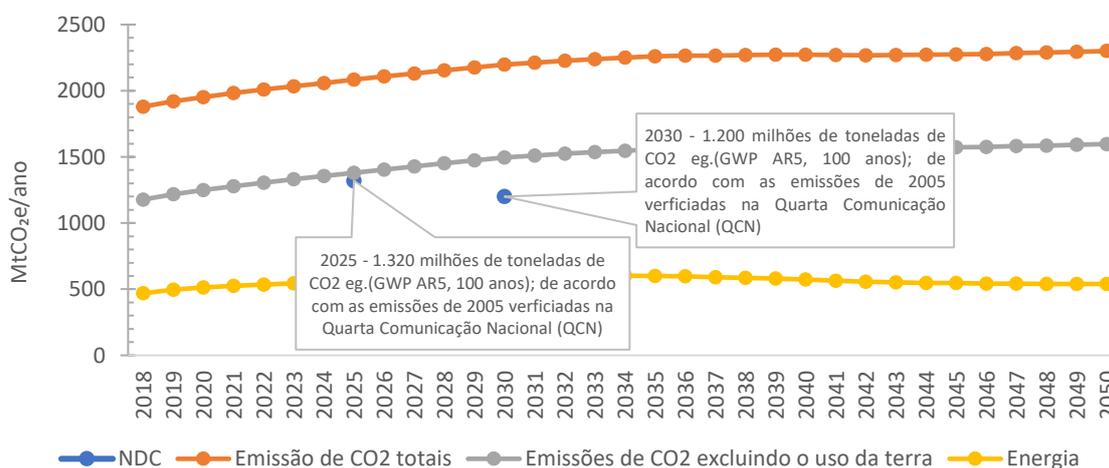
De acordo com a plataforma SEEG de 2024, transporte e indústria ocupam a terceira e quinta posição, respectivamente, no ranking das categorias mais emissoras do Brasil e ao analisarmos as prospecções do cenário BAU esses números podem aumentar nos próximos anos. Para alcançar as metas estabelecidas no Acordo de Paris, é crucial que a agenda de descarbonização do setor de transportes esteja em destaque no contexto do setor energético. A descarbonização pode desempenhar um papel fundamental na redução das emissões de carbono do Brasil, que atualmente totalizam 1.9 gigatoneladas por ano, para 1.2 gigatoneladas até 2030 (MInfra, 2023).

4.1.1.1.2 Cenário 2 - Políticas de P&D sem arrependimento

Esse é um cenário pré-definido da SINPASE chamado "Políticas de P&D sem arrependimento", que é um exemplo de como políticas de pesquisa e desenvolvimento podem ser aplicadas de forma a trazer benefícios sem arrependimentos significativos. Isso sugere que as políticas e investimentos em P&D serão recompensados ao longo do tempo, à medida em que as tecnologias desenvolvidas ou aprimoradas forem implementadas e começarem a gerar retornos financeiros ou benefícios sociais. Isso pode incluir economias de custos, aumento da competitividade no mercado global, melhoria da qualidade de vida da população, entre outros.

A Figura 8 ilustra a curva de emissões totais, emissões sem o uso da terra e as emissões de energia para o cenário P&D sem arrependimentos até 2050. E, na imagem, também estão identificados os pontos dos compromissos estabelecidos na NDC brasileira para os anos de 2025 e 2030. Este cenário representa um conjunto de políticas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento projetados para gerar benefícios tangíveis e mensuráveis, incluindo o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, aprimoramento de processos industriais e melhorias na eficiência energética, entre outros.

Figura 8 - Comparação de emissões brasileiras de CO₂ totais, setor energético e recorte para eletricidade - setor - Políticas de P&D sem arrependimento.

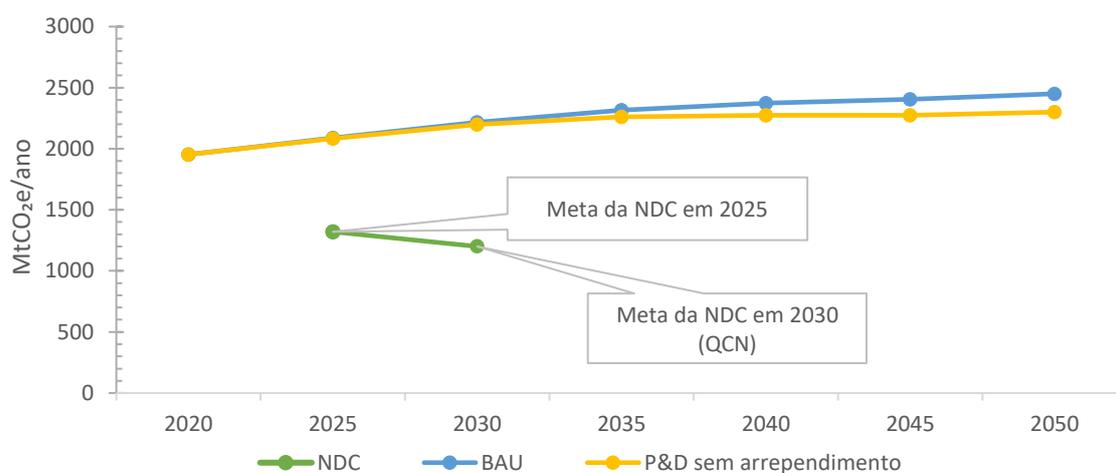


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

É importante observar que, mesmo em um cenário mais positivo com projeções otimistas, o modelo SINAPSE ainda mostra uma curva crescente de emissões, com dificuldade de alcançar as metas prometidas na NDC. A meta de 2025 só é alcançada quando não se considera o uso da terra; no entanto, mesmo desconsiderando isso, ainda não será possível cumprir os compromissos estabelecidos para 2030. Aqui novamente

podemos observar a importância do setor energético para a redução significativa das emissões brasileiras, mesmo não sendo o principal protagonista das emissões no país. Os dois cenários pré-estabelecidos na calculadora brasileira trazem resultados insuficientes para o combate da mudança do clima e a diminuição das emissões totais do país. Na Figura 9 é mostrado uma comparação de emissões do cenário BAU e do cenário Políticas de P&D sem arrependimento, o segundo ilustra uma trajetória mais positiva em relação ao primeiro, entretanto ambos falham em alcançar as metas da Quarta Comunicação Nacional (QCN) e a neutralidade de carbono em 2050 conforme meta brasileira anunciada.

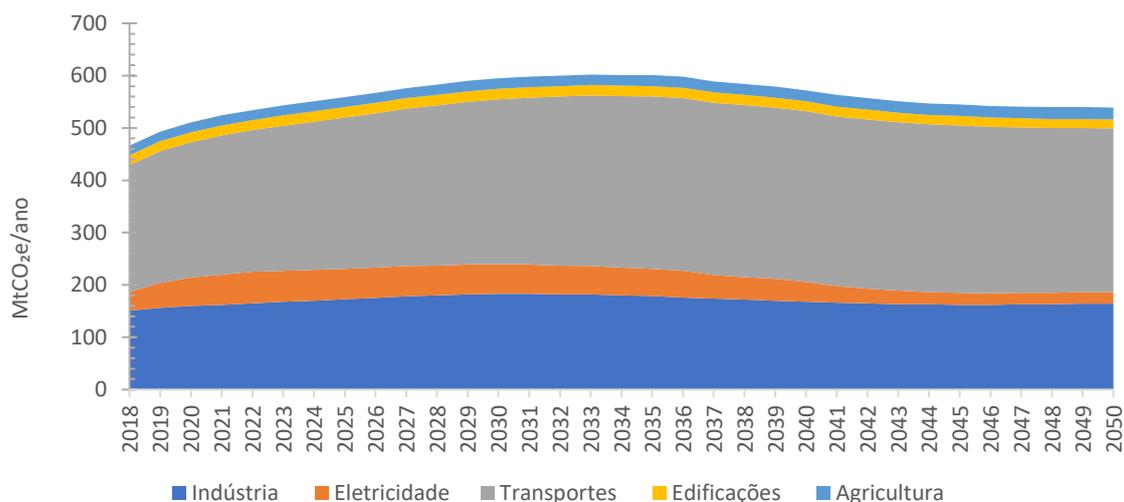
Figura 9 - Comparação de emissões brasileira nos cenários BAU e Políticas de P&D sem arrependimento.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

Mesmo nesse cenário mais otimista as emissões de transporte ainda são significativas, entretanto, em comparação ao cenário anterior, é possível ver um caminho de redução a partir de 2037 e uma queda, mesmo que tênue, nos anos seguintes. O mesmo não acontece no cenário BAU que mostra uma expectativa de emissões crescentes ao longo dos anos. A necessidade de descarbonizar o setor de transporte é uma preocupação que incentivou a criação de algumas políticas importantes no país e que podem refletir o futuro que a Figura 10 apresenta.

Figura 10 - Emissões de energia por setor - Políticas de P&D sem arrependimento.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

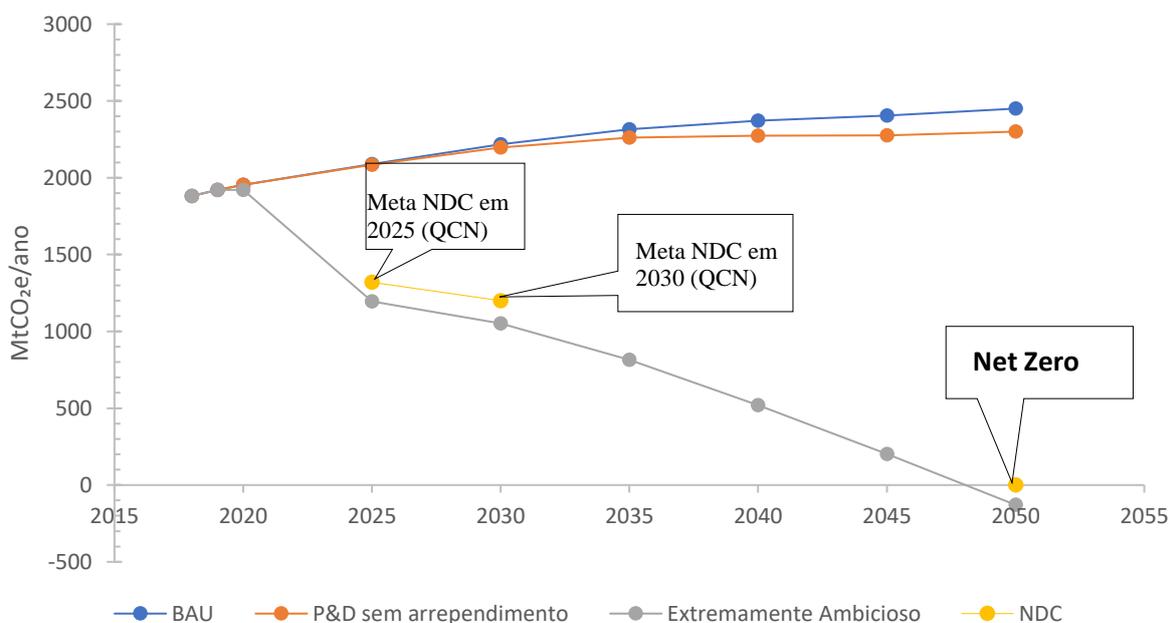
A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) estabelece objetivos de redução da intensidade de carbono (IC) na matriz de transportes, concentrando-se na avaliação da eficiência energético-ambiental dos diversos biocombustíveis em comparação com os combustíveis fósseis (BRASIL, 2017). Paralelamente, a avaliação da eficiência energética dos veículos é regulada pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e está incorporada às diretrizes do Programa Rota 2030 (BRASIL, 2018). Em 2021, foi lançado o Programa Combustível do Futuro, com o propósito de ampliar a participação de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono, integrando várias políticas públicas, incluindo o RenovaBio, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, o Programa Nacional de Etiquetagem Veicular e o Rota 2030. O programa também aborda o uso de bioquerosene de aviação e soluções sustentáveis para o setor marítimo. Além disso, propõe medidas para a captura de carbono na produção de biocombustíveis e hidrogênio (CASA CIVIL, 2021; CNPE, 2021; EPE, 2022).

Ainda dentro desse contexto, o Brasil está intensamente envolvido na *Global Biofuel Alliance (GBA)*, que foi lançada durante a cúpula do G20 na Índia em 2023, essa é uma iniciativa que visa promover o desenvolvimento e o uso de biocombustíveis sustentáveis. Esta aliança tem como objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a segurança energética, promovendo a adoção de biocombustíveis. Composta por 19 países e 12 organizações internacionais, incluindo o Fórum Econômico Mundial, o Banco Mundial e o Banco Asiático de Desenvolvimento, seu principal objetivo é

expandir o uso de biocombustíveis sustentáveis em todo o mundo, visando descarbonizar o transporte e reduzir as emissões. É importante destacar que os biocombustíveis muitas vezes podem ser utilizados em motores de veículos existentes, com modificações mínimas, o que os torna uma escolha prática para setores difíceis de eletrificar, como a aviação. Além disso, os países estabelecem regras de mistura para impulsionar a demanda por biocombustíveis e promover o crescimento da indústria de biocombustíveis (WeForum, 2023; NEXT IAS, 2023).

Apenas em um cenário extremamente ambicioso, onde todas as alavancas são acionadas ao máximo no SINAPSE, seria possível alcançar as três grandes metas brasileiras para 2025, 2030 e a neutralidade de carbono até 2050. A Figura 11 é um exemplo visual da comparação das emissões totais de CO₂ do Brasil entre os cenários apresentados anteriormente e o cenário extremamente ambicioso. Nesse último, é possível observar uma trajetória de redução significativa nas emissões. Esse cenário exigiria a implementação rigorosa e simultânea de políticas de descarbonização, investimentos maciços em tecnologias limpas, e uma transformação profunda nos padrões de consumo e produção de energia. Somente com um esforço coordenado e comprometido, envolvendo governo, setor privado e sociedade civil, seria viável atingir essas metas climáticas ambiciosas e essenciais para o futuro sustentável do país.

Figura 11 - Comparação de emissões entre cenários BAU, P&D sem arrependimento e Extremamente Ambicioso.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do SINAPSE (2024).

4.1.2 Avaliações e recomendações

A plataforma Climate Action Tracker (CAT) avalia as NDCs de vários países, incluindo o Brasil, em relação às metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. A avaliação da NDC brasileira geralmente destaca a necessidade de metas mais ambiciosas e a implementação de políticas e medidas adicionais para atingir os objetivos do Acordo de Paris. A CAT considera a NDC do Brasil como "Insuficiente", mesmo com a atualização, o que significa que as metas propostas pelo país não estão alinhadas com a trajetória necessária para limitar o aquecimento global a 1,5°C ou mesmo a 2°C (CAT, 2024a). A avaliação aponta para a importância de o Brasil intensificar seus esforços de redução de emissões, especialmente no setor de desmatamento e no uso da terra, que são áreas críticas de emissões no país. Além disso, são destacadas oportunidades para aprimorar políticas relacionadas à energia, transporte e indústria para alcançar metas mais ambiciosas e contribuir efetivamente para os esforços globais de combate às mudanças climáticas.

O Instituto Talanoa de políticas climáticas brasileiras também realiza análises e documentos sobre a NDC brasileira e com a atualização da última NDC não poderia ser diferente. O instituto considera que a última comunicação do Governo do Brasil à UNFCCC, em novembro de 2023, representa um avanço notável tanto em termos de conteúdo quanto de clareza, e marca um passo significativo em direção à reversão da tendência de ambição reduzida nas NDCs, que foi estabelecida pelo governo anterior. Entretanto o instituto também pontua a necessidade de construir e atualizar as metas com aumento na ambição nas áreas de adaptação, financiamento e mitigação, além de internalizar compromissos assumidos internacionalmente, como o Compromisso Global do Metano, assinado em Glasgow e ainda não contemplado na NDC (Talanoa, 2023).

A calculadora brasileira SINAPSE desempenha um papel muito importante na avaliação e modelagem das emissões de GEE no Brasil, fornecendo uma ferramenta valiosa para entender o impacto das políticas e medidas propostas na redução das emissões. Suas análises e projeções fornecem uma visão abrangente das tendências atuais de emissões no país e ajudam a orientar decisões políticas e estratégicas relacionadas ao combate às mudanças climáticas, além de desempenhar um papel importante ao fornecer análises robustas e baseadas em evidências para informar o desenvolvimento e implementação de políticas climáticas mais eficazes.

No entanto, é importante reconhecer que a SINAPSE é apenas uma ferramenta e suas projeções estão sujeitas a incertezas, suposições e possíveis ajustes de calibragem. Essas incertezas podem surgir devido a uma variedade de fatores, incluindo mudanças inesperadas nas políticas governamentais, flutuações econômicas, avanços tecnológicos imprevistos e variações nos padrões de comportamento da sociedade. A calibragem do modelo SINAPSE depende de dados e parâmetros que podem variar ao longo do tempo, e ajustes são frequentemente necessários para refletir novas informações ou condições.

Um exemplo, é a projeção de emissões do setor energético pela calculadora SINAPSE, que geralmente segue uma tendência linear, o que significa que as emissões aumentam ou diminuem de forma proporcional em resposta a mudanças nas políticas ou nas condições econômicas. Essa abordagem linear é útil para prever tendências sob cenários estáveis, onde as variáveis envolvidas, como demanda de energia, crescimento econômico e mix energético, permanecem relativamente constantes. No entanto, essa suposição de linearidade pode não captar a complexidade das transições energéticas, que são influenciadas por múltiplos fatores que interagem de forma não linear, como inovações tecnológicas disruptivas, mudanças nos preços de combustíveis fósseis e renováveis, variações do Produto Interno Bruto (PIB) e transformações no comportamento dos consumidores e das indústrias.

A possível resposta para lidar com essa limitação da linearidade é a adoção de cenários não-lineares na modelagem do SINAPSE. Isso envolveria incorporar uma maior variabilidade nos modelos, simulando uma gama mais ampla de possíveis futuros, incluindo aqueles em que mudanças súbitas ou disruptivas ocorram. Também seria necessário atualizar constantemente os parâmetros e os dados utilizados, garantindo que o modelo pudesse refletir novas realidades econômicas, políticas e tecnológicas.

Portanto, é necessário que as projeções e análises do SINAPSE sejam complementadas por um diálogo amplo e inclusivo entre os tomadores de decisão, a sociedade civil, o setor privado e outros stakeholders. Esse diálogo deve garantir que as políticas e medidas implementadas sejam eficazes, justas e alinhadas com as metas de longo prazo de redução de emissões e adaptação às mudanças climáticas. A colaboração e o engajamento contínuos são essenciais para ajustar e refinar as estratégias, assegurando que elas permaneçam relevantes e impactantes, diante de um cenário em constante evolução.

4.2 Índia

A Índia desempenha um papel significativo na economia global de energia. Desde o ano 2000, o consumo de energia no país mais do que dobrou, impulsionado pelo aumento da população (atualmente o país mais populoso do mundo) e por um período de rápido crescimento econômico. Em 2019, quase todos os lares indianos tinham acesso à eletricidade, o que significa que mais de 900 milhões de cidadãos foram conectados à rede elétrica em menos de duas décadas. A contínua industrialização e urbanização da Índia vão criar enormes demandas para o seu setor de energia e para os tomadores de decisão (IEA, 2021).

O país está atualmente classificado como a quinta maior economia global e, de acordo com governo, possui a meta de se tornar a terceira maior até 2027. De acordo com as prospecções do país, o avanço econômico será impulsionado pelo desenvolvimento urbano, industrial e de infraestrutura do país (NITI Aayog, 2023). Com o crescente desenvolvimento do país, é natural entender que o avanço da demanda energética é uma consequência, principalmente por ter uma população que continua crescente e atualmente ser o terceiro maior consumidor de energia do mundo, atrás apenas de China e Estados Unidos (Losekann *et al.*, 2021). Na 26ª Conferência das Partes (COP26), realizada em Glasgow, a Índia apresentou um compromisso climático atualizado e mais ambicioso. Esse compromisso amplia a NDC apresentada anteriormente, durante o Acordo de Paris (COP21). Ademais, estabeleceu uma série de metas significativas para combater as mudanças climáticas e promover o uso de fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

As metas que estão mais relacionadas à energia, citadas na NDC da Índia, são:

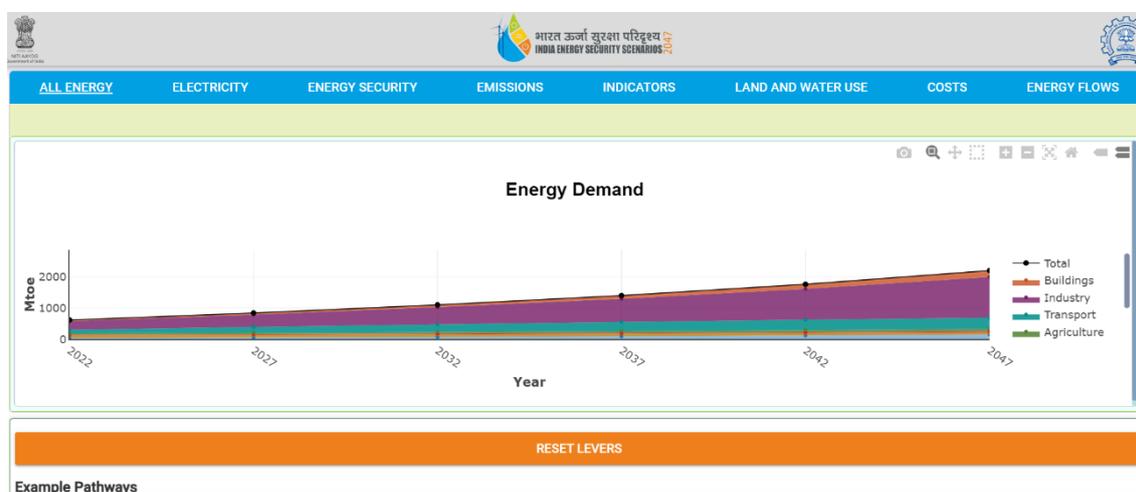
- a) Aumentar significativamente a parcela de sua capacidade de geração de energia proveniente de fontes não-fósseis, como energia solar, eólica, hidrelétrica e nuclear. A meta é ter 50% da capacidade de energia elétrica ³instalada a partir de recursos energéticos não-fósseis até 2030.
- b) Reduzir a intensidade das emissões do seu PIB em 45% até 2030, a partir do nível de 2005.

³ Em 2023, aproximadamente 42% da capacidade instalada de geração de eletricidade na Índia provém de fontes não-fósseis, incluindo energia solar, eólica, hidrelétrica e nuclear.

4.2.1 Calculadora Indiana – IESS

Um dos mecanismos desenvolvidos pelo país para auxiliar na formulação de políticas de energia e meio ambiente, bem como no comprimento das metas prometidas na NDC indiana, foi a criação da Calculadora de Cenários Energéticos. Em julho de 2023 a Índia lançou uma versão atualizada da sua calculadora, Figura 12, que é denominada como Cenários de Segurança Energética da Índia (IESS 2047⁴, sigla em inglês), foram dois anos de trabalho e essa é terceira atualização. Essa figura é meramente ilustrativa para mostrar a interface web disponível online.

Figura 12 - Interface web da IESS 2047.



Fonte: captura de tela obtida pela autora, utilizando a IESS.

A IESS apresenta quatro cenários predefinidos para analisar como afetariam a demanda e o fornecimento de energia. Além disso, os usuários têm a flexibilidade de criar uma trajetória personalizada, diferente daquelas previamente definidas no IESS. De acordo com a documentação disponibilizada na plataforma, foram incorporadas nessa atualização os recentes desenvolvimentos e anúncios políticos relacionados ao hidrogênio verde, à captura de carbono e ao surgimento de alternativas de armazenamento de energia.

Os cenários energéticos predefinidos contidos na plataforma são:

- a. Nível 1 - Cenário Pessimista: Pressupõe que pouco ou nenhum esforço é feito em termos de intervenções do lado da procura e da oferta.

⁴ O ano 2047 foi escolhido pelos especialistas indianos, ao invés do ano 2050, devido ao valor simbólico da comemoração de 100 anos de independência da Índia do Império Britânico.

- b. Nível 2 - Cenário Business-as-Usual (BAU): Descreve o nível de esforços que é considerado praticamente alcançável com base nas tendências históricas, bem como no progresso recente.
- c. Nível 3 - Cenário Otimista: Descreve o nível de esforços que é ambicioso e visa alcançar vários compromissos climáticos dos esforços do governo.
- d. Nível 4 - Cenário Heroico: Considera opções extremamente agressivas e ambiciosas dependendo dos limites e capacidades técnicas.

É importante ressaltar que, apesar das diversas possibilidades disponibilizadas pela calculadora, esse trabalho focará nos dados de fornecimento de energia e os impactos nas emissões do país, com o objetivo de entender se os cenários prospectados pelos especialistas indianos, potencialmente, alcançarão ou não as metas prometidas para a geração energia na NDC do país.

4.2.1.1 Cenários

Após uma análise substancial das possibilidades e do entendimento da calculadora, dois cenários pré-definidos foram selecionados para essa pesquisa, os cenários BAU e Otimista. No processo de escolha dos cenários, considerou-se que:

- I. A calculadora indiana foi atualizada muito recentemente e as documentações disponibilizadas enfatizaram que foram utilizados os planejamentos energéticos mais atuais disponíveis pelo governo, bem como as atualizações das metas realizadas na NDC. Dessa forma, os cenários se tornaram estrategicamente relevantes.
- II. Os dois cenários se aproximam de configurações que podem ser mais relevantes para a tomada de decisão atual ou futura, podem estar alinhados com políticas governamentais ou metas estratégicas e ainda proporcionam resultados e perspectivas diferentes.

As análises foram aqui realizadas com foco nas ofertas de energia, nas capacidades instaladas de energia elétrica e nas emissões de GEE. Desta forma, torna-se possível compreender como o país planeja alcançar os resultados energéticos da NDC e se esses resultados seriam suficientes para que a Índia atingisse sua responsabilidade com a meta global das mudanças do climáticas.

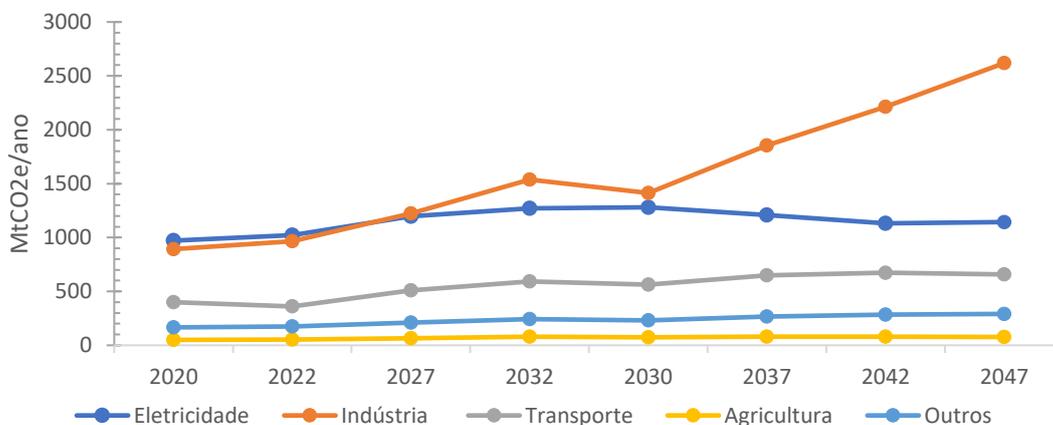
4.2.1.1.1 Cenário BAU

Esse cenário apresenta o grau de esforço que é considerado alcançável com base nas tendências passadas e no progresso mais recente, descreve um futuro sem grandes esforços ou intervenções para o mudar setor o energético atual. É uma base importante para a análise de cenários e planejamento estratégico.

O setor elétrico indiano é fortemente dominado por usinas termelétricas, a energia do carvão é o principal contribuinte para a geração de eletricidade, sendo o setor elétrico o maior consumidor de carvão no país. Além do carvão, a energia baseada no gás é outro importante contribuinte para a geração de eletricidade. A participação do gás natural no fornecimento de energia primária tem se mantido estável em cerca de 6% nos últimos anos. O carvão e o gás natural juntos são cerca de 59% da capacidade instalada de eletricidade. O setor energético é o maior responsável pelas emissões indianas e a produção de eletricidade representa 40% dessas emissões, o país vive um momento acelerado de crescimento econômico e precisará adicionar maior capacidade de geração nas próximas duas décadas (IESS, 2023).

Para o cenário BAU, é possível verificar com os dados da IEES que as emissões permanecem aumentando ao longo do tempo, mas que ocorre a inversão do setor com maiores emissões. A Figura 13 apresenta as emissões de energia por setor da Índia em números absolutos de milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente. As emissões totais, que atualmente somam 401,27 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e), são projetadas para aumentar para 754,5 MtCO₂e em 2030 e alcançar o preocupante valor de 1961,11 MtCO₂e em 2047.

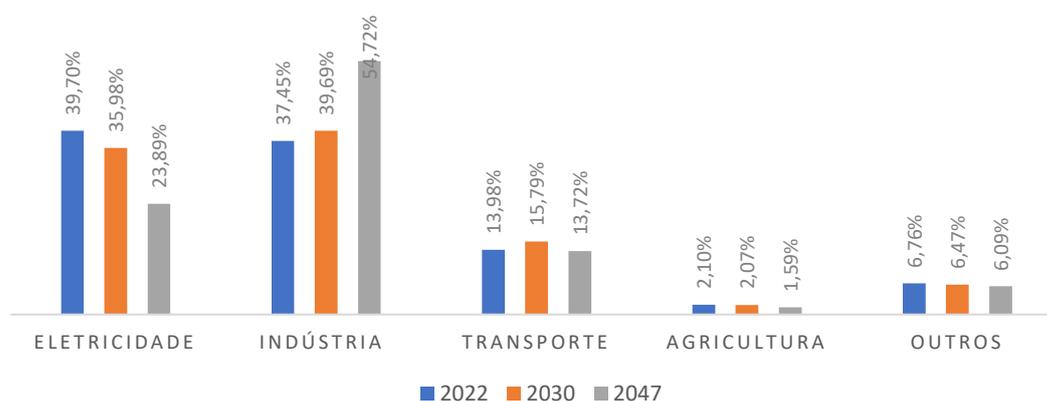
Figura 13 - Emissões de energia por setor da Índia - cenário BAU.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IEES (2024).

De forma complementar, a Figura 14 ilustra que, nesse cenário, a tendência de emissões do setor elétrico obtém uma redução de 39,7% em 2022 para 35,98% em 2030 e uma queda ainda mais significativa em 2047, com o setor elétrico sendo responsável por 23,9% das emissões. A indústria, por outro lado, segue na direção oposta, as emissões, que atualmente representam 37,5%, saltam para 54,7%, em 2047.

Figura 14 - Porcentagem de emissões de energia da Índia - cenário BAU.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

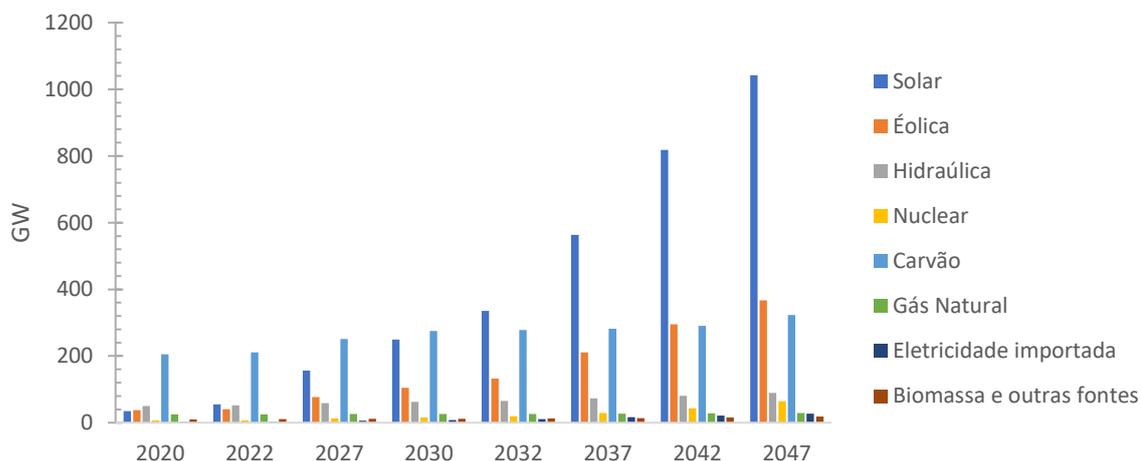
A Índia é o terceiro maior produtor e segundo maior consumidor de eletricidade do mundo, com capacidade instalada de energia de cerca de 370 GW (Losekann *et al.*, 2021). O investimento indiano em energia solar é uma parte central dos esforços do país para enfrentar a crescente demanda por eletricidade, reduzir emissões de gases de efeito estufa e promover um futuro mais sustentável.

A Índia estabeleceu a meta de aumentar para 50% sua capacidade de geração de energia proveniente de fontes não-fósseis em sua NDC e a geração de energia a partir de tecnologias de conversão de luz solar em eletricidade é o principal investimento nessa direção. Além dos esforços empreendidos pela Índia para impulsionar sua capacidade de geração de energia solar, o país também desempenha um papel de liderança global na promoção dessa fonte renovável. A Índia, reconhecendo a importância da energia solar como uma solução para desafios energéticos e ambientais do próprio país, desempenhou um papel fundamental na criação da *Internacional Solar Alliance (ISA)*. A ISA, lançada em 2015 durante a COP21 em Paris, é uma iniciativa liderada pela Índia e visa facilitar a cooperação internacional na promoção da energia solar.

A capacidade instalada de energia elétrica em 2022 foi de 401,3 GW e, de acordo com as prospecções do cenário BAU, esse valor será de 753,4 GW em 2030 e de 1961 GW em 2047. Apesar dos altos investimentos e do grande interesse em energia solar, a

matriz elétrica do país, de acordo com o cenário selecionado, ainda terá uma forte dependência do carvão, sendo ultrapassado pela energia solar apenas em 2032, mas ainda tendo o carvão como sua segunda fonte principal de energia. A Figura 15 apresenta a capacidade instalada de energia elétrica ao longo dos anos e as variações dos usos das fontes de geração de energia.

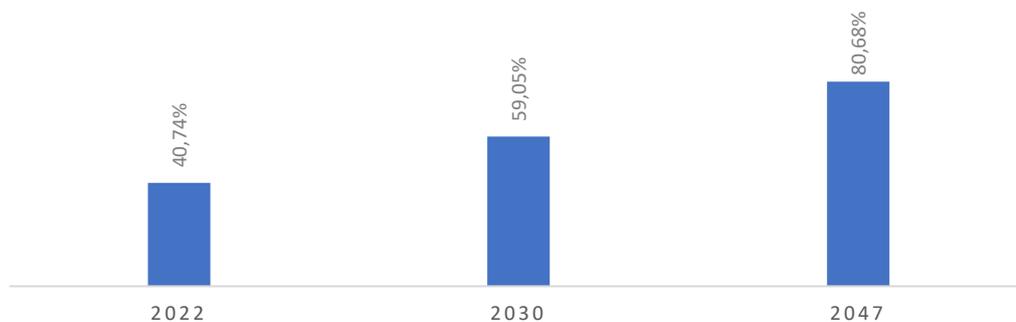
Figura 15 - Capacidade instalada de energia elétrica ao longo dos anos da Índia - cenário BAU.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

A Figura 16 mostra que, mesmo nesse cenário mais modesto, a meta estabelecida e atualizada da NDC pode ser alcançada em 2030, tendo 59% da geração de energia elétrica produzida por fontes de energias não-fósseis, mas é importante entender que a Índia contempla, nesse sentido, também o aumento de estações de energia nuclear. A Índia está atualmente investindo em energia nuclear como parte de sua estratégia para transformar a matriz elétrica, operando 22 reatores em sete locais, totalizando uma capacidade instalada de 6,68 GW. Projeções no cenário Business As Usual (BAU) indicam um aumento substancial para aproximadamente 64,5 GW até 2047, visando reduzir significativamente a dependência de carvão.

Figura 16 - Porcentagem de recursos energéticos não-fósseis na matriz elétrica da Índia ao longo dos anos - cenário BAU.

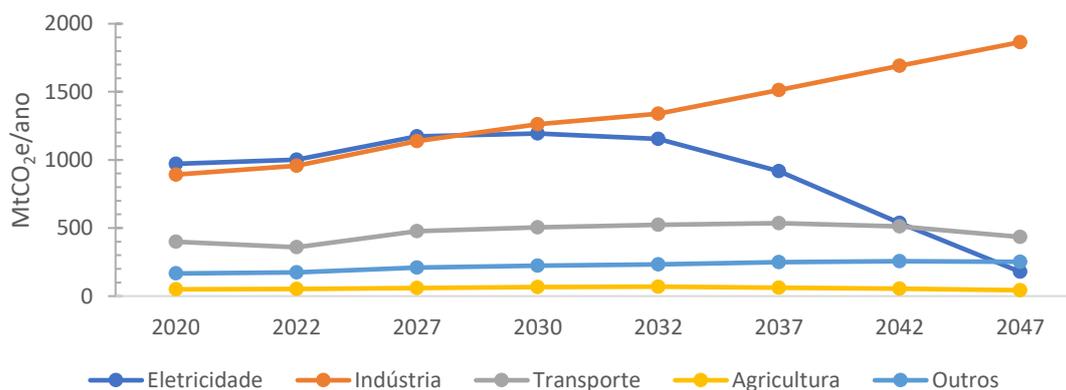


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

4.2.1.1.2 Cenário Nível 3 – Otimista

Para alcançar esse cenário, o nível de esforço a ser colocado é mais ambicioso, mas tecnicamente possível. Além disso, esse cenário está mais alinhado com metas e compromissos climáticos assumidos pelo país. A Figura 17 mostra que no cenário otimista é possível identificar diferenças consideráveis em relação ao cenário anterior (BAU); as emissões no setor elétrico, por exemplo, sofrem uma queda significativa.

Figura 17 - Emissões de energia por setor na Índia - cenário otimista.

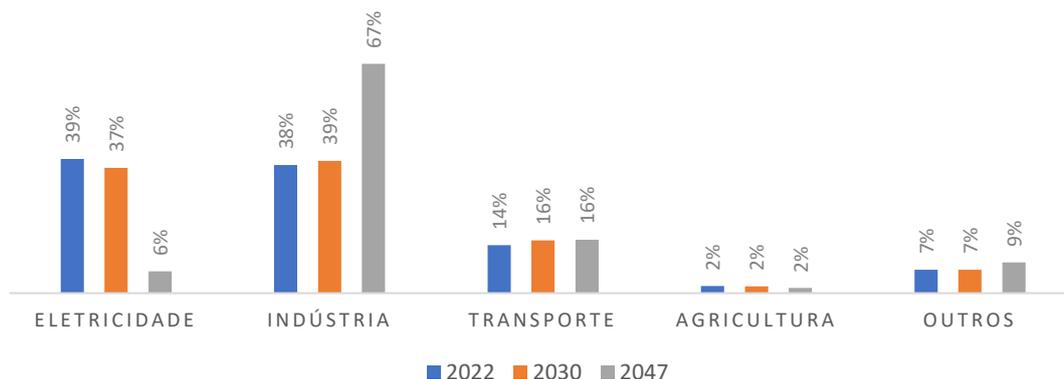


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

O pico de emissões no setor elétrico acontece em 2030, com emissões que podem chegar a cerca de 1.194 MtCO_{2e}. A partir desse ponto, inicia-se uma queda significativamente acentuada, com previsões de que, em 2047, as emissões no setor elétrico sejam menores que o setor de transporte, que apesar de aumentar em 2% suas emissões comparadas com o ano de 2022, conforme a Figura 18, é um setor que manterá suas emissões estáveis e sem alterações significativas.

A análise das emissões de CO₂ nos setores de eletricidade e indústria revela uma dinâmica interessante, onde a queda nas emissões do setor elétrico contrasta com o aumento significativo das emissões industriais. Essa redução nas emissões de eletricidade pode ser atribuída à transição para fontes renováveis, como solar e eólica, e a iniciativas de eficiência energética que diminuem o uso de combustíveis fósseis. Em contrapartida, o crescimento das emissões da indústria pode ser resultado do aumento da produção e da demanda por bens, refletindo uma dependência contínua de combustíveis fósseis em seus processos.

Figura 18 - Porcentagem de emissões de energia da Índia - cenário otimista.

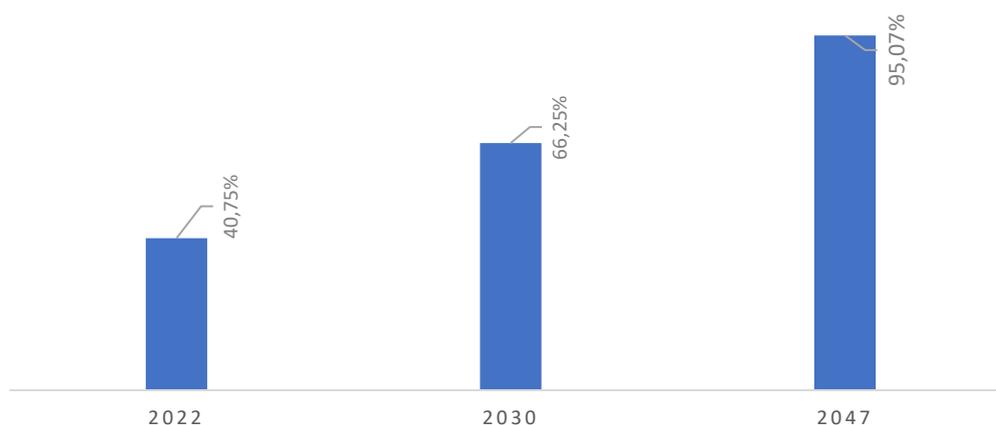


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

As emissões na indústria, por outro lado, seguem um crescente muito similar e até um pouco mais representativas do que o cenário anterior, chegando a cerca de 67% das emissões em 2047, caracterizando-se como único setor desse cenário a ter um aumento maior que 2% nas emissões ao longo dos anos. Apesar disso, esse cenário traz uma prospecção diferente para as emissões gerais.

Para o alcance da meta estabelecida na NDC, relacionada à matriz elétrica do país, assim como no cenário BAU, o cenário otimista também traz a prospecção de que a Índia alcançará com alguma folga o patamar de possuir mais que 50% de sua capacidade instalada de energia elétrica derivada de fontes não-fósseis, assim como mostrado na Figura 19.

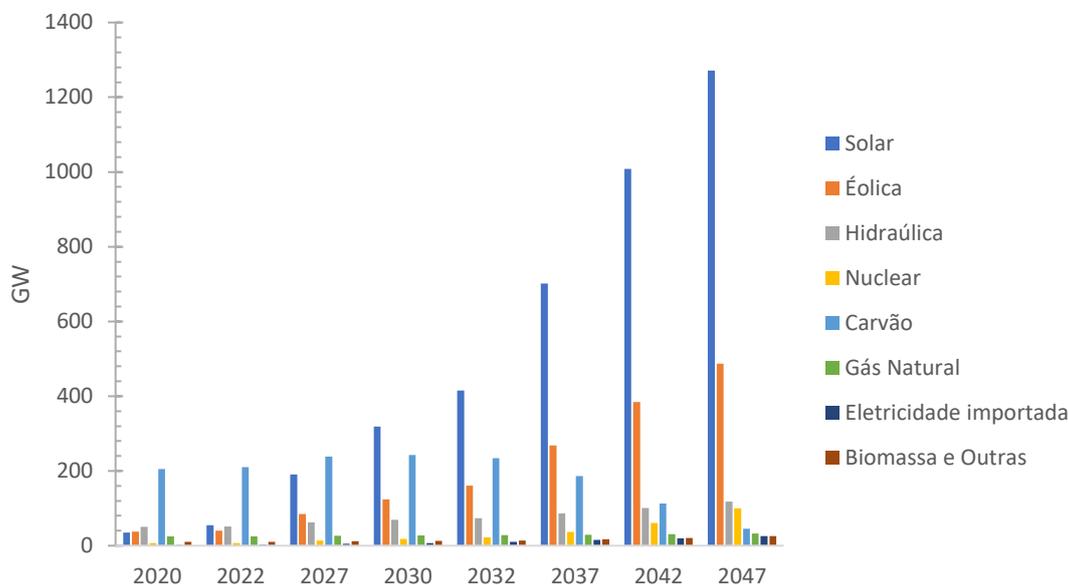
Figura 19 - Porcentagem de recursos energéticos não fósseis na matriz elétrica da Índia ao longo dos anos - cenário otimista.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

A Figura 20, ilustra que mais uma vez, o destaque é o grande e esperado avanço da energia solar no país, porém, além disso, esse cenário prevê um aumento maior do uso de energia nuclear, chegando a cerca de 100 GW de capacidade instalada em 2047.

Figura 20 - Capacidade instalada de energia elétrica da Índia ao longo dos anos - cenário otimista.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

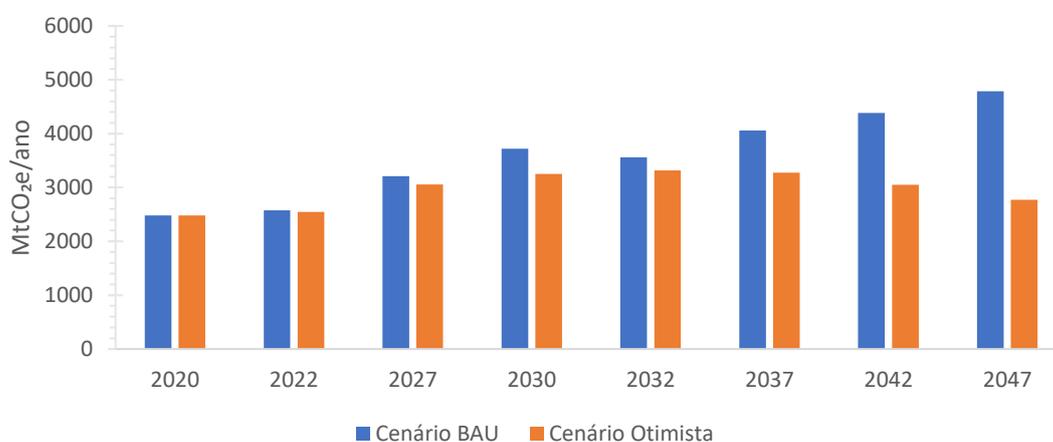
A Índia registrou avanços significativos na expansão do acesso à eletricidade ao longo das últimas duas décadas. Apesar dos notáveis progressos na eletrificação de residências, ainda persistem desafios no que diz respeito ao acesso à eletricidade em áreas rurais. Nessas regiões, muitas escolas, centros de saúde públicos, pequenas empresas e unidades agrícolas continuam a enfrentar problemas de fornecimento intermitente e não confiável de energia, o que limita suas oportunidades de alcançar resultados socioeconômicos positivos (Losekann *et al.*, 2021). Desde 2005, a Índia implementou um programa de eletrificação rural, além do objetivo de garantir eletricidade para todos os lares, beneficiando mais de 26,2 milhões de famílias até março de 2019. Investimentos em fontes de energia renovável descentralizada emergem como uma das soluções viáveis para abordar o desafio da eletrificação em áreas remotas e para melhorar a eficiência no setor agrícola (Losekann *et al.*, 2021). Os cenários discutidos levam em consideração o sucesso futuro de eletrificação da população rural e também da crescente população urbana.

O governo indiano implementou políticas abrangentes para promover a energia renovável, incluindo metas de capacidade, melhorias na administração e incentivos à produção de tecnologias solares e à produção de hidrogênio verde. No entanto, persiste

um desafio significativo devido à dependência contínua da energia gerada a partir do carvão. O governo está pressionando pela ampliação da produção interna de carvão e planeja construir novas instalações substanciais de energia a carvão entre 2027 e 2032, de acordo com seu plano elétrico mais recente (NEP, 2023).

Comparando as emissões entre os cenários é possível verificar na Figura 21 que, ao contrário do cenário em que as emissões continuam subindo (BAU), mesmo com menor impacto do setor elétrico, no cenário otimista a previsão é que a partir de 2037 as emissões comecem a cair e retornem a um patamar um pouco acima, mas similar ao de 2022. Em ambos os cenários seria possível alcançar a meta de emissões da NDC indiana, que é de 4.443 MtCO_{2e}. No cenário BAU, a projeção para 2030 é de 3.721 MtCO_{2e}, enquanto no cenário otimista é de 3.250 MtCO_{2e}. No entanto, esses números ainda estão longe de serem suficientes para alcançar, proporcionalmente, a meta global de limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. Para isso, os especialistas do Climate Transparency indicam que as emissões precisariam ser reduzidas para cerca de 1.650 MtCO_{2e} até 2030, deixando uma lacuna de ambição de aproximadamente 2.793 MtCO_{2e} (Climate Transparency, 2022).

Figura 21 - Comparação das emissões gerais de energia da Índia ao longo dos anos para os cenários BAU e Otimista.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados IESS (2024).

Além disso, a Índia anunciou uma meta de emissões líquidas zero até 2070, diferentemente de muitos outros países que estão estabelecendo metas de emissões líquidas zero para 2050. Esta meta de 2070 é significativa, pois destaca o desafio que a Índia enfrenta em equilibrar o desenvolvimento econômico com a necessidade de reduzir as emissões de carbono. A transição para uma economia de baixo carbono na Índia envolverá uma série de medidas, incluindo a expansão das energias renováveis, melhorias

na eficiência energética e a adoção de tecnologias mais limpas em setores-chave como o transporte e a indústria. No entanto, o cumprimento desta meta exigirá um suporte substancial em termos de financiamento internacional, transferência de tecnologia e capacitação, para assegurar que a Índia possa desenvolver sua economia de maneira sustentável, sem comprometer seu crescimento socioeconômico.

4.2.2 Avaliações e recomendações

Com base na avaliação dos especialistas do CAT, (2023b), as metas estabelecidas pela Índia são consideradas insuficientes para contribuir de maneira significativa com o esforço global de conter o aumento da temperatura. Embora a Índia tenha anunciado metas ambiciosas, como a neutralidade de carbono até 2070, estas não são suficientes para limitar o aquecimento global a 1,5°C, conforme estabelecido pelo Acordo de Paris.

Os especialistas indicam que a Índia possivelmente alcançará suas metas estabelecidas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), que incluem reduzir a intensidade das emissões do seu PIB em 45% até 2030, a partir do nível de 2005, e aumentar significativamente a parcela de sua capacidade de geração de energia proveniente de fontes não-fósseis, com o objetivo de ter 50% da capacidade de energia elétrica instalada a partir de recursos energéticos não-fósseis até 2030. No entanto, a avaliação geral é de que essas metas não são adequadas para evitar os impactos mais severos das mudanças climáticas.

Para que a Índia possa desempenhar um papel mais significativo na mitigação das mudanças climáticas, é recomendável que o país adote metas mais ambiciosas e alinhadas com a ciência climática. Isso incluiria acelerar a transição para energias renováveis, promover a eficiência energética em todos os setores, e implementar políticas rigorosas de descarbonização, especialmente no setor de transporte e indústria. Ademais, será fundamental a criação de incentivos robustos para estimular a inovação tecnológica e a adoção de práticas sustentáveis, além do desenvolvimento de infraestrutura que suporte essa transição.

Adicionalmente, a calculadora indiana de cenários de energia e emissões pode apresentar algumas possíveis limitações de modelagem que podem afetar a precisão das previsões. Por exemplo, as premissas usadas na calculadora podem subestimar o ritmo de adoção de tecnologias emergentes ou não considerar plenamente os impactos de políticas futuras. Outra limitação pode ser a insuficiente consideração das barreiras econômicas e

sociais para a implementação de medidas de mitigação em larga escala. Essas limitações destacam a necessidade de revisões contínuas e atualizações da modelagem para garantir que as previsões e metas sejam baseadas nos dados e tendências mais recentes.

4.3 Estados Unidos

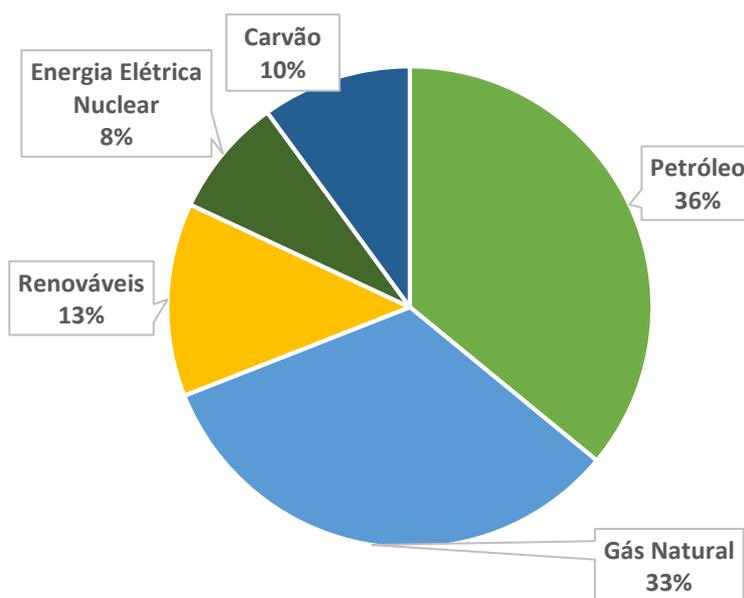
Os Estados Unidos da América (EUA), apesar de suas extensas áreas naturais e uma sociedade multicultural, enfrentam desafios significativos no que diz respeito à sustentabilidade ambiental. No entanto, continuam a ser uma das maiores influências econômicas mundiais. Com uma população diversificada e um PIB robusto, o país desempenha um papel central nos assuntos globais, tanto em economia quanto em questões ambientais. A população estadunidense ultrapassa os 330 milhões de habitantes e é um dos países mais populosos do mundo, ficando atrás somente da Índia e da China. Possui ainda um Produto Interno Bruto (PIB) superior a US\$ 23 trilhões (Banco Mundial, 2024), liderando assim o cenário econômico global. Impulsionado por setores como serviços financeiros, tecnologia, manufatura e agricultura, sua economia diversificada e altamente desenvolvida atrai investimentos e talentos de todo o mundo, consolidando sua posição como um centro de inovação e empreendedorismo.

No entanto, essa proeminência econômica não está isenta de desafios ambientais. Como uma das maiores emissoras de gases de efeito estufa (GEE) do mundo, inclusive em termos de emissões totais, per capita e históricas, os Estados Unidos enfrentam pressões significativas para reduzir sua pegada de carbono e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Embora tenham havido avanços em políticas de energia limpa e sustentabilidade, o país ainda enfrenta o desafio de equilibrar o crescimento econômico com a proteção do meio ambiente. Em 2022, as emissões de GEE dos Estados Unidos foram de aproximadamente 5.489 milhões de toneladas métricas de CO₂ equivalente (MtCO₂e), o que corresponde a cerca de 14,9 toneladas métricas de CO₂ por pessoa. Esse valor tem mostrado uma tendência de queda nos anos recentes. Esses dados sublinham a importância de enfrentar as emissões de GEE para mitigar os impactos das mudanças climáticas (EPA, 2024b; Global Carbon Budget, 2023; Our World in Data, 2024).

As emissões de energia nos Estados Unidos refletem uma significativa dependência de fontes fósseis, que continuam a dominar a matriz energética do país. As principais fontes incluem petróleo, gás natural e carvão, que juntos representam uma parte substancial da produção energética nacional. Embora os Estados Unidos também utilizem

energia nuclear e fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, a transição para uma economia menos dependente de combustíveis fósseis tem sido gradual. Em 2022, o consumo total de energia primária nos EUA foi de 100,41 quatrilhões de Btu (EIA, 2024), destacando a escala e a complexidade da infraestrutura energética do país. A Figura 22 ilustra claramente a composição da matriz energética, com as fontes fósseis ainda representando mais de 70% do mix energético nacional, apesar do crescimento das energias renováveis nos últimos anos.

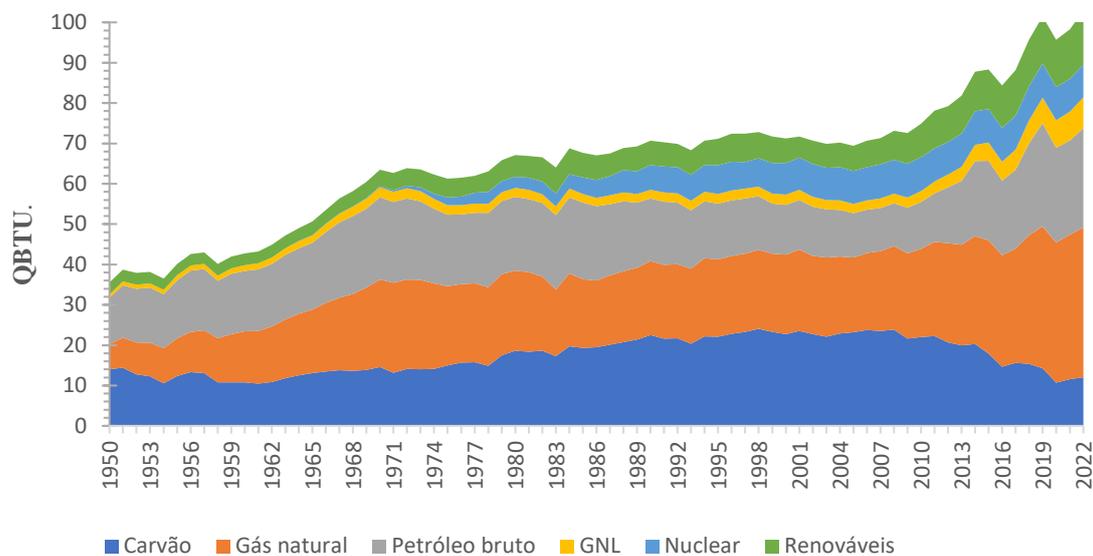
Figura 22 - Matriz energética dos EUA por fonte de energia em 2022.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados EIA (2024).

Na última década, os Estados Unidos testemunharam um notável aumento na produção de petróleo bruto e gás natural, impulsionado por avanços tecnológicos na extração, especialmente em depósitos de gás de xisto (*shale gas*), como apresentado na Figura 23. O gás natural liquefeito (GNL) também apresentou crescimento. Paralelamente, embora o número de reatores nucleares tenha permanecido estável desde 2000, a produção de energia nuclear aumentou devido às melhorias na capacidade e ciclos de reabastecimento/manutenção mais curtos. Esse período também foi marcado por um crescimento exponencial na energia renovável, com um aumento de quase 40%, refletindo uma tendência em direção às fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Essas informações são corroboradas pela *Energy Information Administration* (EIA), que fornece dados precisos e atualizados sobre o panorama energético dos Estados Unidos (EIA, 2024).

Figura 23 -Produção de energia nos EUA pelas principais fontes, 1950-2022.



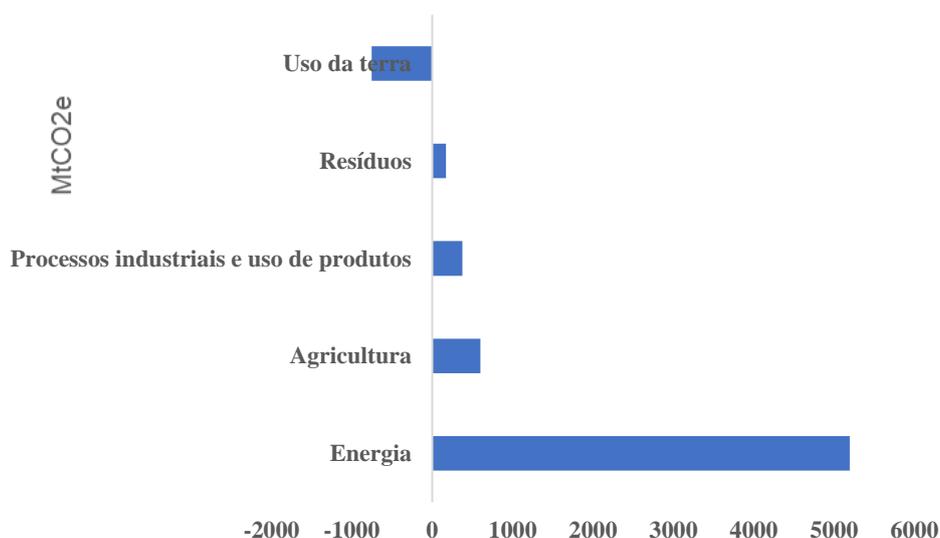
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EIA (2024).

Apesar da alta dependência de fontes fósseis na matriz energética do país, os esforços para reduzir as emissões de carbono e promover a eficiência energética têm se intensificado. A diminuição gradual das emissões de carbono per capita ao longo dos anos reflete uma mudança lenta, porém contínua, na matriz energética do país. Essa transição é motivada não apenas pela adoção crescente de fontes de energia sustentáveis, mas também por uma crescente conscientização sobre os impactos ambientais e a urgência de mitigar as mudanças climáticas (EIA, 2024). De acordo com a EIA (2024), a produção e o consumo de energia renovável atingiram recordes em 2022, representando cerca de 13% do total de produção e consumo de energia. Esse aumento foi impulsionado principalmente pela produção recorde de energia solar e eólica, além do crescimento na geração de energia hidrelétrica. A produção e o consumo de energia proveniente de biomassa também aumentaram em relação a 2021, embora tenham ficado aquém dos recordes alcançados em 2018.

De acordo com os dados oficiais mais recentes Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), Figura 24, o setor que continua emitindo mais é o de energia, sendo responsável por mais de 70% das emissões do país. Em seguida, a agricultura contribui com 9%, enquanto os processos industriais representam 5% das emissões de GEE. Em contraste com os setores mais emissores e divergindo do caso brasileiro, os Estados Unidos apresentam emissões negativas quando o assunto é uso da terra, o que,

embora tenha um impacto relativamente modesto no cenário geral, ainda representa um nível de compensação ambiental. Esses dados mostram que, mesmo com os atuais investimentos em novas fontes, a necessidade de uma transição energética mais célere nos Estados Unidos é evidente. Com a crescente demanda por fontes de energia mais limpas e renováveis, iniciativas para promover fontes como solar, eólica, hidrelétrica e geotérmica estão se tornando cada vez mais importantes para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (EPA, 2024a).

Figura 24 - Emissões de GEE por setor, ano-base 2021.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados EPA 2024a.

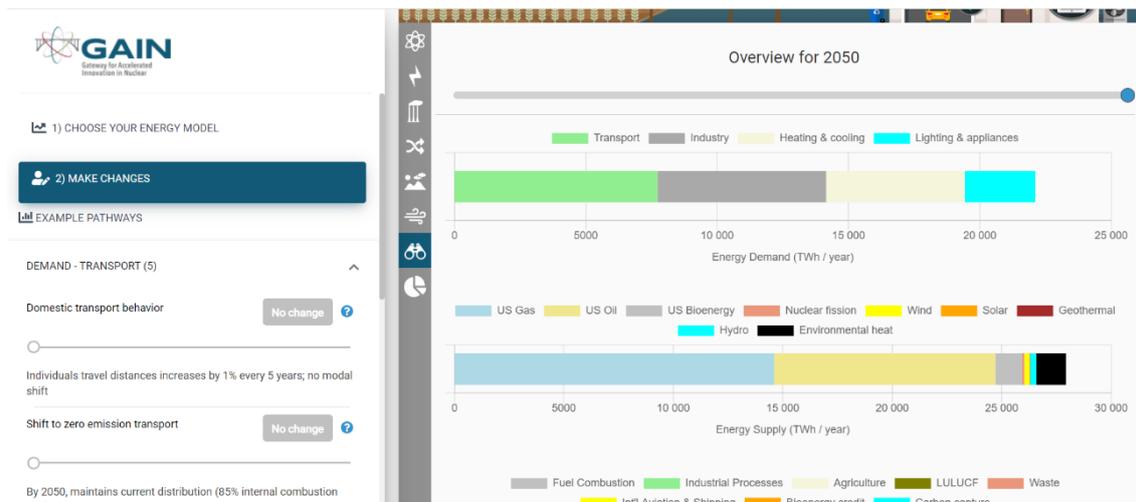
A NDC dos EUA foi atualizada em 2021, refletindo o retorno do país ao Acordo de Paris sob a administração do presidente Joe Biden. A nova NDC estabelece uma meta ambiciosa de reduzir as emissões de GEE em 50-52%, valores abaixo dos níveis de 2005 até o ano de 2030. Esses números representam um compromisso mais intenso em relação às metas anteriores do país, e reflete uma abordagem mais agressiva para combater as mudanças climáticas. Para alcançar tais metas prometidas na NDC, a transição energética será essencial para os Estados Unidos, pois, sem grandes investimentos no setor energético, não será possível cumprir as métricas altas e ambiciosas estabelecidas. Portanto, o comprometimento com as fontes de energia limpa e renovável, juntamente com a implementação de políticas e medidas específicas para reduzir as emissões de GEE, é fundamental para garantir o sucesso da NDC do país e contribuir efetivamente para os esforços globais de combate às mudanças climáticas (*United States*, 2021).

A NDC dos Estados Unidos no setor energético reflete em algum nível um engajamento com a transição para uma economia de baixo carbono e sustentável, em linha com os objetivos do Acordo de Paris e os esforços globais para enfrentar as mudanças climáticas. Essa abordagem representa uma mudança na política energética, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE e promover a segurança energética, a criação de empregos verdes e a resiliência climática. Além disso, as metas estabelecidas para 2050 representam um passo importante em direção a uma economia de baixo carbono e sustentável. Com a promessa de alcançar emissões líquidas zero até 2050, o país tem como objetivo, mesmo que no papel, de reduzir drasticamente seu impacto ambiental (*United States*, 2021). Essas metas requerem uma transformação profunda em todos os aspectos da economia, desde a geração de energia até os padrões de consumo e produção. Isso significa uma mudança para fontes de energia renovável, a adoção generalizada de tecnologias limpas e a implementação de políticas ambiciosas para reduzir as emissões em todos os setores.

4.3.1 Calculadora Estadunidense

A *GAIN Energy Calculator* é uma ferramenta desenvolvida pelo *Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear* (Gateway para Aceleração da Inovação Nuclear), uma iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) que visa facilitar e acelerar o desenvolvimento de tecnologias nucleares avançadas nos Estados Unidos (Figura 25). A calculadora de energia é uma ferramenta de modelagem e simulação desenvolvida para ajudar na formulação de políticas energéticas e climáticas de longo prazo. Esse modelo foi inspirado no "*UK 2050 Calculator*", que, conforme mencionado anteriormente, foi criado para explorar diferentes caminhos de redução de emissões de gases de efeito estufa no Reino Unido até o ano de 2050 (GAIN, 2024).

Figura 25 - Interface web GAIN Energy Calculator.



Fonte: captura de tela obtida pela autora, utilizando a GAIN Energy Calculator 2024.

A exemplo das demais calculadoras, a ferramenta permite que os usuários explorem e avaliem uma ampla gama de opções políticas e tecnológicas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa ao longo das próximas décadas. Os usuários podem ajustar variáveis como o mix de energia, eficiência energética, transporte, uso da terra e outras políticas relacionadas ao clima para ver como essas escolhas afetam as emissões de carbono e o clima futuro. As fontes de dados utilizadas para a construção da calculadora foram:

- *US Energy Information Administration;*
- *Center for Climate and Energy Solutions;*
- *US Energy Information Administration State Energy Data System;*
- *US Department of Agriculture Economic Research Service (USDA-ERS);*
- *US Energy Information Administration;*
- *US Energy Information Administration Manufacturing Energy Consumption Survey; e*
- *US Census.*

4.3.1.1 Cenários

A calculadora de energia oferece diversas opções de análise, entre elas estão a possibilidade do usuário de criar o próprio cenário e a utilização de cenários já predefinidos na ferramenta, sugeridos a partir de documentos e dados oficiais do país. Os cenários predefinidos são classificados como “caminhos extremos” e “caminhos governamentais”, e oferecem diferentes trajetórias de prospecção. Os cenários

apresentados iniciaram com dados do ano de 2017 devido ao formato disponível na calculadora. No entanto, esse não é um parâmetro específico das metas do país, que tem como base comparativa os níveis de emissão do ano de 2005.

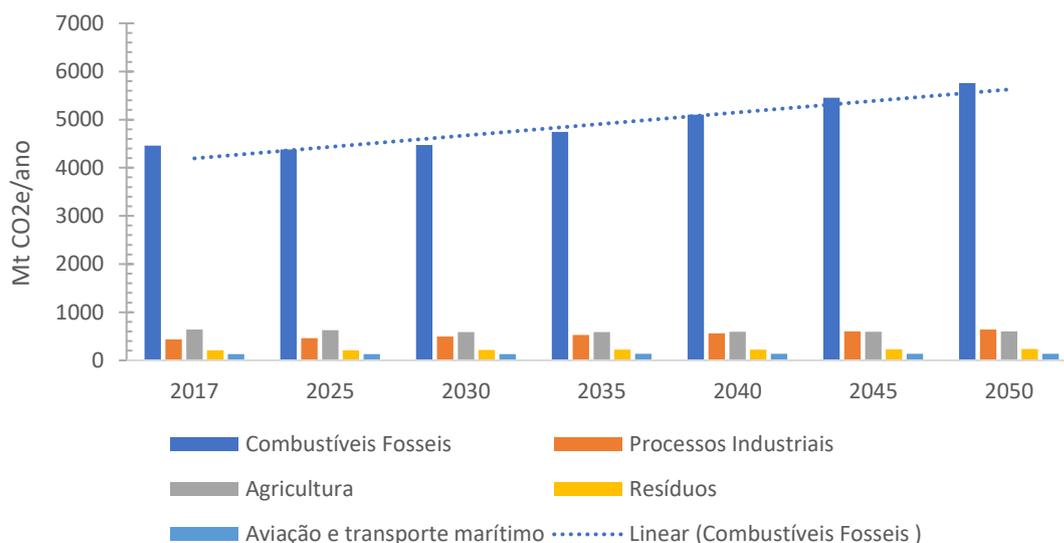
A análise foi conduzida considerando um cenário predefinido pela calculadora e a criação de outro cenário otimista e mais alinhado com as metas de redução estabelecidas na NDC. O primeiro cenário selecionado, "*Doesn't tackle climate change*", representa um cenário *Business as Usual* (BAU), onde não são tomadas medidas significativas para combater as mudanças climáticas. Já o segundo cenário, é considerado um cenário otimista, caracterizado por uma maior adoção de energias renováveis e eficiência energética. Esses dois cenários representam extremos opostos em termos de abordagem e resultados.

4.3.1.1.1 Cenário *Doesn't tackle climate change* (BAU)

O cenário "*Doesn't tackle climate change*" ("Não combate as mudanças climáticas"), também conhecido como BAU (*Business as Usual*), representa uma abordagem em que não são implementadas medidas significativas para lidar com as mudanças climáticas. Neste cenário, as políticas e práticas existentes permanecem amplamente inalteradas, com uma ênfase contínua na exploração e uso de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão. Não são adotadas políticas ou regulamentações para limitar as emissões de GEE e a dependência contínua dessas fontes de energia resulta em altos níveis de emissões de carbono.

Como resultado, o cenário BAU tende a perpetuar e até mesmo a intensificar os impactos das mudanças climáticas atuais, incluindo aumento das temperaturas globais, eventos climáticos extremos, acidificação dos oceanos e perda de biodiversidade. Este cenário destaca os desafios e as consequências de não agir de forma proativa para mitigar as mudanças climáticas e destaca a necessidade urgente de ações decisivas para enfrentar esse problema global. Na Figura 26, é possível observar um aumento regular nas emissões provenientes de combustíveis fósseis. Essa tendência ascendente aponta para um aumento contínuo das emissões decorrentes do uso de recursos não renováveis no setor energético. Portanto, revela-se urgente limitar as fontes de energia mais poluentes e implementar medidas para reduzir a dependência de fontes fósseis.

Figura 26 - Projeção de emissões de GEE dos Estados Unidos - cenário BAU.

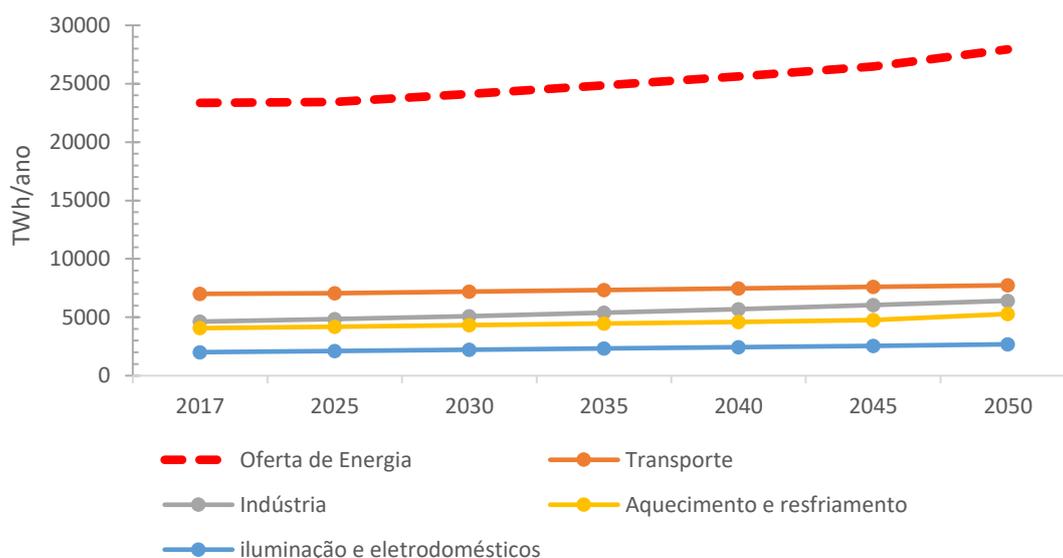


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da *GAIN Energy Calculator* (2024).

A Figura 27, apresenta a projeção de demanda e oferta de energia dos Estados Unidos. Nesse cenário, espera-se que a demanda por energia continue a crescer à medida que a população e as atividades econômicas aumentam. Isso resultará em uma maior dependência de combustíveis fósseis, entretanto os dados da calculadora mostram que a demanda de energia cresce de maneira modesta, com algum destaque para os setores de transporte e indústria. No entanto, apesar desse crescimento moderado, os setores de transporte e indústria continuam a desempenhar um papel fundamental na demanda total de energia, refletindo sua importância na economia. Nesse contexto, é crucial desenvolver estratégias que conciliem o crescimento econômico com a redução das emissões e a promoção da sustentabilidade energética.

Ainda no contexto da Figura 27, a oferta de energia é apresentada como superior à demanda, devido a uma consideração específica: a oferta aborda apenas a produção bruta de energia, sem considerar as perdas associadas à conversão e transmissão. Essas perdas são uma parte normal do processo de geração de energia e transporte. Por exemplo, é comum que apenas cerca de um terço do calor gerado a partir de combustíveis fósseis e nucleares seja convertido em eletricidade utilizável, para usinas termelétricas em ciclo simples (vapor) e entre 40-50% para termelétricas em ciclo combinado (gás-vapor), além de perdas em transmissão e distribuição (8%) na rede. Portanto, embora a oferta bruta possa parecer alta em comparação com a demanda, é importante reconhecer que parte dessa oferta é perdida durante a conversão e transmissão, o que pode resultar em uma oferta líquida menor para atender à demanda real (GAIN, 2024).

Figura 27 - Projeção de demanda e oferta de Energia dos Estados Unidos - cenário BAU.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da *GAIN Energy Calculator* (2024).

A trajetória BAU resultará em um aumento de 30% nas emissões de GEE em 2030, em comparação com 2005. Isso indica que, sob esse cenário, os Estados Unidos não conseguirão cumprir sua NDC e as metas estabelecidas para redução de emissões até 2030, inviabilizando também a meta de emissão líquida zero até 2050. Este cenário sublinha a necessidade de adotar medidas para desviar a trajetória atual e promover uma transição energética rumo a um futuro mais sustentável e compatível com as metas climáticas estabelecidas internacionalmente. Além disso, o aumento projetado nas emissões no cenário BAU representa uma ameaça ao meio ambiente e à estabilidade climática global, especialmente em um país como os Estados Unidos, que incentiva o consumo e já possui emissões significativas.

4.3.1.1.2 Cenário Otimista - Maior uso de energias renováveis e eficiência energética

Este cenário⁵, simulado pela autora, representa uma abordagem otimista e possível para o futuro energético do país, com o objetivo de se aproximar do cumprimento das metas estabelecidas. Caracterizado pelo aumento significativo no uso de fontes de energia renovável e pela melhoria da eficiência no uso de energia, este cenário prevê que políticas governamentais e incentivos serão direcionados para promover a transição para energias

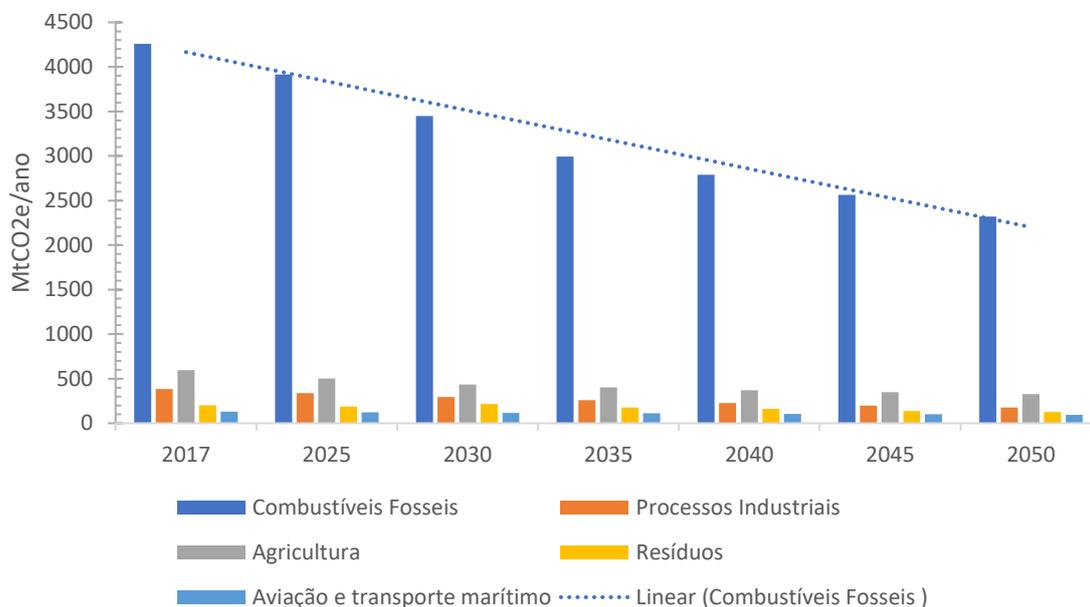
⁵ Disponível em:

<https://gain.ornl.gov/#/calculator/calculate/share/304444111441231104433110044144402433012033022101203112?state=US&target=100>

limpas e renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa. Além disso, medidas serão implementadas para aumentar a eletrificação e a eficiência energética em todos os setores, incluindo residencial, comercial, industrial e de transporte. A combinação dessas iniciativas resulta em uma redução substancial das emissões de GEE, menor dependência de combustíveis fósseis e uma economia mais sustentável e resiliente. Este cenário representa uma visão otimista para o futuro, onde a inovação tecnológica e políticas progressistas impulsionam a transição para um sistema energético mais limpo, seguro e sustentável.

Na Figura 28, é apresentada a projeção de emissões para o cenário otimista, as projeções nesse cenário mostram uma tendência de queda nas emissões ao longo do tempo, refletindo a implementação de políticas e medidas destinadas à redução. Todos os setores apresentam redução significativa ao longo dos anos, com um grande destaque para os combustíveis fósseis em que as emissões caem praticamente pela metade. Entretanto, mesmo nesse cenário profundamente positivo, de acordo com os resultados da calculadora não será possível alcançar emissões líquidas zero até 2050, mostrando que será necessário esforços ainda mais intensos ao longo dos próximos anos.

Figura 28- Projeção de emissões de GEE dos Estados Unidos - cenário otimista.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GAIN *Energy Calculator* (2024).

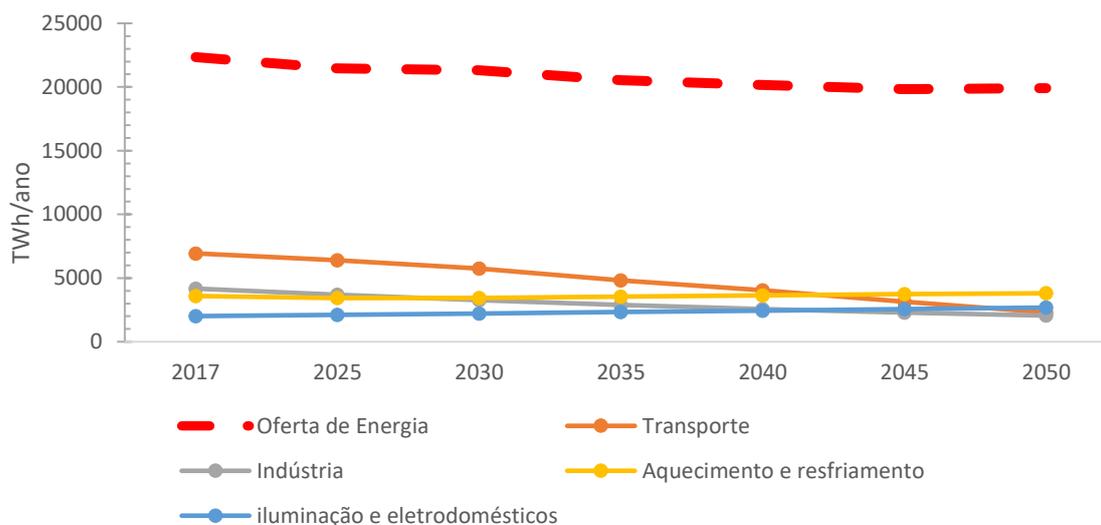
Em nenhum cenário da calculadora é possível chegar ao Net Zero em 2050, mesmo testando o limite máximo de transformação, ainda assim não é possível alcançar a meta. Para alcançar essa meta, será necessário o incentivo máximo de desenvolvimento

de tecnologias de captura de carbono e inovações tecnológicas, como o uso de baterias de alta eficiência e combustíveis sintéticos. O desenvolvimento dessas tecnologias é crucial para compensar as emissões residuais que não podem ser eliminadas apenas com a transição para fontes de energia renovável e eficiência energética. Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) podem ajudar a capturar CO₂ das fontes industriais e das centrais elétricas antes que ele seja emitido na atmosfera. Da mesma forma, combustíveis sintéticos, produzidos a partir de fontes renováveis, podem substituir os combustíveis fósseis em setores difíceis de descarbonizar, como a aviação e o transporte marítimo.

Além disso, no caso dos Estados Unidos, a meta da NDC de reduzir as emissões em 50-52% abaixo dos níveis de 2005 inclui mudanças de uso da terra. Excluindo o uso da terra, isso corresponde a uma redução de 43-50% abaixo dos níveis de 2005, ou aproximadamente 3.675-4.178 MtCO_{2e}, até 2030. Para se manter abaixo do limite de temperatura de 1,5°C, as emissões dos EUA em 2030 precisariam ser de cerca de 2.947 MtCO_{2e} (excluindo o uso da terra), o que representa uma redução de 60% abaixo dos níveis de 2005. Isso deixa uma lacuna de ambição de 728 MtCO_{2e}. No cenário otimista, a meta de redução para 2030 ainda não seria alcançada, pois os valores absolutos são de 4.513 MtCO_{2e}.

Em termos de demanda e oferta energética, a Figura 29, exibe a projeção para o cenário otimista. Nessa projeção, observa-se uma redução na demanda de energia ao longo do tempo, mesmo com o contínuo crescimento do país. Isso ocorre devido à previsão de uma crucial mudança no uso de tecnologias e nos hábitos da população. Essa diferença é particularmente visível nos setores de transporte e indústria, onde se espera uma redução significativa na demanda de energia, devido à adoção de práticas mais eficientes e tecnologias mais limpas. A curva de oferta de energia nesse cenário, assim como no explicado anteriormente, aborda apenas a produção bruta de energia, sem considerar as perdas associadas à conversão e transmissão.

Figura 29 - Projeção de demanda e oferta de energia dos Estados Unidos - cenário otimista.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GAIN Energy Calculator (2024).

Com o objetivo de alcançar as metas climáticas nos últimos anos, os Estados Unidos têm implementado uma série de programas e políticas destinados a promover a transição energética do país. Recentemente, sob a administração Biden, foi promulgado o *Inflation Reduction Act* (IRA), que destina investimentos significativos em energia limpa e tecnologias sustentáveis, US\$ 391 bilhões é o montante que foi destinado para esse fim, sendo que energia, manufatura e meio ambiente compõem a maior parcela dos recursos alocados. Entretanto, aproximadamente US\$ 342 bilhões, que corresponde a 88% desse total, serão destinados a investimentos em eletricidade e transmissão. Pelo grande volume envolvido, a IRA pode ser considerada a maior ação histórica dos Estados Unidos em prol das mudanças climáticas e da transição energética, pelo fato de seu compromisso de investimentos ter como objetivo resultar na redução de 50-52% das emissões do país até 2030, tomando 2005 como ano-base (IAG, 2024). No entanto, mudanças políticas futuras podem, eventualmente, mudar essa tendência de investimentos.

No setor de transportes, o IRA desempenha um papel crucial na redução das emissões GEE nos Estados Unidos. Como maior fonte dessas emissões no país, especialmente de veículos leves e caminhões, sem as intervenções necessárias e adequadas, espera-se que as emissões dos setores marítimo e de aviação também aumentem nas próximas décadas. Para abordar essa questão, o IRA promove o processo de eletrificação e oferece incentivos fiscais e programas para impulsionar a produção de biocombustíveis limpos e combustíveis sustentáveis, como os *Sustainable Aviation Fuels*

(SAF). Estendendo os incentivos fiscais até o final de 2024, a IRA demonstra um compromisso contínuo com a redução das emissões no setor de transportes e o avanço em direção a uma economia mais sustentável (IAG, 2024).

No cenário otimista aqui simulado, que projeta uma queda nas emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo, o papel do IRA se destaca como um impulsionador significativo dessa tendência positiva. Especificamente no setor de transportes, o IRA desempenha um papel importante ao promover a transição para biocombustíveis limpos e combustíveis sustentáveis. Essas medidas não apenas contribuem para a redução das emissões no setor, mas também estão alinhadas com as metas mais amplas do cenário otimista de redução de emissões em diversos setores da economia (IAG, 2024).

4.3.2 Avaliações e recomendações

De acordo com especialistas do CAT, a implementação da Lei de Redução da Inflação (IRA), representou um marco importante na política climática dos EUA. Embora os efeitos completos da IRA ainda não sejam visíveis, o primeiro ano de sua implementação mostrou sinais promissores. A lei está mobilizando investimentos históricos em soluções de energia limpa, impulsionando uma onda de projetos sustentáveis em todo o país, gerando centenas de milhares de novos empregos, mobilizando investimentos do setor privado e acelerando ação estadual e local. No entanto, apesar desse avanço significativo, é imperativo que os EUA adotem políticas igualmente audaciosas em nível setorial e abandonem a crescente dependência de combustíveis fósseis para alcançar o ritmo e a escala necessários de redução de emissões para cumprir sua NDC (CAT, 2024d).

No momento, as metas, ações e financiamentos climáticos dos EUA são classificados como "Insuficientes" pelo CAT. Embora as projeções incluindo a IRA mostrem uma redução mais acentuada nas emissões até 2030, o país ainda está consideravelmente longe de alcançar as reduções necessárias, destacando a necessidade urgente de mais ações. O atual alvo dos EUA para 2030 não é compatível com o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5°C. Para alcançar suas metas, o país precisa adotar regras mais rígidas de emissão para veículos e limites de emissão para algumas usinas de energia a combustíveis fósseis. No entanto, essas regras enfrentam desafios legislativos consideráveis. A recente expansão da produção e exportação de petróleo e gás dos EUA, juntamente com projetos de infraestrutura para expandir ainda mais essa capacidade, compromete a credibilidade do país em seu compromisso com a transição energética e

com a redução das emissões. Essas ações representam um retrocesso nas metas climáticas e minam os esforços globais para limitar o aquecimento global (CAT, 2024d).

A calculadora como ferramenta de apoio também possui as suas limitações. Essa ferramenta, embora seja valiosa para avaliar trajetórias de redução de emissões e cenários climáticos, não está isenta de incertezas que podem influenciar a precisão e interpretação dos resultados. O fato de que nenhum dos cenários da calculadora permite atingir o Net Zero até 2050, mesmo explorando transformações máximas, é um indicador de alerta de que as promessas políticas podem ser inconsistentes. Isso sublinha a necessidade de projetar caminhos mais assertivos e céleres, porém, compatíveis com a realidade, ao mesmo tempo em que se buscam sugestões e soluções alternativas para alcançar as metas comprometidas. Essa abordagem é essencial para enfrentar os desafios climáticos de maneira eficaz, considerando não apenas as limitações técnicas e econômicas, mas também a urgência de ações coordenadas e robustas para mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Além disso, os modelos matemáticos e algoritmos empregados na calculadora podem introduzir incertezas adicionais. Estes modelos são construídos com base em simplificações do sistema energético e climático, o que pode limitar a precisão das previsões, especialmente ao lidar com interações complexas entre diferentes setores econômicos e variáveis ambientais. As suposições e cenários adotados também são fontes de incerteza significativa. A escolha de assumir certas taxas de crescimento econômico, padrões de consumo energético e políticas governamentais pode impactar drasticamente os resultados finais. Essas escolhas muitas vezes refletem expectativas sobre o futuro que podem não se concretizar conforme planejado.

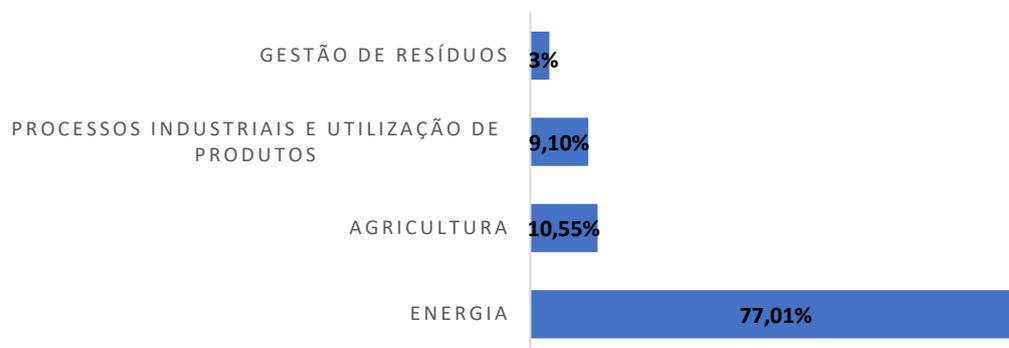
4.4 União Europeia

A União Europeia (UE), com seus mais de 4 milhões de km² de extensão e uma população de 448,4 milhões de habitantes, representa um dos blocos econômicos e políticos mais significativos do mundo contemporâneo (Eurostat, 2021). Composta por um total de 27 países, conhecidos também como Estados Membros, a UE inclui: Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Chipre, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Países Baixos (Holanda), Polônia, Portugal, República Tcheca, Romênia e Suécia (EUR-Lex, 2024).

Essa influência não se limita apenas à sua importância estratégica; os números ecoam a importância econômica da UE, com um PIB total de 14,5 bilhões de euros em 2021 (Eurostat, 2021). No entanto, essa prosperidade vem acompanhada de desafios ambientais consideráveis. Em 2019, as emissões de gases de efeito estufa na UE foram predominantemente associadas ao setor de energia, respondendo por 77,01% do total, com os transportes representando uma parcela significativa desse montante (Parlamento Europeu, 2021). Historicamente, tanto os Estados Unidos quanto a União Europeia emergem como os principais emissores globais, contribuindo conjuntamente com 37% das emissões acumuladas, com uma responsabilidade per capita consideravelmente maior do que a de países em desenvolvimento, como a Índia (WRI Brasil, 2024).

Segundo o Parlamento Europeu, o setor da energia foi responsável por 77,01% das emissões de gases com efeito de estufa em 2019, das quais os transportes representam perto de um terço (Parlamento Europeu, 2021). A Figura 30 apresenta um panorama das emissões de todos os setores, excluindo a utilização da terra, as alterações do uso da terra e as silviculturas (LULUCF). Dos países que mais emitem na União Europeia os destaques são: Alemanha, Reino Unido⁶, França, Itália, Polônia ocupando a primeira a quinta posição consecutivamente.

Figura 30 - Emissões de GEE da UE por setor, ano-base 2019.



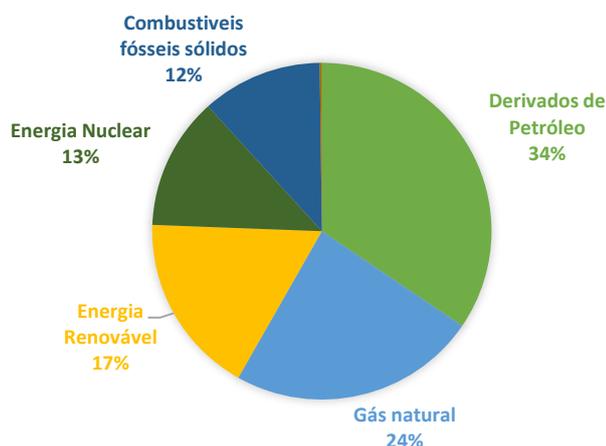
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da Agência Europeia do Ambiente (AEA, 2024).

A Figura 31 apresenta a matriz energética da União Europeia e de acordo com os últimos dados detalhados, a partir de 2020, a composição da oferta total de energia na União Europeia (UE) é predominantemente proveniente de cinco fontes distintas: produtos petrolíferos, incluindo petróleo bruto (aproximadamente 35%) e gás natural (24%); energias renováveis (17%); energia nuclear (13%); e combustíveis fósseis sólidos,

⁶ Em 2019, o Reino Unido ainda era parte da União Europeia.

como o carvão (12%). No entanto, há notáveis variações entre os Estados-Membros da UE. Por exemplo, em 2020, os produtos petrolíferos representaram mais de 85% da oferta total de energia em Chipre e Malta. Na Itália, o gás natural contribuiu com 40% da oferta total de energia, enquanto na França, a energia nuclear representou 41%. Já na Suécia, as energias renováveis abasteceram quase metade da demanda total de energia (EPA, 2022).

Figura 31 - Matriz energética da UE em 2020.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da Eurostat (2024).

Para promover a transição energética para fontes renováveis, a matriz energética do bloco está passando por mudanças substanciais. Liderando em capacidade instalada em tecnologias de energia verde, como a eólica offshore, a UE demonstra um compromisso com a redução das emissões de carbono e a mitigação das mudanças climáticas. Apoiados pela Comissão Europeia, os governos dos países membros têm direcionado enormes investimentos para energias renováveis, totalizando centenas de milhares de milhões de euros ao longo dos últimos anos. Segundo a IRENA e a *Climate Policy Initiative* (2023), os investimentos em energias renováveis na Europa aumentaram progressivamente, atingindo 54 bilhões de dólares em 2019, 67 bilhões em 2020 e, segundo dados preliminares, aproximadamente 77 bilhões de dólares em 2021.

A União Europeia apresentou seus primeiros compromissos durante a COP-20 em Lima, em 2014. Posteriormente, essa INDC foi convertida em NDC quando a UE ratificou o Acordo de Paris em outubro de 2016. A NDC da UE estabeleceu uma meta de redução de pelo menos 40% nas emissões de GEE em toda a economia até 2030, em comparação com os níveis de 1990. Em 11 de dezembro de 2020, o Conselho Europeu aprovou uma nova e mais ambiciosa meta climática para 2030, aplicável à UE e seus 27 Estados-Membros.

Essa meta consiste em uma redução interna líquida de pelo menos 55% nas emissões de GEE até 2030, em comparação com 1990, e foi submetida como uma NDC atualizada e aprimorada ao Secretariado da UNFCCC, em 18 de dezembro de 2021 (*Spain & European Commission, 2023*). Além disso, a UE definiu metas ambiciosas no setor de energia para melhorar a eficiência energética e aumentar a participação de energias renováveis em seu mix energético.

Em consonância com o plano da Comissão Europeia para tornar a Europa independente dos combustíveis fósseis russos antes de 2030 (*RePowerEU*), a UE concordou em reforçar a meta de redução do consumo final de energia em 11,7% até 2030. Também foi estabelecida uma nova meta para aumentar a participação de energias renováveis no consumo final de energia em pelo menos 42,5% até 2030, com um adicional indicativo de 2,5%, que poderia elevar esse número para 45%. Adicionalmente, a UE comprometeu-se com a meta de alcançar a neutralidade climática até 2050 (*Spain & European Commission, 2023*).

4.4.1 Calculadora da União Europeia

A *European Calculator (EUCalc)*, financiada pela Comissão Europeia, é uma ferramenta sofisticada, projetada para auxiliar na avaliação e formulação de políticas climáticas e energéticas tanto em nível europeu quanto nos Estados Membros da União Europeia. Ela abrange diferentes setores, como transportes, edifícios e uso do solo, em módulos separados, e integra as interações entre esses setores para fornecer uma análise abrangente e integrada. A EUCalc (Figura 32), utiliza modelos computacionais complexos, utilizando a plataforma KNIME, que integram uma variedade de dados, incluindo informações sobre a economia, demografia, padrões de consumo de energia e tecnologias disponíveis (*BPIE et al., 2020*).

Figura 32 - Interfaceweb EUCALC.



Fonte: captura de tela obtida pela autora, utilizando a EUCALC.

Com isso, ela pode prever como diferentes políticas e cenários podem afetar as metas e objetivos estabelecidos pela União Europeia em áreas como redução de emissões de carbono e promoção de energia renovável. Essa ferramenta desempenha um papel crucial ao fornecer análises detalhadas que auxiliam os formuladores de políticas na identificação das estratégias mais eficazes para atingir os objetivos de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas estabelecidos pela UE. Além disso, ao permitir que o usuário escolha o nível de ambição de cada fator individualmente, a EUCalc possibilita explorar diferentes caminhos para 2050, levando em conta diversos fatores, como custos, tecnologia e políticas climáticas, o que ajuda a entender as consequências das decisões e a planejar um futuro mais sustentável (Pestiaux *et al.*, 2019).

O modelo EUCalc é controlado usando uma variedade de cenários pré-definidos a partir de documentos e estudos oficiais e também de alavancas que representam mudanças que podem ser feitas para mitigar as mudanças climáticas até 2050. Cada alavanca tem quatro níveis diferentes de esforço. Esses quatro níveis oferecem uma ampla variação de escolhas de mitigação e impactos de sustentabilidade, incluindo níveis intermediários. Consequentemente, o modelo pode fornecer uma ampla gama de trajetórias decorrentes da combinação de todas as alavancas e configurações de níveis (Pestiaux *et al.*, 2019).

- **Nível 1:** Este nível contém projeções alinhadas e coerentes com as tendências observadas. Representa uma continuação das tendências atuais sem mudanças significativas.
- **Nível 2:** Este nível é um cenário intermediário, mais ambicioso do que as tendências observadas, mas que não atinge o pleno potencial das soluções disponíveis. Ele representa um aumento na ambição em relação às tendências atuais.
- **Nível 3:** Este nível é considerado muito ambicioso, mas realista, dado os avanços tecnológicos atuais e as melhores práticas observadas em algumas áreas geográficas. Representa um esforço significativo além das tendências atuais.
- **Nível 4:** Este nível é considerado transformador e requer esforços adicionais significativos, como mudanças profundas na organização da sociedade, uma rápida adoção de medidas profundas pelo mercado, um grande desenvolvimento de infraestruturas e avanços tecnológicos importantes. Esse nível implica em mudanças radicais e é necessário para alcançar objetivos ambiciosos de mitigação das mudanças climáticas até 2050, embora seja tecnicamente possível.

4.4.1.1 Cenários

Para este estudo, foram selecionados dois cenários disponíveis na calculadora, cada um com suas características específicas e objetivos distintos. Essa escolha foi feita com o propósito de explorar diferentes perspectivas e níveis de ambição em relação às projeções de redução de emissões e uso de energia sustentável. Os cenários escolhidos, *EU Reference* e *Life*, representam abordagens variadas para lidar com as mudanças climáticas e alcançar metas de sustentabilidade a longo prazo. A escolha desses dois cenários foi baseada em diferentes considerações e objetivos. O cenário *EU Reference* foi selecionado com o intuito de replicar, na medida do possível, as principais suposições setoriais e resultados do cenário de referência da União Europeia, conforme detalhado por Capros *et al.*, (2016). Este cenário busca seguir de perto as projeções e resultados estabelecidos no *EU-Reference* cenário, visando proporcionar uma base sólida para comparações e análises futuras.

Por outro lado, o cenário *Life* foi escolhido devido ao seu nível de ambição elevado em relação ao *Baseline LTS (Long-Term Strategy)*, outro cenário disponível na calculadora, com o objetivo de alcançar o máximo de redução de emissões possível até

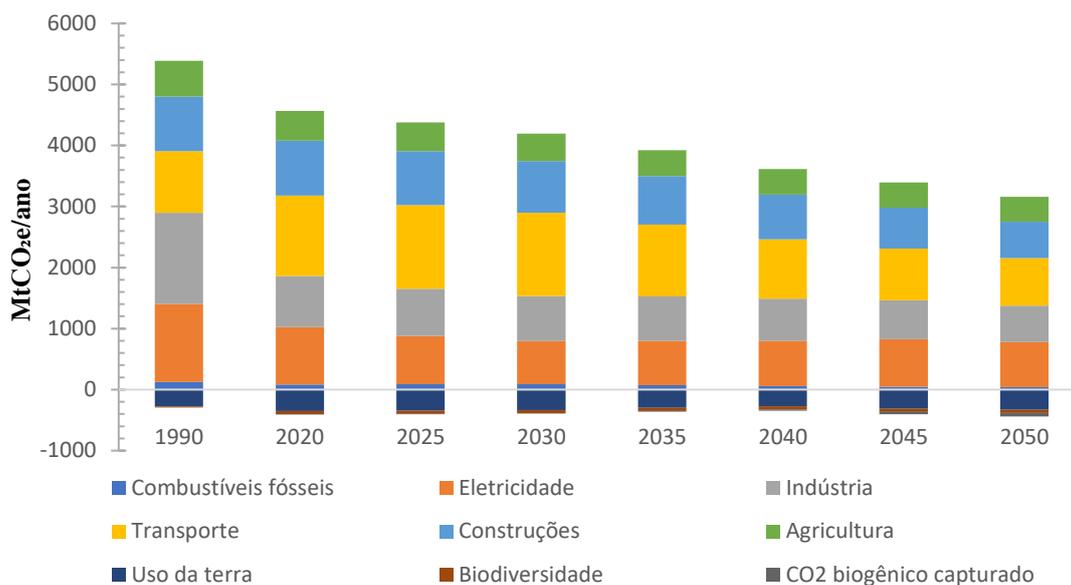
2050, conforme assumido no EUCalc. Sob este cenário, os níveis de ambição para comportamentos-chave foram aumentados em comparação com o *Baseline LTS*, especialmente em relação a tecnologia e combustíveis. Além disso, este cenário destaca um foco específico em práticas sustentáveis, como o equilíbrio da energia renovável para atender à demanda específica e o limite do excedente de energia a menos de 50% da capacidade de armazenamento anual. O cenário *Life* também enfatiza a busca por padrões máximos de agroecologia na produção de cultivos e gado, bem como a gestão sustentável de florestas. Essas características fazem dele uma escolha valiosa para explorar estratégias mais ambiciosas e sustentáveis para mitigar as mudanças climáticas e promover a resiliência ambiental e econômica a longo prazo.

Um aspecto fundamental da calculadora é sua capacidade de exibir o histórico completo de dados disponíveis desde 1990, que é o ano base utilizado na NDC da UE. Para os cenários a seguir, serão utilizados dados de 1990 como parâmetro inicial, seguidos por dados de 2020 até 2050, proporcionando uma visão abrangente do passado, presente e futuro. Isso permitirá uma análise mais abrangente das projeções e ajudará a avaliar o progresso em direção às metas e objetivos estabelecidos. Essa abordagem histórica e prospectiva possibilita a obtenção de cenários mais consubstanciados à discussão.

4.4.1.1.1 Cenário *EU Reference*

Este cenário representa o padrão definido pela calculadora da UE, refletindo uma trajetória que, em certa medida, já reproduz alguns dos esforços realizados nos últimos anos pelo bloco. No entanto, Figura 33 apresenta a projeção de emissões gerais de GEE por setor. Nesse cenário, a redução de emissões para 2030 seria de 25,2% e para 2050 seria de 46,6%, considerando o ano de 1990 como referência. Esses números indicam que as metas estabelecidas pela NDC da UE não seriam atingidas. Isso destaca a necessidade de implementação de medidas adicionais e mais ambiciosas para garantir que as metas de redução de emissões sejam alcançadas dentro do prazo estabelecido.

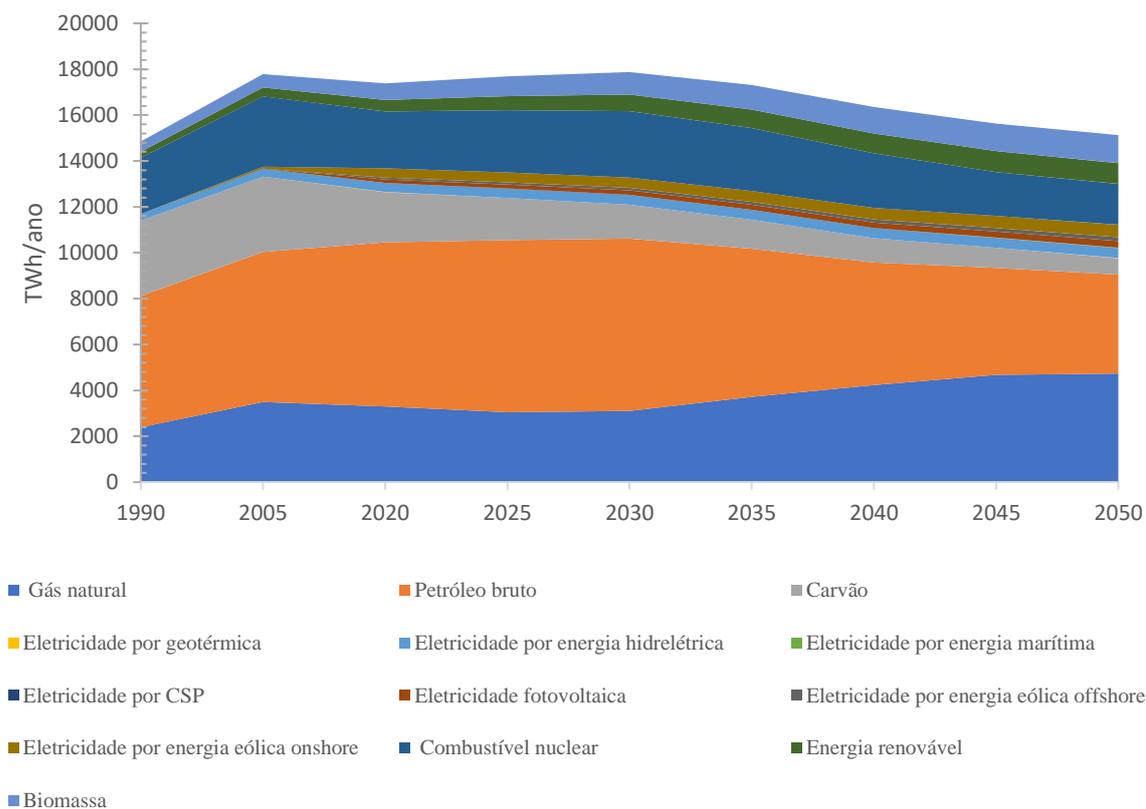
Figura 33 - Emissões gerais de GEE da UE por setor - cenário *EU Reference*.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EU Calc (2024).

Quando observamos a oferta de energia, conforme mostrado na Figura 34, apesar do aumento significativo do uso de energias renováveis na matriz energética do bloco, este cenário projeta uma oferta ainda intensa por fontes de energia baseadas em petróleo bruto e gás natural. Ao analisar as projeções de investimento por modalidade energética, também podemos constatar que os investimentos estariam predominantemente direcionados para uma matriz energética baseada em gás natural. Nesse contexto, a oferta de energia renovável representa um pouco mais de 23% da projeção geral de oferta de energia para o ano de 2030, evidenciando que não será possível alcançar as metas estabelecidas na NDC.

Figura 34 - Oferta de Energia por ano da UE - cenário *EU Reference*.

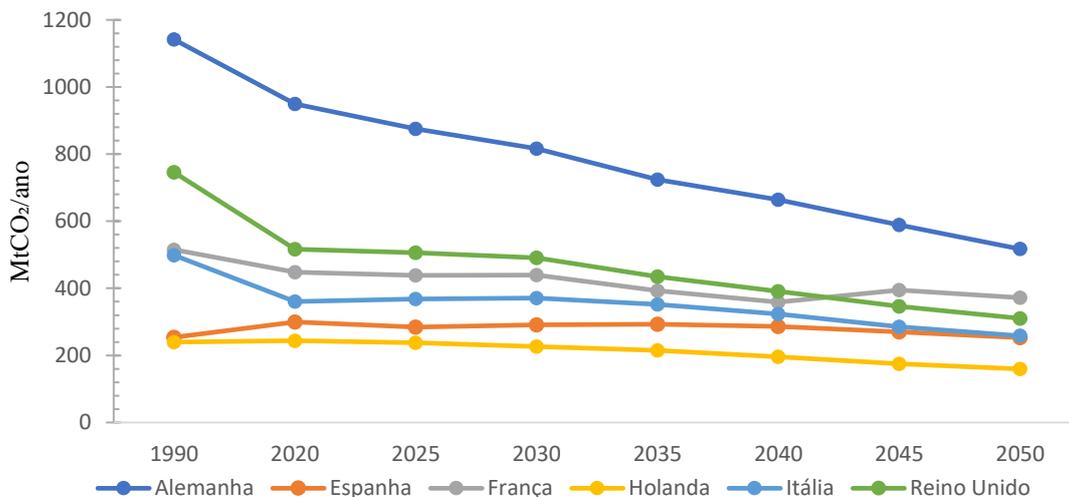


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EU Calc (2024).

Um aspecto interessante dos dados apresentados nesse cenário é que, diferentemente do cenário BAU dos Estados Unidos, por exemplo, mesmo em um cenário não tão ambicioso para o caso europeu, as emissões gerais continuam com projeção de queda. Isso pode ser atribuído aos investimentos europeus massivos na redução das emissões, que incluem iniciativas para promover energias renováveis, aumentar a eficiência energética e implementar políticas ambientais mais rigorosas.

A Figura 35 traz a projeção das emissões de GEE nos países mais emissores da União Europeia. Um grande destaque é dado à Alemanha, que, apesar de ser o maior emissor do bloco, mostra uma trajetória bem-sucedida em diminuir suas emissões ao longo do tempo. Ao contrário da França, por exemplo, que, apesar de emitir muito menos, mostra em sua trajetória futura de certa instabilidade, oscilando entre períodos de aumento e redução das emissões. Essa análise dos diferentes padrões de emissões entre os países destaca a importância de estratégias específicas e adaptadas às realidades individuais de cada nação para alcançar as metas de redução de emissões da EU.

Figura 35 - Prospecção das emissões de GEE dos países mais emissores da EU - cenário *EU Reference*.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EU Calc (2024).

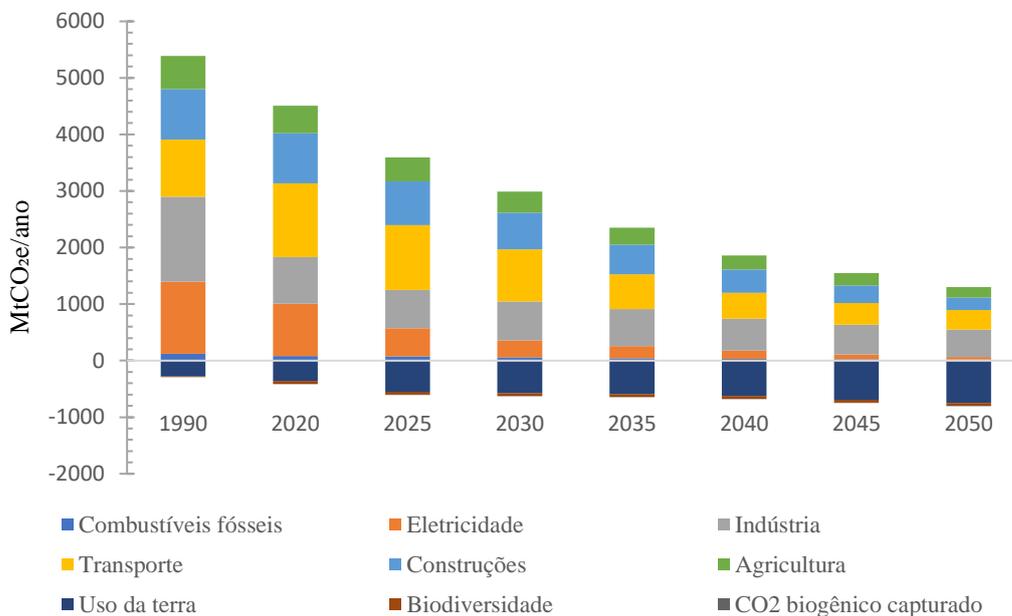
4.4.1.1.2 Cenário *Life*

O cenário *Life* destaca-se por sua abordagem ambiciosa e progressista em relação à mitigação das mudanças climáticas e à promoção da sustentabilidade. Este cenário busca atingir o máximo de redução de emissões possível até 2050, superando os níveis de ambição estabelecidos no Baseline LTS (*Long-Term Strategy*). Ele se concentra em elevar os padrões de comportamento e tecnologia para alcançar níveis mais elevados de eficiência energética e uso de energias renováveis. Além disso, o cenário *Life* enfatiza a importância da gestão sustentável de recursos naturais, como agricultura e florestas, buscando alcançar os mais altos padrões de agroecologia e práticas de manejo florestal. Essa abordagem holística visa não apenas reduzir as emissões de GEE, mas também promover uma transição para uma economia mais verde e resiliente.

Apesar do cenário *Life* apresentar resultados promissores para o bloco, as metas para 2030 ainda assim não seriam alcançadas, a redução nesse caso seria de 53,6% e a meta da NDC vigente é de uma redução de emissões de pelo menos 55% até 2030. Ainda nesse cenário para 2050 uma redução significativa de 90,16% seria possível, apesar de também não alcançar a meta de emissões líquidas zero para o período. Mesmo não alcançando as metas, esses números refletem uma significativa transformação no perfil de emissões da União Europeia, destacando áreas específicas de sucesso. Na Figura 36, são apresentadas as emissões gerais de GEE para esse cenário, onde se observa que os

setores que mais se destacam na redução são: o setor de construção, com uma queda intensa, e o uso de combustíveis fósseis.

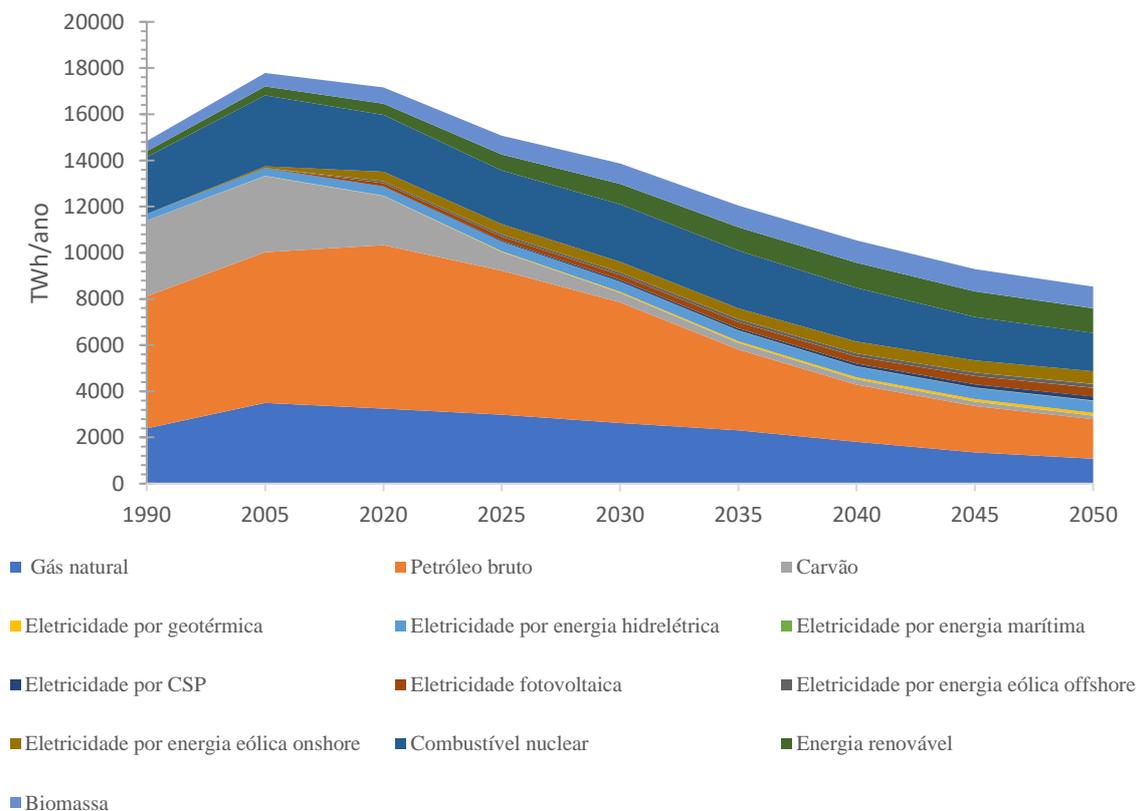
Figura 36 - Emissões gerais de GEE da UE por setor - cenário *Life*.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EUCalc (2024).

Nesse cenário, não apenas as emissões de GEE registram uma queda substancial, mas também a oferta de energia diminui. Essa redução, Figura 37, sugere um indicativo claro de aumento da eficiência energética dentro do bloco. O declínio na oferta por energia, combinado com o aumento da participação de fontes renováveis e práticas sustentáveis, indica uma transição, de certa forma, bem-sucedida para um sistema energético mais eficiente e resiliente. A eficiência energética torna-se, assim, um pilar fundamental na construção de uma economia de baixo carbono, assim com o uso do solo que possibilite a captura de carbono. Não obstante, o balanço de emissões da União Europeia é muito sensível aos balanços de importação e exportação do bloco (Strapasson *et al.*, 2020).

Figura 37 - Oferta de Energia por ano da UE - cenário *Life*.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EUCalc (2024).

Políticas relacionadas à eficiência energética podem ser fortalecidas com base nesses resultados. Por exemplo, os governos podem implementar políticas de incentivo à eficiência energética em edifícios, indústrias e transporte, oferecendo subsídios para a adoção de tecnologias mais eficientes, promovendo normas de construção sustentável, facilitando o acesso a financiamento para projetos de eficiência energética e desenvolvendo campanhas de conscientização pública sobre a importância da economia de energia. Além disso, podem ser estabelecidas metas e regulamentações mais ambiciosas para reduzir o consumo de energia e aumentar a proporção de energia proveniente de fontes renováveis.

Na UE, estão em andamento diversas políticas e iniciativas voltadas para atingir a neutralidade climática até 2050, conforme delineado no Pacto Ecológico Europeu e no Acordo de Paris (União Europeia, 2021). Um exemplo é a Lei do Clima da UE, *European Climate Law*, que estabelece metas ambiciosas de redução de emissões em pelo menos 55% até 2030, comparado aos níveis de 1990, e a neutralidade climática até 2050. Além disso, o Sistema de Comércio de Emissões (SCE), em inglês *EU Emissions Trading*

System (EU ETS), da UE desempenha um papel crucial na redução das emissões industriais ao limitar as emissões permitidas e promover investimentos em tecnologias de baixo carbono.

Outro aspecto importante é a renovação energética de edifícios na UE, com o propósito de torná-los mais eficientes em termos energéticos e reduzir suas emissões de carbono. Essa iniciativa abarca medidas como incentivos financeiros, regulamentações mais rigorosas e assistência técnica para melhorias na eficiência energética (Comissão Europeia, 2020). Ainda, a UE está promovendo uma transição para formas de transporte mais limpas e sustentáveis por meio de sua Estratégia de Mobilidade Sustentável, a qual engloba incentivos para o uso de veículos elétricos, investimentos em transporte público e ciclovias, e promoção do transporte multimodal (Comissão Europeia, 2020).

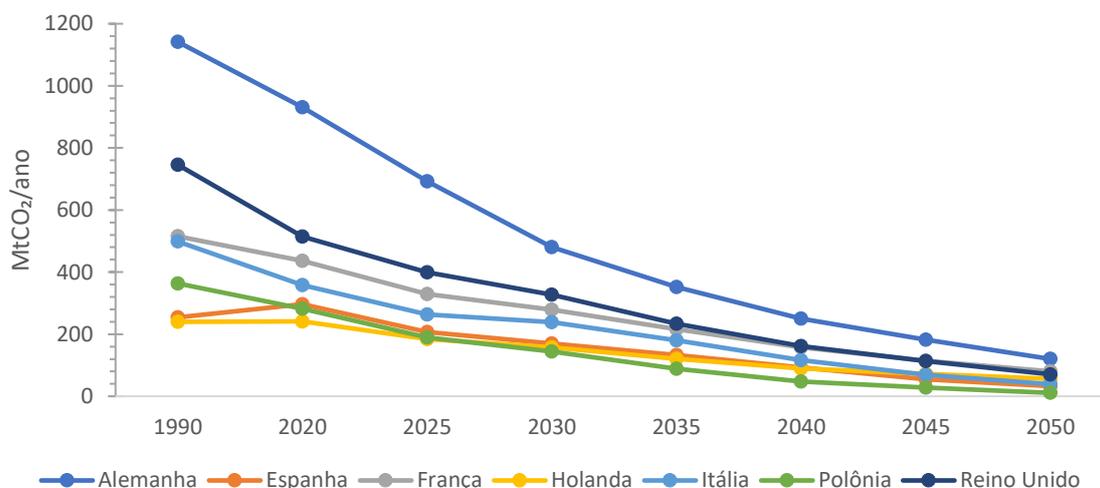
O Pacto Ecológico Europeu, *European Green Deal*, lançado em 2019, é uma iniciativa ampla que visa transformar a economia da UE em uma economia mais verde e sustentável (União Europeia, 2021). Ele abrange diversas áreas, desde energia limpa e agricultura sustentável até proteção da biodiversidade, economia circular e digitalização verde. Essas políticas e iniciativas refletem o compromisso da UE em lidar com a crise climática e promover uma transição justa e sustentável para uma economia de baixo carbono. Em nível nacional, muitos países têm implementado suas próprias políticas e programas para fomentar a eficiência energética, como incentivos fiscais para a compra de veículos elétricos, subsídios para a instalação de painéis solares em residências, e regulamentações de eficiência energética para edifícios e equipamentos elétricos (Comissão Europeia, 2020).

A Alemanha, como um dos maiores emissores da UE, está focada na transição para energias renováveis, com planos de fechar usinas de carvão e expandir a energia eólica e solar. A França também está comprometida em reduzir suas emissões, com investimentos significativos em energia nuclear e na promoção de transportes públicos e veículos elétricos. A Espanha está implementando políticas para aumentar a participação de energias renováveis em sua matriz energética, com metas ambiciosas para a energia eólica e solar. A Itália está focada na eficiência energética e na modernização de sua infraestrutura para reduzir suas emissões. A Polônia, por sua vez, enfrenta desafios significativos devido à dependência do carvão, mas está trabalhando para diversificar sua

matriz energética e promover fontes mais limpas de energia. Já o Reino Unido⁷, apesar de não fazer mais parte da UE, continua a liderar em políticas climáticas, com uma ênfase na eliminação gradual do carvão, expansão da energia eólica offshore.

No cenário *Life*, Figura 38, as metas de redução de emissões estabelecidas pela Alemanha e pela França parecem ser alcançáveis, e até mesmo superadas, até os anos de 2030 e 2050. Esse cenário pode indicar também, uma maior resiliência e adaptabilidade das economias alemã e francesa às mudanças necessárias para atingir as metas climáticas.

Figura 38 - Prospecção das emissões de GEE dos países mais emissores da UE - cenário *Life*.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EUCalc (2024).

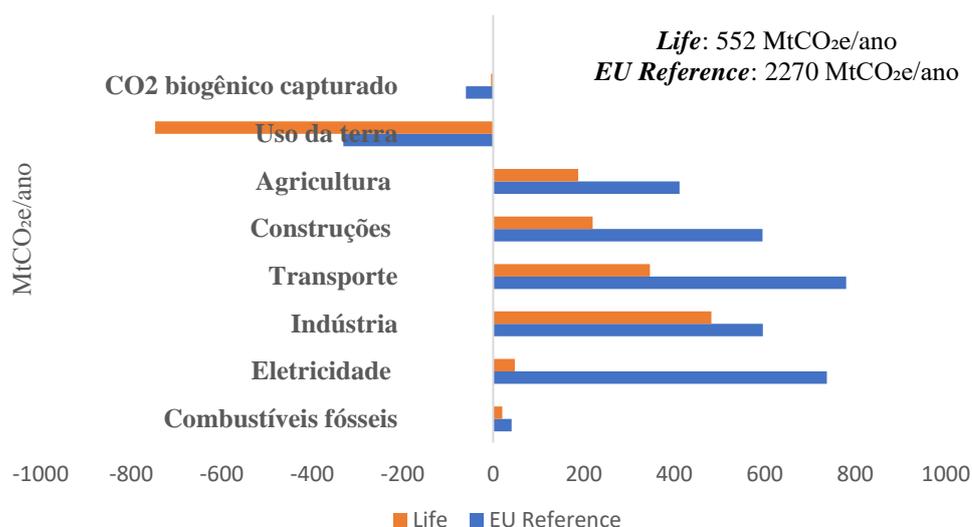
A Figura 39 destaca a grande diferença nas emissões de CO₂ anuais entre os cenários *Life* (em laranja) e *EU Reference* (em azul). No cenário *EU Reference*, as emissões totais alcançam 2.270 MtCO₂e/ano, enquanto no cenário *Life*, as emissões são drasticamente reduzidas para 552 MtCO₂e/ano. Os setores de eletricidade, transporte e indústria são os maiores contribuintes para as emissões no cenário *EU Reference*, apresentando valores significativamente maiores em comparação ao cenário *Life*. Esta diferença acentuada evidencia o esforço necessário para implementar estratégias eficazes de redução de emissões. Para alcançar o cenário *Life*, será essencial adotar políticas robustas, inovar em tecnologias de baixa emissão e promover práticas sustentáveis em todos os setores, especialmente na eletricidade, transporte e uso da terra.

O bloco está contando fortemente com a contribuição das emissões negativas do uso da terra para alcançar a neutralidade de carbono. No cenário *Life*, o uso da terra

⁷ O Reino Unido também está incluído no EUCalc, apesar de ter saído da União Europeia no meio do desenvolvimento do modelo.

mostra uma captura significativa de CO₂, enquanto no cenário *EU Reference*, essa captura é menos pronunciada. Este enfoque no uso da terra como um sumidouro de carbono demonstra a importância de práticas de manejo sustentável, reflorestamento e conservação florestal. A adoção dessas práticas é essencial para compensar as emissões remanescentes de outros setores e para atingir as ambiciosas metas de neutralidade climática.

Figura 39 - Comparação de emissões totais em 2050 dos cenários *Life* e *EU Reference*.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da EUCalc (2024).

Entretanto, apesar do cenário *Life* mostrar um grande potencial de redução de emissões, o único cenário capaz de alcançar as metas estabelecidas na NDC, de acordo com a EuroCalc, é o cenário ambicioso. Este cenário caracteriza-se por mudanças históricas tanto no comportamento social quanto na adoção de tecnologias transformacionais. A demanda individual por viagens é contida e ligeiramente reduzida, aproveitando o teletrabalho e o acesso remoto a serviços. As dietas europeias convergem para um padrão flexitariano, com baixa ingestão de calorias de origem animal, e o desperdício de alimentos é reduzido em 50%. Além disso, há uma preferência por espaços de vida menores e atitudes ambientalmente conscientes nas decisões de compra de eletrodomésticos e embalagens.

No âmbito das tecnologias e combustíveis, o cenário ambicioso prevê um progresso irrestrito na eletrificação do transporte rodoviário e uma transição significativa para biocombustíveis na aviação. A renovação dos edifícios para padrões energéticos elevados resulta em uma economia de energia de 66% até 2050. A eficiência dos

processos industriais é maximizada, utilizando todo o potencial técnico disponível e introduzindo novos materiais. A forte implantação de fontes renováveis e a eliminação gradual do carvão são essenciais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade a longo prazo. No setor agrícola, a intensificação da produção de cultivos e pecuária é limitada, mas a capacidade de bioenergia é plenamente explorada, e o potencial de fontes alternativas de proteína, incluindo a base de insetos, é totalmente desenvolvido.

Conforme descrito, o cenário ambicioso é o único que pode atingir as metas climáticas estabelecidas na NDC europeia, pois combina mudanças comportamentais profundas com avanços tecnológicos significativos. Essas transformações abrangem diversos setores, incluindo transporte, indústria, construção e agricultura, exigindo um compromisso substancial tanto de políticas públicas quanto de investimentos privados. Para que esse cenário se concretize, é crucial o engajamento contínuo de todos os setores da sociedade e a implementação rigorosa de políticas de suporte, promovendo uma mudança cultural significativa em direção a práticas mais sustentáveis e conscientes.

4.4.2 Avaliações e recomendações

A análise dos especialistas do CAT traz um contraponto importante em relação à NDC da União Europeia. Embora os cenários projetem trajetórias de certa forma favoráveis para a redução de emissões e o aumento do uso de energias renováveis, a avaliação da NDC revela lacunas significativas em relação às metas climáticas estabelecidas (CAT, 2024c). A nova meta proposta para 2040 pela Comissão Europeia, de uma redução líquida de 90% nas emissões em relação a 1990, levanta preocupações sobre sua ambição e eficácia.

A dependência contínua do uso de captura e armazenamento de carbono (CAC), especialmente no setor de energia, é considerada problemática pelo CAT, pois perpetua a dependência dos combustíveis fósseis (CAT, 2024c). Além disso, a meta NDC da UE prevê a redução das emissões em “pelo menos” 55% abaixo dos níveis de 1990, ou aproximadamente 2.246 MtCO_{2e} (excluindo LULUCF). No entanto, para manter-se abaixo do limite de temperatura de 1,5°C, a análise do 1,5°C Pathways Explorer mostra que as emissões da UE precisariam ser de cerca de 1.548 MtCO_{2e} até 2030, deixando uma lacuna de ambição de cerca de 698 MtCO_{2e} (Climate Transparency, 2024).

A UE tem enfrentado desafios em relação à descarbonização de seu setor energético. Apesar dos avanços em políticas como o pacote "Fit for 55" e o plano RePowerEU, a análise do CAT indica que os planos nacionais dos Estados membros muitas vezes carecem de ambição e não estão alinhados com as metas. Isso levanta preocupações sobre a eficácia das medidas em nível nacional para acelerar a transição para fontes de energia limpas e renováveis (CAT, 2024c).

A análise ressalta ainda a importância de políticas energéticas ambiciosas e abrangentes para alcançar as metas. Isso inclui o investimento em energias renováveis, a redução da dependência de combustíveis fósseis e a implementação de medidas para aumentar a eficiência energética em todos os setores. O CAT enfatizou a falha do bloco em contribuir de forma justa para a ação climática global. Para melhorar sua contribuição, o CAT sugere que a UE adote uma meta mais ambiciosa de redução de pelo menos 95% até 2040 no setor energético e aumente significativamente seu apoio financeiro para países do Sul global (CAT, 2024c).

A classificação do gás fóssil e da energia nuclear como "verdes" sob a taxonomia da UE é outro ponto de crítica. Essa classificação compromete não apenas a credibilidade da taxonomia como um framework que orienta investimentos sustentáveis, mas também do próprio *European Green Deal* e do pacote "Fit for 55" (*Climate Transparency*, 2024). Além disso, a UE e alguns Estados membros planejam investir em novas infraestruturas de combustíveis fósseis. O plano REPowerEU, por exemplo, alocou 10 bilhões de euros para novas infraestruturas de GNL e gasodutos de gás fóssil para reduzir a dependência da UE do gás russo (*Climate Transparency*, 2024). Para melhorar sua classificação, o CAT traz sugestões para que a UE fortaleça sua meta de redução de emissões para pelo menos 62% (excluindo LULUCF) abaixo dos níveis de 1990. Isso implica adotar políticas necessárias para alcançar esse objetivo e aumentar significativamente seu apoio à ação climática em países em desenvolvimento (CAT, 2024c).

Com relação a EUCalc, as incertezas metodológicas relacionadas aos dados de energia da calculadora podem surgir de várias fontes e afetar a confiabilidade das projeções e análises realizadas. Uma fonte de incerteza está nas previsões sobre a demanda futura de energia, que dependem de fatores como o crescimento econômico, mudanças demográficas e avanços tecnológicos. Estimar com precisão esses elementos podem ser desafiadores devido à variabilidade de dados e à imprevisibilidade de eventos futuros.

Além disso, as projeções de oferta de energia, especialmente no que diz respeito às energias renováveis, estão sujeitas a incertezas relacionadas à disponibilidade de recursos naturais, custos de tecnologias e políticas governamentais. As mudanças nas políticas energéticas, tanto a nível nacional quanto internacional, também podem introduzir incertezas significativas nos dados de energia. A variabilidade climática e eventos extremos podem impactar a produção e distribuição de energia, acrescentando outra camada de incerteza aos modelos de previsão. Essas incertezas metodológicas nos dados de energia da EUCalc ressaltam a importância de considerar uma ampla gama de cenários e abordagens ao interpretar e usar os resultados para informar políticas e estratégias relacionadas à energia e mudanças climáticas. Outro aspecto de incerteza são as dinâmicas de importação e exportação, envolvidas nas dinâmicas de uso do solo e de emissões europeias.

Além das questões metodológicas, a calculadora EUCalc também apresenta algumas necessidades de ajustes de interface e nomenclatura para melhorar a usabilidade e a precisão das informações fornecidas. Ajustes na interface podem facilitar a interpretação dos dados pelos usuários, enquanto revisões na nomenclatura podem garantir que os termos utilizados sejam claros e consistentes, minimizando possíveis mal-entendidos

4.5 Análise Internacional Comparada

Nesta seção, será realizada uma análise comparativa das metas de emissões para os anos de 2030 e 2050 das quatro importantes economias globais abordadas nesse estudo: Brasil, Índia, Estados Unidos e União Europeia. Esta análise será embasada em dados das NDCs e das análises dos especialistas do Climate Transparency. A Tabela 2 a seguir apresenta dados comparativos das emissões absolutas, planejadas para 2030, destacando os compromissos assumidos por cada economia para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa até essa data-chave.

Tabela 2 - Comparação das Emissões absolutas para 2030.

País	Meta NDC para 2030	Emissões necessárias para 1,5°C	Lacuna de ambição (MtCO _{2e})	Net Zero (ano)	Comentários
Brasil	Meta absoluta de 1.20 GtCO _{2e} , equivalente a uma redução de 53.1% abaixo dos níveis de 2005	Aprox. 668 MtCO _{2e}	532	2050	Análise do <i>Pathways Explorer</i> de 1,5°C destaca a necessidade de redução adicional para alinhar-se com a meta de temperatura de 1,5°C.
Índia	Intensidade de emissões relativas resultando em aproximadamente 4,443 MtCO _{2e} (excluindo LULUCF), ou 284% acima dos níveis de 1990	Aprox. 1,650 MtCO _{2e}	2,793	2070	Fechar a lacuna entre a “parcela” justa e o caminho compatível com 1.5°C exigirá suporte financeiro.
Estados Unidos	Redução de 50-52% abaixo dos níveis de 2005 (incluindo uso da terra), equivalente a 43-50% (aprox. 3,675-4,178 MtCO _{2e} , excluindo uso da terra)	Aprox. 2,947 MtCO _{2e}	728	2050	A meta para 1.5°C exigiria uma redução de 60% abaixo dos níveis de 2005.
União Europeia	Redução de “pelo menos” 55% abaixo dos níveis de 1990 (aproximadamente 2,246 MtCO _{2e} , excluindo LULUCF)	Aprox. 1,548 MtCO _{2e}	698	2050	A contribuição “” justa” de 1,5°C exige o fortalecimento da meta doméstica e apoio substancial para reduções de emissões nos países em desenvolvimento.

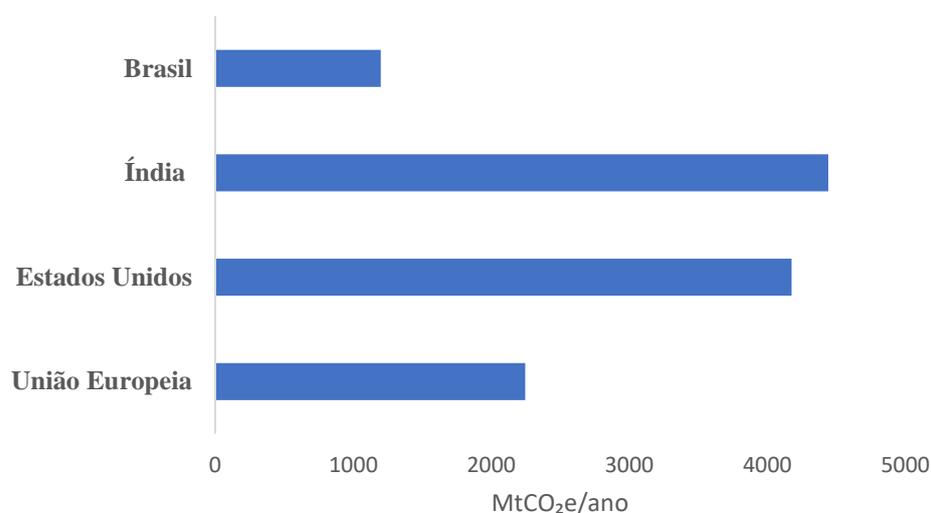
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do *Climate Transparency* (2022) e NDCs (Brasil, 2023; Índia, 2022; EU, 2023; USA, 2021).

Cada país enfrenta desafios únicos na busca por suas metas climáticas até 2030, conforme refletido na análise comparativa das metas de emissões absolutas apresentadas na tabela. A União Europeia, por exemplo, se comprometeu a reduzir suas emissões para aproximadamente 2.246 MtCO_{2e} até 2030, enquanto os Estados Unidos têm uma meta de entre 3.675 e 4.178 MtCO_{2e} nesse mesmo período. A Índia adotou uma abordagem baseada na intensidade de emissões, refletindo um aumento substancial em relação aos níveis de 1990, enquanto o Brasil estabeleceu uma meta absoluta de 1.200 MtCO_{2e} para 2030, equivalente a uma redução significativa em comparação aos níveis de 2005.

Esses desafios são moldados por uma variedade de fatores nacionais, como estrutura econômica, disponibilidade de recursos naturais, população e demografia, políticas governamentais e contexto geográfico e climático. Por exemplo, países com economias diversificadas e abundância de recursos naturais podem ter vantagens na transição para uma economia de baixo carbono, enquanto aqueles com dependência de setores intensivos em carbono enfrentam desafios adicionais na mitigação das emissões. A capacidade de implementar políticas climáticas eficazes também varia significativamente, influenciada pela estabilidade política, instituições governamentais robustas e cooperação internacional. Adaptar estratégias climáticas para essas circunstâncias individuais é crucial para alcançar as metas estabelecidas e mitigar os impactos das mudanças climáticas globais.

A Figura 40 apresenta um gráfico de barras que compara as metas de emissões absolutas de gases de efeito estufa para o ano de 2030; essa informação também está contida na Tabela 2, entretanto, é aqui apresentada de forma resumida e gráfica, para melhor visualização. Cada país enfrenta desafios estruturais e econômicos únicos que moldam suas metas climáticas. A União Europeia, com uma economia diversificada e avanços tecnológicos, facilita a transição para fontes de energia renováveis e políticas de eficiência energética. Os Estados Unidos precisam modernizar a infraestrutura energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, enfrentando desafios políticos internos. O Brasil lida com a proteção e conservação da floresta amazônica e a expansão da infraestrutura de energias renováveis, enquanto a Índia deve equilibrar o crescimento industrial e urbano com a redução das emissões, dada a alta demanda energética e a dependência de carvão.

Figura 40 - Metas de Emissões absolutas para 2030 conforme NDCs.

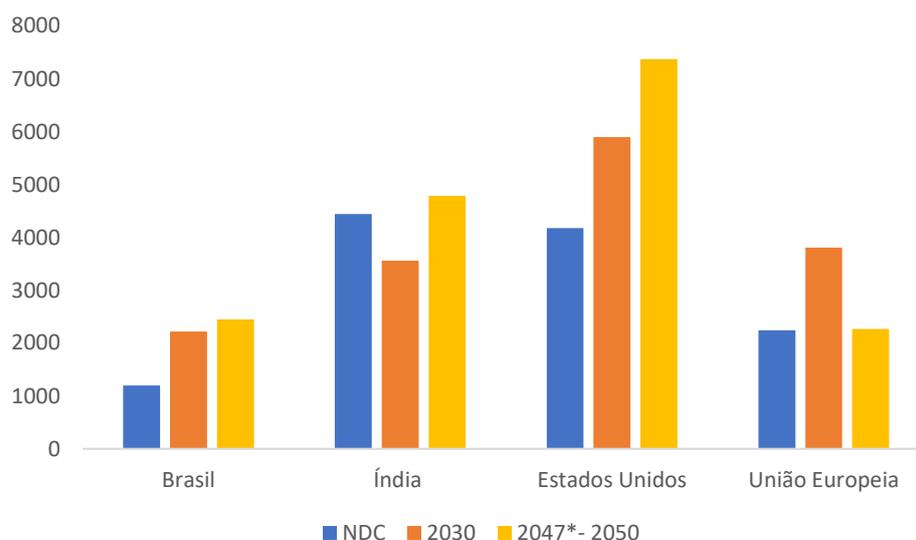


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do *Climate Transparency* (2022) e NDCs (Brasil, 2023; Índia, 2022; EU, 2023; USA, 2021).

As políticas e a governança também desempenham um papel crucial na realização dessas metas. A União Europeia possui uma estrutura de governança forte e colaborativa, permitindo a implementação de políticas climáticas abrangentes. Nos Estados Unidos, a política climática é influenciada por mudanças administrativas e interesses estaduais, criando incertezas na continuidade das políticas de longo prazo. No Brasil, a governança climática pode ser afetada por questões políticas internas e a necessidade de harmonizar desenvolvimento econômico com proteção ambiental. Na Índia, é necessário um grande investimento em infraestrutura sustentável e tecnologias limpas, considerando as diversas realidades regionais. A cooperação internacional e o financiamento para ações climáticas em países em desenvolvimento são essenciais para fechar as lacunas de ambição e alcançar as metas globais de mitigação das mudanças climáticas.

A Figura 41 apresenta uma comparação das emissões totais projetadas nos cenários de *Business As Usual* (BAU) apresentados nas análises anteriores. Este cenário assume que não haverá mudanças significativas nas políticas atuais até 2050. Cada barra representa as emissões de GEE para os anos de NDC 2030 e 2050 no caso do Brasil, Estados Unidos e União Europeia e 2030 e 2047 no caso Índia que possui esse marco devido a comemoração de 100 anos de independência do domínio inglês.

Figura 41 - Comparações de emissões absolutas entre países cenários BAU⁸.



Nota: * O ano de 2047 refere-se somente à Índia e 2050 aos demais.

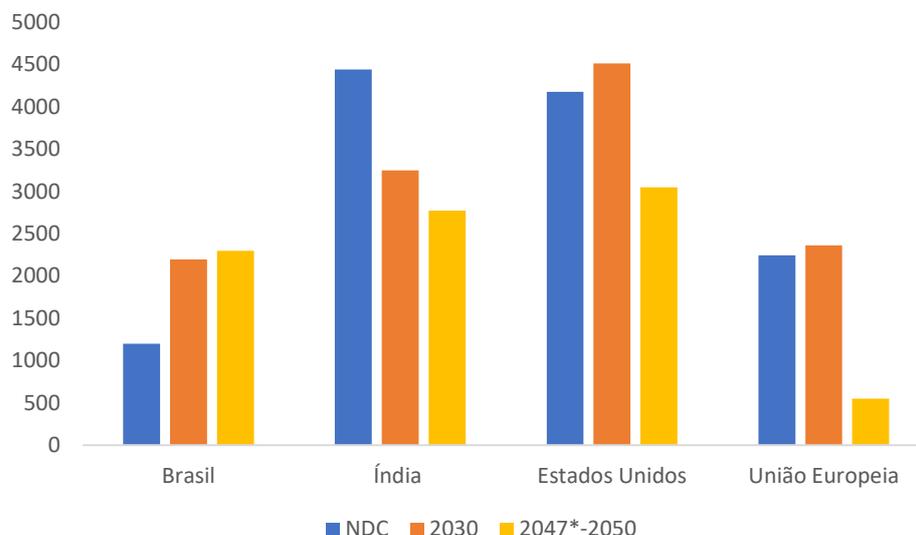
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados calculadoras climáticas (2024).

É possível verificar que, indo nessa direção, apenas a Índia alcançará suas metas; entretanto, isso se deve ao caráter altamente insuficiente das metas indianas. Outro dado interessante a observar é que a União Europeia, no cenário BAU, é a única a apresentar reduções de emissões quando comparamos os anos de 2030 e 2050. Entretanto, mesmo assim, com base nas simulações realizadas, não é possível alcançar as metas de 2030 e a neutralidade de carbono em 2050.

Os dados apresentados na Figura 42 comparam as emissões totais apresentadas nos cenários mais otimistas durante as análises nacionais. Estes cenários consideram a implementação de políticas mais rigorosas e tecnológicas avançadas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa. A comparação evidencia as diferentes trajetórias e esforços de cada país em relação às suas metas climáticas de longo prazo. Enquanto a União Europeia mostra uma tendência clara de redução nas emissões, os Estados Unidos e o Brasil precisam de intervenções mais substanciais para alcançar suas metas. A Índia, embora apresente reduções, ainda se encontra com emissões elevadas.

⁸ *A Calculadora indiana fornece informações até o ano de 2047, a legenda da imagem foi ajustada para apresentar os dados da prospecção temporal mais de distante que cada Calculadora.

Figura 42 - Comparações de emissões absolutas entre países em cenários mais otimistas.



Nota: * O ano de 2047 refere-se somente à Índia e 2050 aos demais.

Fonte: Elaboração da autora, com base em dados calculadoras climáticas (2024).

Os dados indicam que embora a Índia esteja caminhando para suas metas de emissões devido à relativa baixa ambição em sua NDC, a União Europeia está liderando em termos de redução de emissões em um cenário mais otimista. No entanto, nenhum dos países ou regiões, incluindo a UE, está no caminho de alcançar completamente as metas de 2030 e a neutralidade de carbono até 2050 sem políticas climáticas mais ambiciosas. Lembrando que as análises de especialistas do CAT também destacam que as quatro NDCs abordadas não são suficientemente ambiciosas para atingir a meta crucial de limitar o aquecimento global a 1,5°C.

Entretanto, é importante destacar as implicações da justiça climática ao discutir as metas de emissões para 2030 e 2050 das economias dos países aqui analisados, assim como da análise global. A comparação revela que países como os Estados Unidos e o bloco União Europeia, que possuem mais recursos financeiros e tecnológicos, ainda enfrentam desafios significativos para alcançar suas metas climáticas. Isso inclui a necessidade de modernizar infraestruturas energéticas, fortalecer políticas de eficiência energética e enfrentar pressões políticas internas.

Por outro lado, países ditos “em desenvolvimento”, como Brasil e Índia, enfrentam desafios ainda maiores devido às suas realidades socioeconômicas complexas, incluindo desafios de combate à pobreza e de acesso a serviços básicos de educação,

transporte e saúde. O Brasil, por exemplo, precisa lidar com a conservação da floresta amazônica, essencial para a mitigação global, enquanto expande sua infraestrutura de energias renováveis. A Índia, com uma alta dependência de carvão e uma população crescente, precisa equilibrar o crescimento econômico com a redução de emissões, uma tarefa árdua, considerando os desafios de desenvolvimento que o país enfrenta.

Essa disparidade nas capacidades de implementação das metas climáticas levanta questões cruciais de justiça climática. Países em desenvolvimento, apesar de contribuírem menos historicamente para as emissões globais, são frequentemente os mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas e possuem menos recursos para mitigação e adaptação. Portanto, alcançar a justiça climática implica não apenas em esforços internos desses países, mas também na necessidade de apoio substancial e cooperação internacional, especialmente por parte das nações mais ricas, para que as metas globais possam ser alcançadas de maneira equitativa e justa.

A comparação dos cenários BAU e otimistas evidencia que, sem um aumento substancial na ambição e na implementação de políticas climáticas rigorosas, será difícil para qualquer um dos países ou regiões alcançar as metas estabelecidas, destacando a urgência de um esforço coletivo global, que leve em conta as desigualdades históricas e atuais.

5 Análise Global

Neste capítulo, são analisados e discutidos criticamente três cenários do IPCC já simulados e disponíveis na Calculadora Global: RCP2.6, RCP6.0 e RCP8.5. Essas análises focam nas emissões e nos impactos energéticos de cada um desses cenários. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade utilizando diferentes tecnologias de energias renováveis da calculadora. Esta análise permite entender os impactos que cada fonte energética possui globalmente. Adicionalmente, uma simulação de cenários foi desenvolvida para fornecer dados e informações sobre diferentes trajetórias de emissões de GEE ao longo do tempo. A análise também considera como a governança climática e a cooperação internacional podem contribuir para o cumprimento das metas de transição energética global da NDCs. A colaboração entre países é essencial para compartilhar tecnologias, recursos e conhecimento, visando alcançar uma descarbonização eficiente e sustentável do sistema energético global.

5.1 Representative Concentration Pathway (RCP)

Os RCPs são trajetórias de concentração de GEE, aerossóis e uso do solo, que o IPCC usa para projetar diferentes futuros climáticos possíveis. Eles fornecem uma base para os modelos climáticos que simulam os impactos dessas concentrações variáveis no sistema climático da Terra. Os RCPs são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em W/m^2 , a ser atingida durante ou próximo ao final do século XXI. Cada RCP provê conjuntos de dados, especialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100. Assim, grupos de estudo interdisciplinares elaboraram os cenários RCPs que usam um sistema mais completo, levando em conta os impactos das emissões, ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre (IPCC, 2014).

Os principais cenários RCPs são:

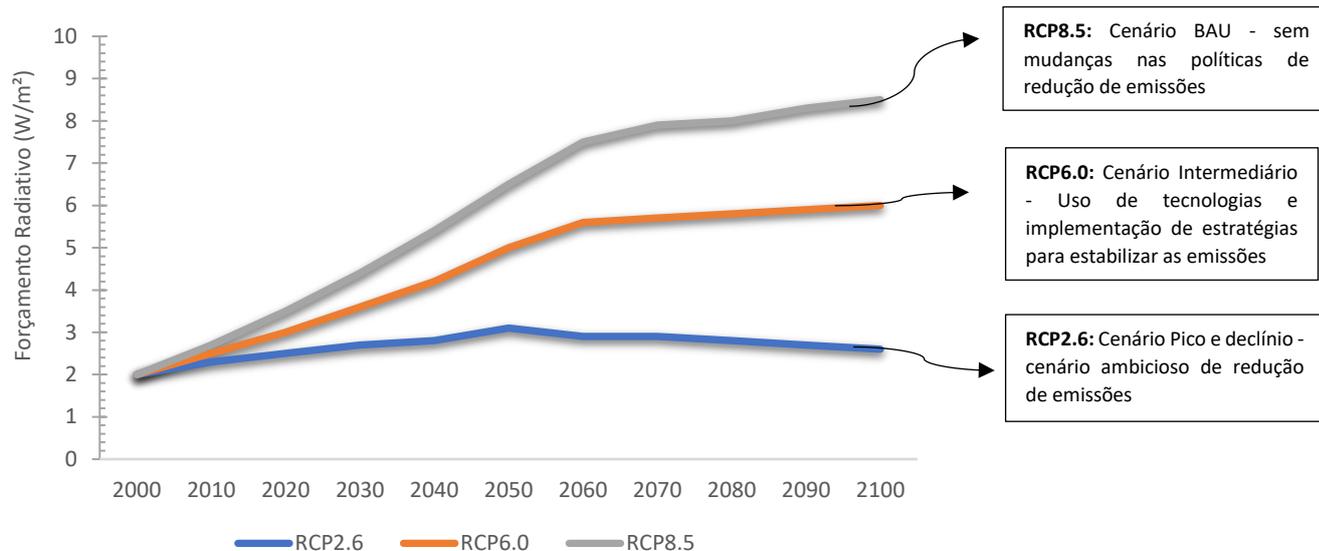
RCP2.6: Baixas emissões

RCP4.5 e RCP6.0: Estabilização de médias emissões de GEE

RCP8.5: Altas emissões

Para o caso deste trabalho, Figura 43, serão utilizados os dados disponíveis na GC para os cenários RCP2.6, RCP6.0 e RCP8.5.

Figura 43 - Forçamento radiativo dos RCPs 2.6, 6.0 e 8.5.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados do IPCC (2024).

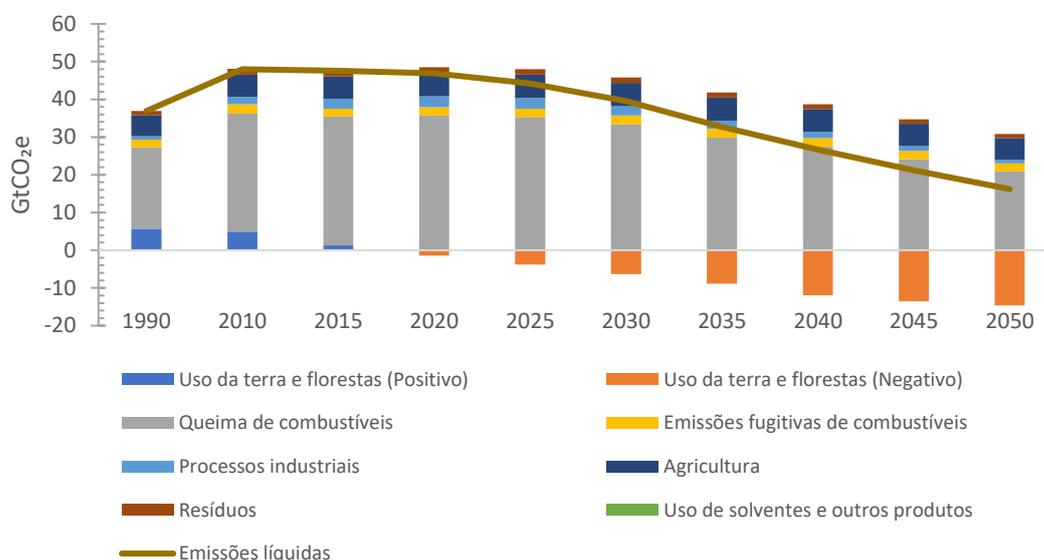
5.1.1 RCP 2.6

É um cenário desenvolvido pela equipe de modelagem IMAGE da PBL (Netherlands Environmental Assessment Agency). Este caminho de emissão representa cenários da literatura que levam a níveis de concentração de GEE muito baixos. É considerado um cenário mais otimista de “pico-declínio”. O nível de forçamento radiativo do RCP2.6 atinge um pico de cerca de 3,1 W/m² até meados do século e retorna para 2,6 W/m² até 2100. Para alcançar esses níveis de forçamento radiativo, as emissões de GEE e, indiretamente, as emissões de poluentes atmosféricos são substancialmente reduzidas ao longo do tempo (Van Vuuren *et al.*, 2011; IPCC, 2014).

Este cenário é alinhado com o objetivo de manter o aumento da temperatura global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, conforme estipulado pelo Acordo de Paris. Para isso, são necessárias: implementação de tecnologias de baixa emissão de carbono; mudanças significativas nas políticas energéticas; e aumento na eficiência energética. Inclui, também, o aumento do uso de fontes de energia renovável e a implementação de técnicas de captura e armazenamento de carbono. Os impactos e benefícios do RCP2.6 incluem uma redução significativa do risco de eventos climáticos extremos e dos impactos adversos nas ecologias e economias globais. No âmbito social e econômico, o RCP2.6 tem o potencial de criar empregos verdes, melhorar a saúde pública e reduzir os custos associados a desastres climáticos (Van Vuuren *et al.*, 2011; IPCC, 2014).

A Figura 44 apresenta emissões anuais globais por fonte. Nesse cenário as emissões de CO₂ provenientes da queima de carvão, petróleo e gás natural são drasticamente reduzidas. Isso é alcançado através do aumento da eficiência energética, da transição para fontes de energia renovável como solar, eólica e hidrelétrica, e da implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS). No caso da queima de combustíveis, que é a parcela mais representativa das emissões, os registros em 1990 foram de 21,6 GtCO_{2e}, sendo que, nesse cenário, a prospecção para 2030 é de 33,4 GtCO_{2e}, reduzindo em 2050 para impressionantes 20,9 GtCO_{2e}, que são emissões menores dos que as registradas em 1990.

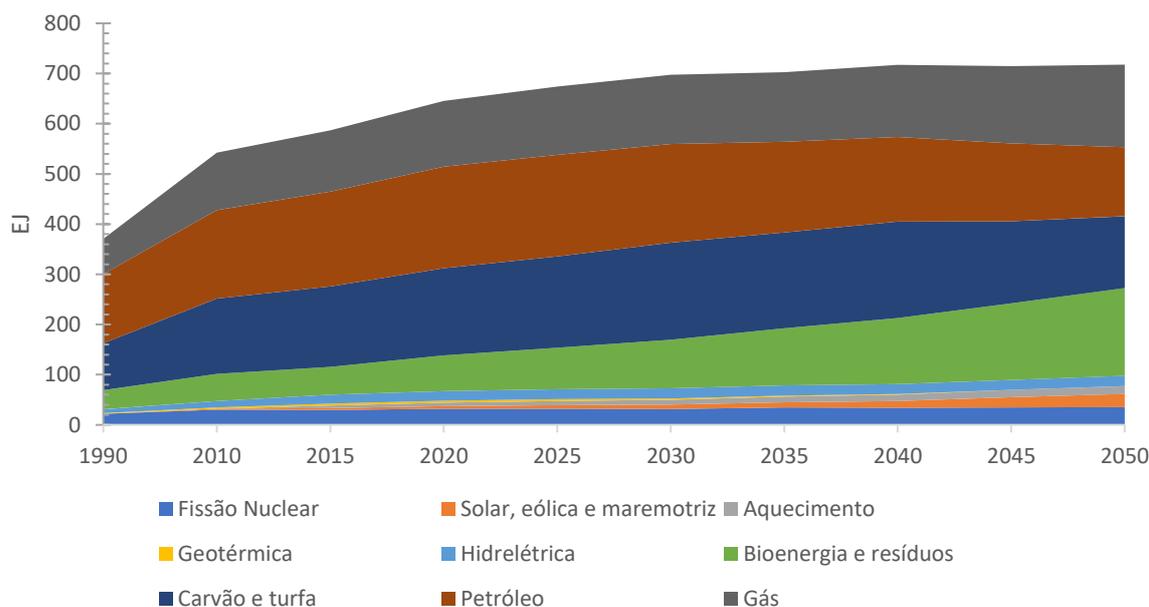
Figura 44 - Emissões anuais globais por fonte RCP2.6.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

A Figura 45 apresenta a geração de energia em RCP2.6, que passa por uma transformação significativa, com uma ênfase acentuada na descarbonização e no aumento da eficiência energética. A transição para fontes de energia renovável é um dos pilares desse cenário. A bioenergia, por exemplo, apresenta uma forte expansão, sendo a que mais cresceu nessa simulação. A energia solar, tanto fotovoltaica quanto térmica, e a energia eólica, seja *onshore* ou *offshore*, seguem importantes à descarbonização da matriz energética global. O custo decrescente dessas tecnologias e sua crescente disponibilidade fazem delas escolhas viáveis e essenciais. Além disso, a energia hidrelétrica continua a ser uma fonte importante, especialmente em regiões com recursos hídricos adequados, complementada por pequenas centrais hidrelétricas distribuídas.

Figura 45 - Geração de energia RCP2.6.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

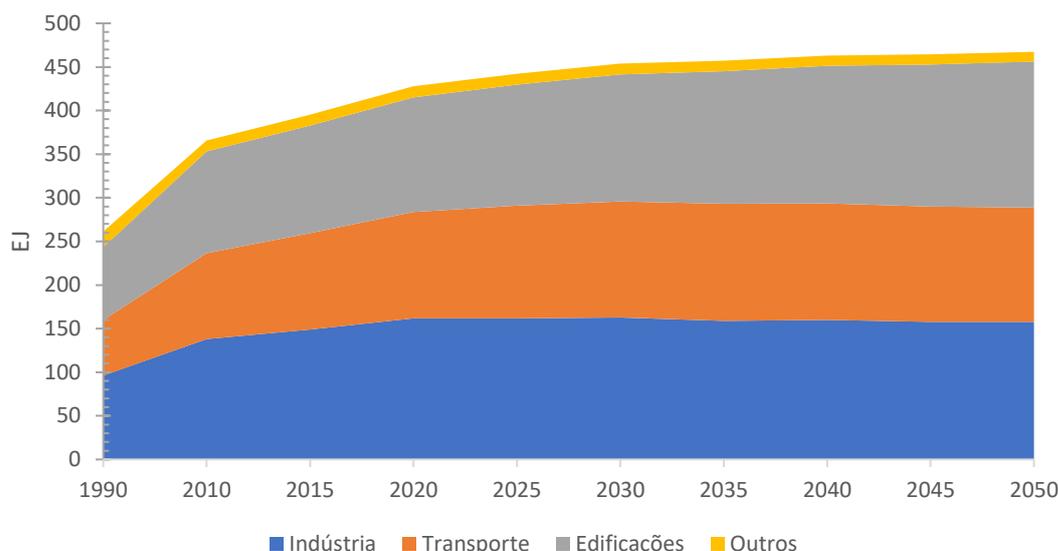
O comportamento de aumento seguido por uma queda na geração total de energia pode ser explicado pela dinâmica da transição energética. No início, a demanda energética aumenta devido ao desenvolvimento econômico e à eletrificação de setores intensivos em energia. No entanto, com a implementação de políticas de eficiência energética e o crescente uso de fontes renováveis, como solar, eólica e bioenergia, a dependência de combustíveis fósseis começa a diminuir. A estabilização e eventual queda na demanda energética refletem o desacoplamento entre o crescimento econômico e o consumo de energia de fontes fósseis, combinado com a melhoria na eficiência energética.

As tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) são fundamentais no cenário RCP2.6. Essas tecnologias são aplicadas a usinas de energia que ainda utilizam combustíveis fósseis, capturando emissões de CO₂, antes que fossem liberadas à atmosfera. Além disso, o CCS é implementado em indústrias pesadas, como a produção de cimento e aço, onde a redução das emissões é particularmente desafiadora. Dessa forma, as tecnologias CCS ajudam a mitigar as emissões remanescentes de setores difíceis de descarbonizar. Entretanto, fontes tradicionais de energia como carvão e turfa, petróleo e gás continuam a se destacar até 2035. A partir desse ponto, essas fontes começam a apresentar uma queda nas suas participações, que continua de forma tímida até 2050. Mesmo com a transição para energias mais limpas, a redução do uso de combustíveis fósseis é gradual, refletindo desafios na substituição completa dessas fontes de energia

O desenvolvimento de infraestrutura é essencial para suportar essa transição. A implementação de redes elétricas inteligentes (*smart grids*) permite gerenciar de forma eficiente a distribuição e o consumo de energia, integrando melhor as fontes renováveis intermitentes. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia, como baterias e armazenamento por bombeamento hidrelétrico, é fundamental para equilibrar a oferta e a demanda de energia, garantindo um fornecimento contínuo mesmo quando a produção de energia renovável é variável. A diversificação do mix energético também é uma característica chave do RCP2.6. A energia nuclear continua a desempenhar um papel significativo no fornecimento de energia livre de carbono, especialmente em países com infraestrutura nuclear existente. O uso de biomassa sustentável e biocombustíveis é ampliado, particularmente em setores difíceis de eletrificar, como a aviação e o transporte marítimo. Essa diversificação ajuda a garantir um fornecimento de energia resiliente e sustentável.

De acordo com os dados da GC, Figura 46, a demanda de energia no cenário RCP2.6 é caracterizada por um aumento inicial seguido de uma estabilização nos setores de indústria, edificação e transporte. Essa tendência reflete a transição para tecnologias mais eficientes e a eletrificação de vários setores. Na fabricação, a adoção de processos mais eficientes e a reciclagem contribuem para uma estabilização da demanda energética. Nas edificações, a implementação de padrões de construção de alta eficiência e a modernização de edifícios existentes resultam em uma menor necessidade de energia para aquecimento, resfriamento e iluminação. No transporte, a eletrificação dos veículos e o aumento do uso de transportes públicos e não motorizados levam a uma redução na demanda por combustíveis fósseis, apesar do aumento na demanda por eletricidade.

Figura 46 - Demanda de energia RCP2.6.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

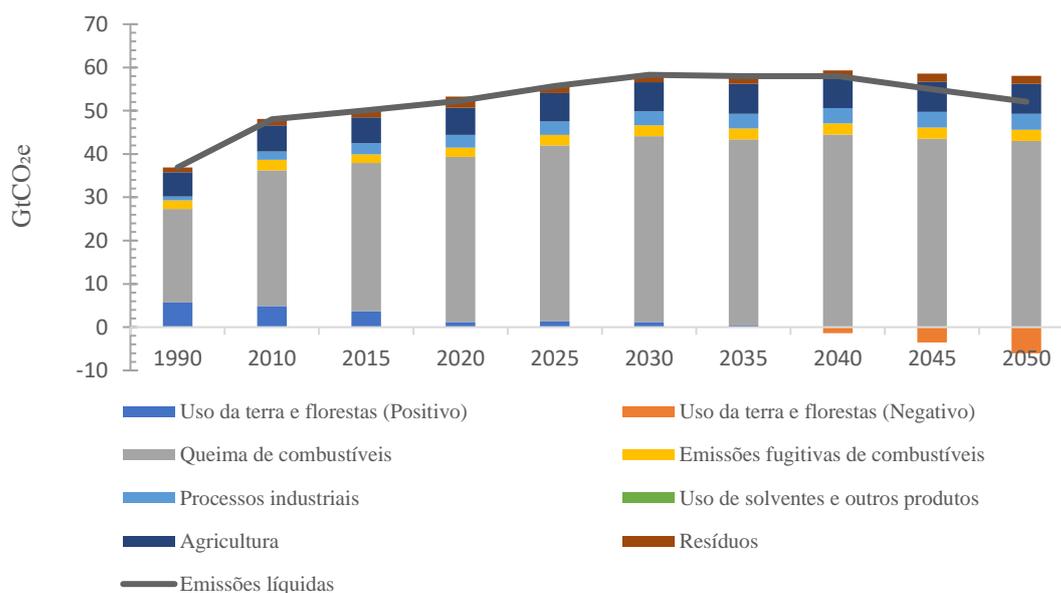
Esta estabilização é muito importante para alcançar as metas de redução de emissões do cenário RCP2.6. As tecnologias de eficiência energética e a eletrificação ajudam a limitar o crescimento da demanda de energia, enquanto a integração de fontes renováveis e a implementação de redes inteligentes garantem um fornecimento estável e sustentável. Assim, a demanda de energia se ajusta aos novos padrões de consumo, alinhando-se com os objetivos de descarbonização e mitigação das mudanças climáticas.

5.1.2 RCP 6.0

O RCP6.0 projeta um forçamento radiativo de 6,0 W/m² até 2100. Este valor indica a quantidade de energia adicional retida na Terra devido à concentração de GEE. O cenário é classificado como um cenário de estabilização, onde a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100. Este cenário foi criado pelo time de modelagem AIM (*Asia-Pacific Integrated Model*) do NIES (*National Institute for Environmental Studies*) do Japão. As emissões no RCP6.0 continuam a aumentar até meados do século XXI, mas a uma taxa mais lenta do que em cenários de altas emissões, como o RCP8.5. As emissões atingem um pico por volta de 2060 e começam a declinar gradualmente após esse ponto. Espera-se que as emissões anuais globais alcancem aproximadamente 75 gigatoneladas de CO₂ equivalente (GtCO_{2e}) até 2100. A concentração de CO₂ na atmosfera continua a aumentar ao longo do século, alcançando cerca de 670 ppm (partes por milhão) até 2100 (Fujino *et al.*, 2006; IPCC, 2014).

Sob o RCP6.0, o aumento médio da temperatura global é projetado para estar entre 2,0°C e 3,7°C acima dos níveis pré-industriais até o final do século XXI. Esse aumento na temperatura pode resultar em mudanças climáticas significativas e impactos diversos em ecossistemas e sociedades humanas. A frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, tempestades severas e precipitações intensas, provavelmente aumentarão. A Figura 47 revela tendências importantes de 1990 a 2050. As emissões do uso da terra e florestas diminuem significativamente de 5,7 GtCO₂e em 1990 para 0 GtCO₂e em 2040, refletindo esforços para controlar o desmatamento e adotar práticas sustentáveis. A partir de 2035, surgem contribuições de emissões negativas, alcançando -6,0 GtCO₂e em 2050, indicando práticas de sequestro de carbono, como reflorestamento. No entanto, as emissões da queima de combustíveis aumentam de 21,6 GtCO₂e em 1990 para um pico de 44,5 GtCO₂e em 2040, com uma leve queda para 43 GtCO₂e em 2050, mostrando a contínua dependência de combustíveis fósseis.

Figura 47 - Emissões anuais globais por fonte RCP6.0.



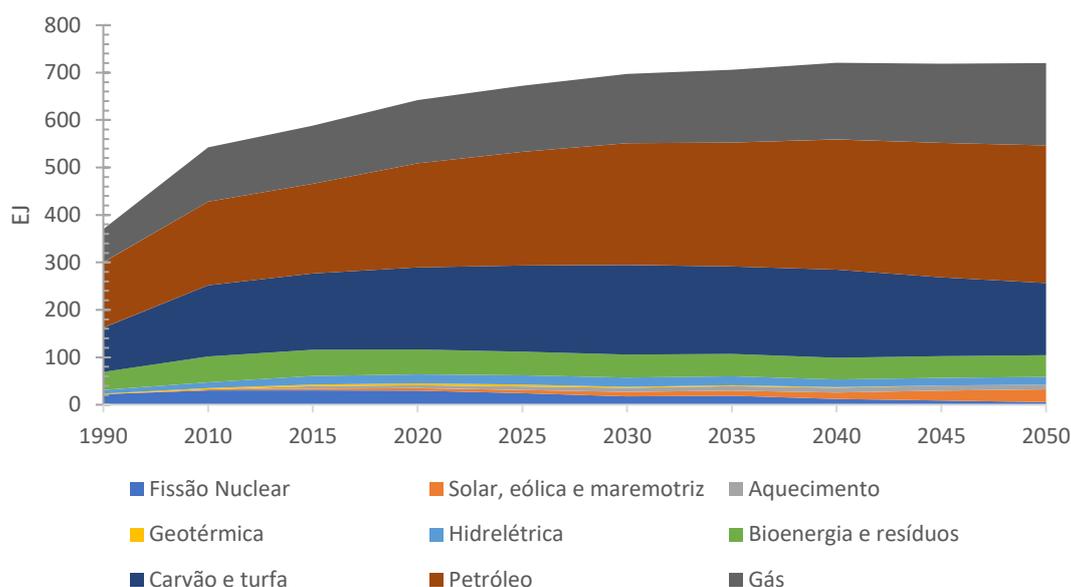
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

As emissões fugitivas de combustíveis aumentam ligeiramente de 2 GtCO₂e em 1990 para 2,6 GtCO₂e em 2050, associadas a perdas durante a produção e transporte de combustíveis fósseis. As emissões de processos industriais crescem de 0,9 GtCO₂e em 1990 para 3,7 GtCO₂e em 2050, devido ao crescimento econômico e industrialização contínua, apesar das melhorias tecnológicas. As emissões da agricultura aumentam gradualmente de 5,6 GtCO₂e em 1990 para 6,9 GtCO₂e em 2050, mantendo-se uma fonte significativa devido ao metano e óxido nítrico. As emissões de resíduos crescem de 1,1

GtCO₂e em 1990 para 1,9 GtCO₂e em 2050, refletindo o aumento populacional e mudanças nos padrões de consumo. As emissões líquidas totais aumentam de 36,9 GtCO₂e em 1990 para um pico de 58,3 GtCO₂e em 2030 e, então, diminuindo para 52,1 GtCO₂e em 2050. A tendência de aumento seguida por uma leve redução sugere que as políticas de mitigação e tecnologias de captura de carbono começam a ter efeito de forma gradual.

A análise da Figura 48 de geração de energia sob o cenário RCP6.0 do IPCC evidencia a marcante dependência de fontes fósseis ao longo das décadas. Fontes como carvão e turfa, petróleo e gás representam uma parcela significativa da matriz energética, com números expressivos em 1990 e um declínio gradual em direção a 2050. Essa dependência histórica desses combustíveis não-renováveis levanta preocupações em relação às emissões de gases de efeito estufa e à sustentabilidade do fornecimento de energia a longo prazo.

Figura 48 - Geração de energia RCP6.0.



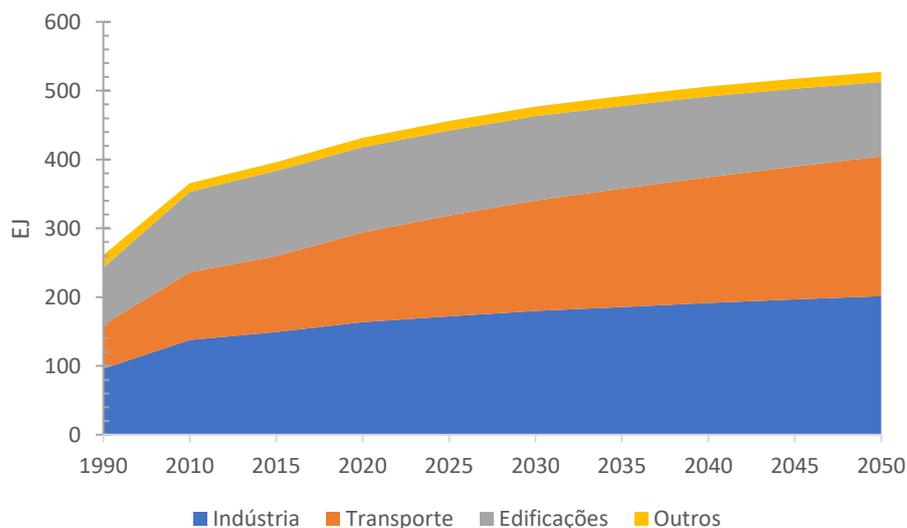
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

Apesar do declínio observado na participação de fontes fósseis, a presença contínua de Carvão e Turfa, Petróleo e Gás na geração de energia ao longo das décadas até 2050 destaca a complexidade e desafios da transição energética. A necessidade de reduzir as emissões de carbono e mitigar os impactos das mudanças climáticas exige a implementação de políticas e estratégias que acelerem a substituição dessas fontes poluentes por alternativas mais limpas e sustentáveis. Diante desse cenário, a dependência

contínua de fontes fósseis na matriz energética reforça a urgência de ações direcionadas para acelerar a transição para um sistema de energia mais verde e resiliente.

Nesse cenário a demanda global de energia, Figura 49, mostra um padrão de crescimento significativo em diversos setores-chave da economia. Na fabricação, por exemplo, observa-se um aumento constante na demanda de energia ao longo do período analisado, refletindo um crescimento contínuo na atividade industrial. Esse crescimento está alinhado com as projeções de desenvolvimento econômico e industrial esperado no contexto do cenário RCP 6.0. Em contraste, a demanda de energia no setor de edificações mostra um padrão diferente. Após atingir um pico por volta de 2020, a demanda começa a diminuir gradualmente. Isso sugere uma possível melhoria na eficiência energética dos edifícios ao longo do tempo, bem como mudanças nos padrões de construção que visam reduzir o consumo de energia. Essa tendência é consistente com os esforços para promover práticas de construção sustentáveis e reduzir as emissões de carbono associadas aos edifícios.

Figura 49 - Demanda de energia RCP6.0.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

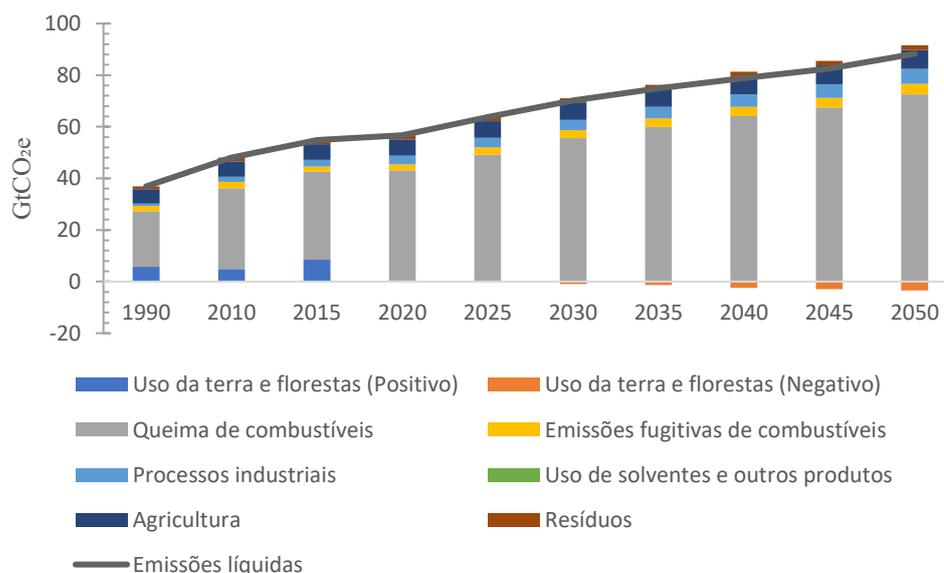
5.1.3 RCP 8.5

O cenário RCP 8.5 é considerado um cenário pessimista no contexto das mudanças climáticas. Ele é caracterizado pelo aumento contínuo e significativo das emissões de GEE ao longo do tempo, resultando em altos níveis de concentração desses gases na atmosfera. Esse cenário é baseado em projeções da literatura científica que indicam um aumento contínuo das emissões, muitas vezes associado a um cenário de

desenvolvimento econômico onde não são implementadas medidas significativas de mitigação das mudanças climáticas. O RCP 8.5 foi desenvolvido utilizando o modelo *MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)* e pelo quadro de avaliação integrada do IIASA (Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados) da Áustria. Essa abordagem permite simular e projetar diferentes trajetórias futuras para as emissões de GEE e seus impactos no clima global, considerando uma variedade de fatores, como o crescimento populacional, o desenvolvimento tecnológico e as políticas energéticas (Riahi *et al.*, 2011; IPCC, 2014).

Esse cenário representa uma das piores perspectivas em termos de mudanças climáticas, pois sugere um futuro onde as emissões continuam a aumentar sem controle significativo, levando a consequências severas para o clima, o meio ambiente e a sociedade. Portanto, é frequentemente usado como um ponto de referência para avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas e destacar a importância da ação climática urgente e eficaz para evitar esses resultados indesejados. A Figura 50 apresenta as emissões anuais globais por fonte sob o cenário RCP 8.5 reflete uma trajetória preocupante de aumento contínuo das emissões de GEE ao longo do tempo. Os dados revelam um cenário onde a queima de combustíveis fósseis é responsável por uma parte significativa das emissões, com um crescimento considerável ao longo das décadas.

Figura 50 - Emissões anuais globais por fonte RCP8.5.

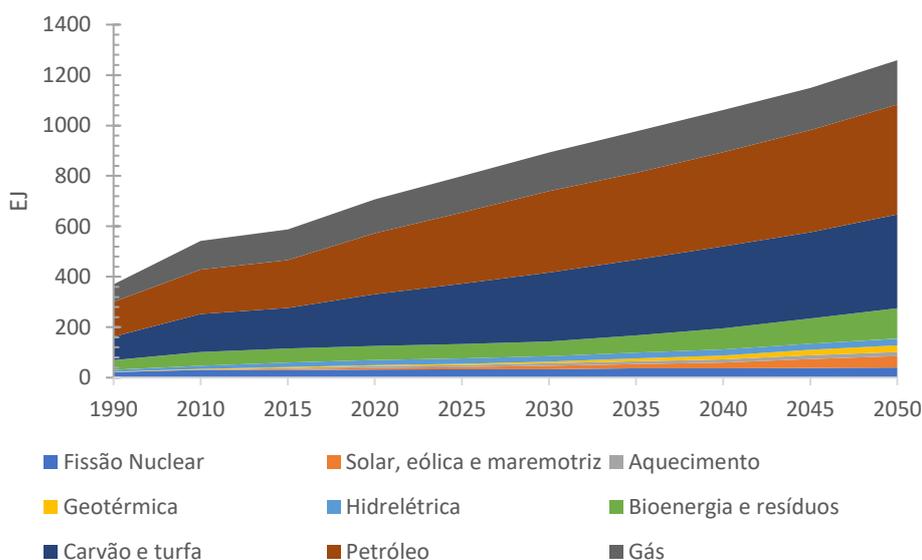


Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

Além disso, a agricultura e o gerenciamento de resíduos também contribuem para o aumento das emissões, destacando a necessidade premente de abordar as práticas agrícolas e de resíduos de maneira mais sustentável. Esses dados sugerem uma tendência alarmante de aumento das emissões líquidas totais ao longo do tempo, o que está em consonância com a natureza pessimista do cenário RCP 8.5. Esse cenário representa um futuro onde as emissões continuam a aumentar sem controle significativo, levando a consequências severas para o clima global e o meio ambiente.

A Figura 51, apresenta dados da GC e indica que apesar do aumento gradual no uso de fontes renováveis de energia, as fontes de energia fóssil mantêm uma presença significativa e até crescente ao longo do tempo sob o cenário RCP 8.5. A geração de energia a partir de combustíveis fósseis, incluindo carvão, petróleo e gás, continua a aumentar ao longo das décadas representadas na tabela, sem mostrar sinais de desaceleração ou diminuição significativa em sua participação no mix energético global. Essa tendência ressalta os desafios significativos associados à redução das emissões de GEE para a transição para uma economia de baixo carbono. Mesmo com o aumento no uso de fontes renováveis, a dependência contínua e crescente dos combustíveis fósseis destaca a necessidade urgente de políticas mais robustas de mitigação das mudanças climáticas. Essa constatação sublinha a importância crítica de ações coordenadas e decisivas em níveis global, nacional e local para promover uma mudança fundamental na forma como a energia é produzida e consumida.

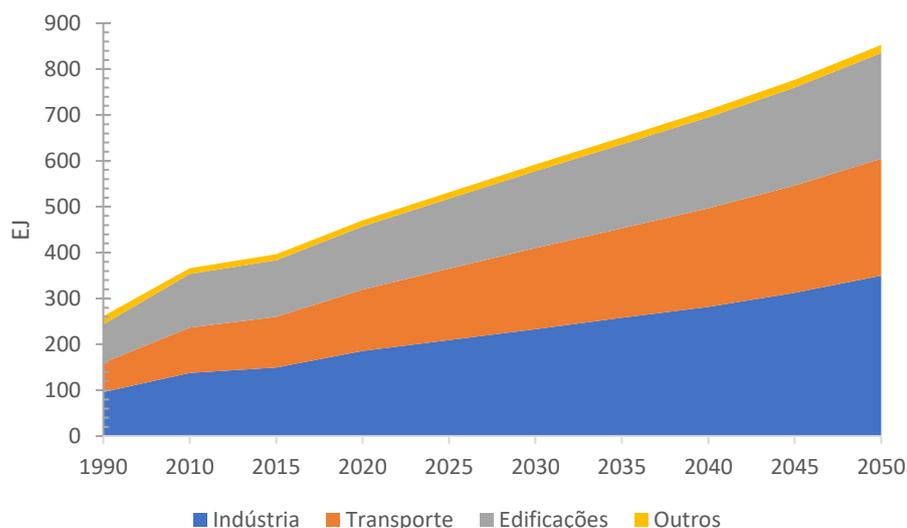
Figura 51 - Geração de energia RCP8.5.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

A Figura 52 descreve a demanda de energia sob o cenário RCP 8.5 revela um aumento contínuo e substancial na demanda global de energia em vários setores-chave da economia ao longo das próximas décadas. Tanto a fabricação quanto o transporte testemunham um crescimento significativo na demanda de energia, refletindo um cenário de expansão industrial e aumento da atividade de transporte. Esse aumento na demanda de energia está intimamente ligado ao crescimento econômico esperado no cenário RCP 8.5 e destaca a necessidade de abordagens eficazes para lidar com o crescimento da demanda e promover a eficiência energética. Além disso, o setor de edificações também apresenta um incremento na demanda de energia, indicando uma crescente necessidade de energia para operação de edifícios. Isso sugere a importância de estratégias que promovam a eficiência energética em edifícios e adotem tecnologias mais limpas para aquecimento, refrigeração e iluminação. Em conjunto, esses dados ressaltam a urgência de medidas políticas e tecnológicas que visem a mitigar o crescimento da demanda de energia e promover um consumo mais sustentável.

Figura 52 - Demanda de energia RCP8.5.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

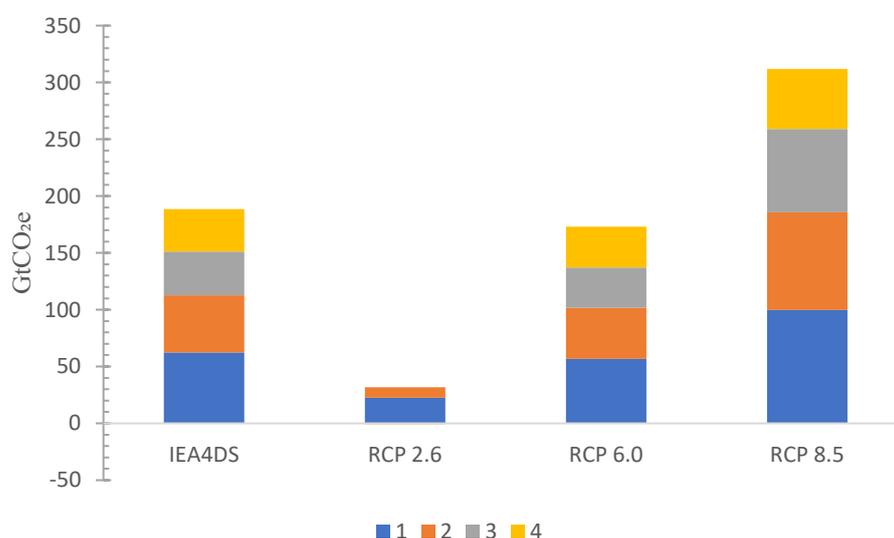
5.2 Análise de sensibilidade da GC para o setor de energia

A análise de sensibilidade é uma metodologia importante para compreender como variações em diferentes parâmetros podem impactar nos resultados projetados. Esse tipo de análise permite identificar quais variáveis têm maior influência nas previsões e ajuda a avaliar a robustez dos modelos diante de incertezas. No contexto da GC, a análise de sensibilidade é utilizada para explorar como diferentes níveis de investimento em

energias renováveis e outras tecnologias energéticas podem afetar as emissões ao longo do tempo. Essa abordagem fornece uma base de dados e simulações que informam as recomendações para políticas públicas e decisões de investimento.

A primeira análise realizada a partir dessa metodologia foi a prospecção de emissões para o ano de 2050, considerando os cenários do IPCC discutidos anteriormente: RCP2.6, RCP6.0 e RCP8.5. Além disso, foi feita uma comparação com o cenário 4DS da IEA, utilizado como linha de base. Neste primeiro caso, foram testadas as emissões das quatro alavancas. E, uma a uma, selecionando todas ao mesmo tempo para cada nível para tecnologias energéticas renováveis, sendo elas acionadas após a seleção de cada uma das rotas descritas. Os dados podem ser visualizados na Figura 53. Cada alavanca testada individualmente, retornou ao padrão da rota selecionada após as alterações terem sido feitas nas configurações de cada uma delas. Dessa forma, foi possível avaliar o impacto potencial de cada alavanca individualmente e seus respectivos quatro níveis de esforço. Isso é importante para refletir sobre a importância de cada fator individual nas mudanças climáticas e destacar áreas-chave para a redução das emissões de carbono.

Figura 53 - Análise de sensibilidade em relação as reduções de emissões da GC, com níveis variados de configuração para diferentes rotas.



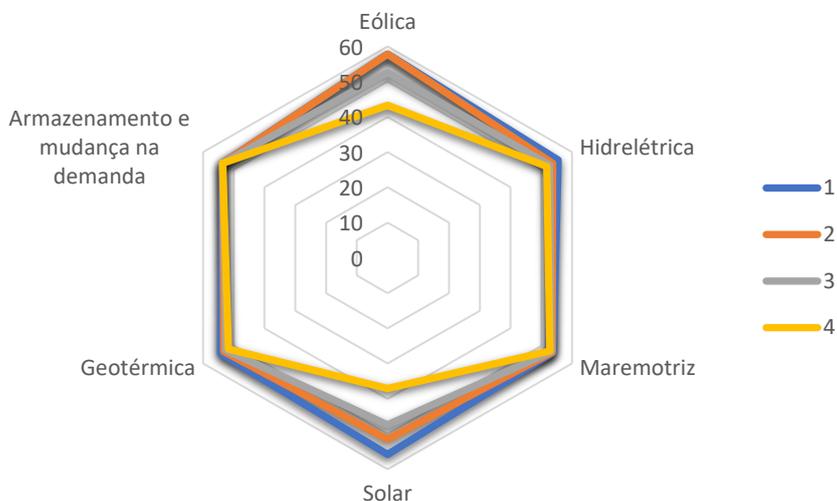
Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

Contudo, é importante notar que a GC opera como um modelo de dinâmica de sistema, ou seja, todas as alavancas estão integradas e se afetam mutuamente. Portanto, se o impacto individual de cada alavanca for somado, o resultado em termos de emissões de GEE e balanço energético pode ser diferente do que quando considerado agregadamente como um novo caminho.

Entretanto, é importante lembrar que nesta análise está sendo considerado apenas os impactos das tecnologias energéticas renováveis como fator para a redução de emissões. Os dados indicam que a ativação das alavancas para tecnologias energéticas renováveis tem um impacto significativo na redução das emissões, com o maior efeito observado no cenário RCP2.6 e o menor no cenário RCP8.5. Para o caso do RCP2.6, ao se avançar do nível 3 ao 4 nas alavancas (*levers*) relacionados às energias renováveis, as emissões se tornam automaticamente negativas. No nível 3, as emissões foram de -0,5 GtCO₂e, enquanto no nível 4 foram de -0,4 GtCO₂e. No entanto, esses valores não são visíveis na Figura 53 devido a escala estabelecida. Em todos os cenários, ao acionar os níveis 3 e 4 que exigem um nível de ambição maior, mesmo sendo apenas um recorte de tecnologias energéticas, é possível ver um impacto na redução de emissões. Isso mostra o qual importante é a mitigação no setor de energia globalmente.

Para complementar a análise anterior, uma segunda análise foi realizada, desta vez focando nas fontes de energia renovável, com o objetivo de ampliar o entendimento sobre qual das fontes tem maior impacto na redução das emissões de carbono. Para essa análise, foi utilizada a rota de base da IEA 4DS como parâmetro. A Figura 54 abaixo apresenta as projeções de emissões para 2050 por fonte de energia renovável, considerando a ativação de quatro alavancas distintas. Cabe destacar que esse tipo de análise de sensibilidade não é possível para a bioenergia na GC, uma vez que sua projeção é consequência da disponibilidade de terra e resíduos, de forma interconectada a outros setores, inclusive mudanças no consumo de alimentos e na produtividade agropecuária.

Figura 54 -Projeções de Emissões de CO₂ para 2050 por Fonte de Energia no Cenário IEA 4DS.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

Os dados mostram que a energia eólica começa com emissões altas (57,8 GtCO_{2e}) que permanecem constantes até a segunda alavanca, mas diminuem significativamente a partir da terceira, chegando a 43,3 GtCO_{2e} na quarta alavanca. A hidrelétrica mostra uma redução gradual nas emissões, passando de 55,5 GtCO_{2e} na primeira alavanca para 51,8 GtCO_{2e} na quarta. A energia maremotriz tem emissões relativamente constantes, com uma leve redução de 53,8 GtCO_{2e} para 52,8 GtCO_{2e} ao longo das alavancas.

A energia solar apresenta uma das reduções mais significativas nas emissões, começando em 55,8 GtCO_{2e} na primeira alavanca e diminuindo para 37,1 GtCO_{2e} na quarta. A geotérmica também mostra uma redução gradual, indo de 54,3 GtCO_{2e} na primeira alavanca para 51,8 GtCO_{2e} na quarta. Por outro lado, o armazenamento e mudança, na demanda mostram emissões constantes de 53,6 GtCO_{2e}, independentemente da alavanca ativada.

A análise revela que diferentes fontes de energia renovável têm impactos variados na redução das emissões de carbono. A energia solar e eólica apresenta as maiores reduções, especialmente com a ativação das alavancas entre os níveis 3 e 4. Em contraste, a energia maremotriz e as mudanças no armazenamento e demanda apresentam as menores reduções. Isso destaca a importância de priorizar tecnologias como solar e eólica

para alcançar reduções significativas nas emissões de carbono até 2050, conforme o cenário IEA4DS

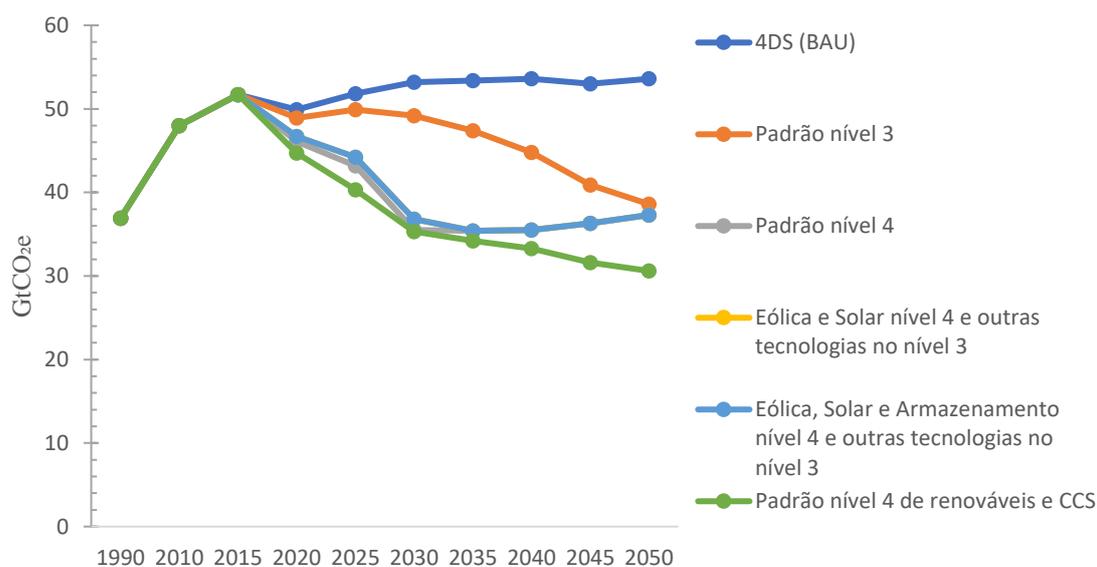
5.2.1 Análise comparada sob diferentes cenários globais

Além das análises mencionadas anteriormente, também foram exploradas diferentes trajetórias de emissões de GEE, de forma agregada, ao longo do tempo, desde 1990 até 2050. Cada trajetória reflete um nível distinto de investimento e adoção de tecnologias renováveis. Para detalhar melhor as diferentes abordagens possíveis e os resultados esperados, as trajetórias foram agrupadas em diversos cenários, cada um dos quais corresponde a um nível específico de adoção tecnológica e investimento em energias renováveis. Estes cenários são descritos a seguir:

- 4DS (BAU): Representa o cenário de Desenvolvimento Sustentável (4DS), que mantém um nível mais conservador de adoção de energias renováveis.
- Padrão Nível 3: Um cenário intermediário onde algumas tecnologias renováveis são adotadas, mas não de forma agressiva.
- Padrão Nível 4: Um cenário mais ambicioso com maior adoção de tecnologias renováveis.
- Eólica e Solar no Nível 4, e outras tecnologias no nível 3: Um cenário onde as tecnologias eólica e solar são adotadas intensivamente (Nível 4), enquanto outras tecnologias permanecem no nível intermediário (Nível 3).
- Eólica, Solar e Armazenamento no Nível 4, outras tecnologias no nível 3: Similar ao anterior, mas inclui investimentos em armazenamento de energia.
- Padrão Nível 4 de Renováveis e CCS: O cenário mais ambicioso, combinando altos níveis de energias renováveis e tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS).

A análise dessas trajetórias permite compreender as implicações em termos de emissões em cada cenário, conforme ilustrado na Figura 55.

Figura 55 – Trajetórias de emissões GEE a partir para o setor de tecnologias energéticas.



Fonte: Elaboração da autora, com base em dados da GC (2024).

Na Figura 55, a linha amarela, que representa o cenário de energia eólica e solar no nível 4 e outras tecnologias no nível 3, se sobrepõe à linha cinza, que corresponde ao cenário padrão nível 4. Essa sobreposição ocorre porque as trajetórias de emissões são muito semelhantes entre esses dois cenários, resultando em uma curva praticamente idêntica. Dessa forma, a linha amarela não aparece de forma clara, pois o comportamento das emissões nesses dois cenários é muito próximo, especialmente em termos de redução de GEE ao longo do tempo.

O cenário 4DS, que é um cenário BAU, mostra um aumento nas emissões de 36,9 GtCO₂e em 1990 para 53,6 GtCO₂e em 2050, indicando um cenário de continuidade e elevação de emissões. No cenário Padrão Nível 3, observa-se uma redução gradual das emissões após 2020, caindo de 48,9 GtCO₂e em 2020 para 38,6 GtCO₂e em 2050. Esse cenário sugere que investimentos moderados em energias renováveis podem começar a reduzir as emissões de GEE ao longo do tempo. Por outro lado, o cenário Padrão Nível 4 exibe uma queda mais acentuada nas emissões, especialmente a partir de 2025, chegando a 37,3 GtCO₂e em 2050. Cenários como Eólica e Solar no Nível 4 e o restante no 3 e Eólica, Solar e Armazenamento no Nível 4 e o restante no 3 apresentam resultados semelhantes ao Padrão Nível 4, com 37,3 GtCO₂e em 2050. Isso demonstra que, embora a concentração em eólica e solar seja eficaz, outras tecnologias também precisam de investimentos robustos.

O cenário Padrão Nível 4 de Renováveis e CCS apresenta a maior redução nas emissões, atingindo 30,6 GtCO_{2e} em 2050. A combinação de altos investimentos em energias renováveis e em tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) proporciona a redução mais significativa, destacando a importância dessa abordagem combinada para alcançar metas climáticas ambiciosas. A análise de sensibilidade dos níveis de investimento em energias renováveis revela que cenários com maiores investimentos em tecnologias limpas, especialmente quando combinados com CCS, resultam nas reduções mais significativas de emissões de GEE. Em particular, o cenário "Padrão Nível 4 de Renováveis e CCS" demonstra a eficácia de uma abordagem combinada, atingindo uma redução para 30,6 GtCO_{2e} em 2050, o que é substancialmente menor em comparação com os outros cenários.

Além disso, é importante entender que, apesar das emissões de energia serem importantes e significativas no panorama geral, para alcançar as metas estabelecidas é preciso uma atuação integrada e coordenada não apenas em tecnologias energéticas, mas também em outros setores. A bioenergia, por exemplo, é um indicador importante, entretanto, não será utilizado como métrica para este trabalho devido à complexidade que os níveis de ambição desse indicador se relacionada dentro da calculadora com outros sistemas que não estão relacionados à energia. Outra fonte com interações complexas é o hidrogênio, que depende do tipo de fonte utilizada para sua produção.

5.3 Avaliações e recomendações

Apesar de suas capacidades abrangentes, a Calculadora Global apresenta algumas limitações, sendo a principal delas a simplificação excessiva das interações complexas entre setores econômicos e tecnológicos. A modelagem de cenários futuros de emissões de GEE envolve uma vasta gama de variáveis interdependentes, como mudanças tecnológicas, comportamentos de mercado, políticas governamentais e dinâmicas socioeconômicas. A Calculadora Global tende a representar essas interações de maneira simplificada para facilitar a compreensão e a análise pelos usuários.

Por exemplo, as complexidades setoriais que envolvem a interação entre o setor de energia e outros setores econômicos, como indústria, transporte e agricultura, podem ser mais profundas do que o modelo sugere. Essas complexidades podem incluir efeitos indiretos, como as mudanças nas políticas de energia que afetam o mercado de trabalho, a inovação tecnológica e a competitividade internacional. Além disso, a ferramenta pode não captar plenamente as nuances das interações entre diferentes tecnologias, como a

influência da adoção de veículos elétricos na demanda por energia e na infraestrutura de carregamento.

Além disso, a simplificação pode levar a uma subestimação ou superestimação dos impactos de determinadas políticas. Por exemplo, a implementação de uma política de incentivo à energia solar pode ter impactos variados dependendo das condições econômicas locais, da aceitação pública e das infraestruturas existentes – fatores que podem não ser completamente considerados no modelo.

Diante dessas limitações, é importante destacar que as recomendações a seguir não são direcionadas ao aprimoramento da Calculadora Global, mas sim à orientação dos países na elaboração e implementação de suas NDCs. Essas sugestões têm como objetivo fortalecer as estratégias nacionais, garantindo que as NDCs sejam mais eficazes e abrangentes ao lidar com as complexidades reais da transição energética e da mitigação das mudanças climáticas. As seguintes recomendações visam proporcionar uma abordagem mais robusta e realista para enfrentar os desafios climáticos:

- **Definição de Metas Claras:** Os países devem estabelecer metas específicas e mensuráveis para a redução de emissões de GEE, considerando as particularidades de cada setor e região, garantindo que as NDCs sejam ambiciosas e realistas.
- **Fortalecimento das Políticas Climáticas:** É necessário implementar políticas robustas e adaptativas que promovam a transição energética. Isso inclui a criação de incentivos fiscais, subsídios para energias renováveis e regulamentações que estimulem a inovação tecnológica e a descarbonização dos setores produtivos.
- **Integração de Soluções de Armazenamento de Energia:** Os países devem desenvolver e implementar sistemas de armazenamento de energia que complementem as fontes renováveis, garantindo uma maior estabilidade na oferta e reduzindo a dependência de fontes fósseis, o que é crucial para alcançar os objetivos das NDCs.
- **Promoção de Colaboração Internacional:** A colaboração entre países é fundamental. É importante estimular parcerias para a troca de tecnologias e melhores práticas, bem como desenvolver mecanismos de financiamento climático e assistência técnica que ajudem a acelerar a transição energética global.

- **Engajamento Amplo das Partes Interessadas:** A inclusão de setores privados, organizações não governamentais e a sociedade civil no processo de formulação e implementação das NDCs é essencial. Isso garante que as políticas climáticas sejam mais eficazes e tenham maior aceitação, refletindo uma ampla gama de interesses e conhecimentos.

5.4 Considerações sobre Governança Climática e o Papel da Cooperação Internacional na Transição Energética

Com base nos resultados e discussão apresentados, sobretudo quanto ao aspecto global das mudanças climáticas e às metas individuais estabelecidas pelas NDCs da Índia, Brasil, Estados Unidos e União Europeia, torna-se evidente a necessidade premente de ação colaborativa. Além disso, a UNFCCC estabelece o princípio das “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”, uma vez que os países desenvolvidos são os maiores responsáveis pelas emissões históricas de GEE e, portanto, devem ser solidários aos demais países, em seus processos de desenvolvimento socioambiental e econômico, sobretudo no que se refere à transição energética e à redução da dependência de combustíveis fósseis.

Diante dos cenários apresentados pelo IPCC e do alto nível de sensibilidade tecnológica exigido, que implica em uma transformação substancial na matriz energética mundial, a governança climática eficaz estabelece as bases para o cumprimento das metas das NDCs através da definição de metas claras e políticas robustas. Políticas climáticas bem elaboradas garantem que os esforços nacionais estejam alinhados com os compromissos internacionais e fornecem um caminho estruturado para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Essas políticas ajudam a criar um ambiente propício para a adoção de tecnologias limpas e a implementação de estratégias de mitigação.

A governança climática também envolve o fortalecimento das capacidades institucionais e a promoção da cooperação entre diferentes níveis de governo e setores públicos e privados. O desenvolvimento de capacidades institucionais e a coordenação entre entidades governamentais são fundamentais para a elaboração e implementação eficaz de políticas climáticas. Além disso, a colaboração entre os setores público e privado pode facilitar a inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias, promovendo soluções mais eficientes e sustentáveis para os desafios climáticos. Investimentos

coordenados em pesquisa, desenvolvimento e inovação podem catalisar o tanto o aprimoramento e a disseminação de tecnologias, quanto o desenvolvimento de novos processos e modelos. Destaca-se, ainda, a importância da transferência de tecnologias limpas via cooperação Norte-Sul e Sul-Sul, assim como a capacitação internacional.

A justiça climática é um aspecto fundamental da governança climática, que envolve a consideração das desigualdades entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. A cooperação internacional, especialmente através de mecanismos de financiamento e transferência de tecnologia, ajuda a nivelar o campo de jogo, permitindo que países em desenvolvimento acessem tecnologias avançadas e participem ativamente da transição energética global. A integração de princípios de justiça climática assegura que as soluções para as mudanças climáticas sejam justas e equitativas, abordando as necessidades e capacidades de todos os países envolvidos.

A cooperação internacional emerge como um fator-chave e determinante para alcançar resultados favoráveis, especialmente no contexto de um cenário global interconectado onde as ações de um país podem impactar outros. Nesse contexto, a cooperação internacional não apenas promove a troca de tecnologias e conhecimentos, mas também facilita o financiamento de projetos de energia limpa e promove a harmonização de políticas climáticas. Esses mecanismos facilitadores são essenciais para superar desafios econômicos, tecnológicos e regulatórios, permitindo que países em desenvolvimento adotem soluções mais avançadas e eficientes.

A cooperação internacional desempenha um papel importante na busca por soluções eficazes e sustentáveis no setor energético. Uma variedade de iniciativas internacionais tem sido desenvolvida para facilitar essa transição, incluindo a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), Agências e Programas das Nações Unidas, Energia Sustentável para Todos (SE4All), Grupo dos Oito (G8), Grupo dos Sete (G7), Grupo dos Vinte (G20) - Grupo de Trabalho de Transições Energéticas, Iniciativa Internacional de Energias Renováveis (IREI), Iniciativa para a Energia na América Latina e Caribe (ILAC), Ministerial de Energia Limpa (CEM) e o Tratado da Carta da Energia (EC).

Essas iniciativas desempenham papéis distintos, mas complementares, no avanço da agenda global de energia limpa. A Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA) promove a adoção de energias renováveis e facilita a cooperação internacional através da troca de conhecimentos e melhores práticas. Agências e Programas das Nações

Unidas, como o PNUMA e a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (ONUUDI), promovem políticas e práticas sustentáveis, fornecendo suporte financeiro e técnico para projetos verdes. A iniciativa Energia Sustentável para Todos (SE4All) foca no acesso universal a energia limpa e sustentável, facilitando parcerias e projetos que ampliam o acesso a energias renováveis, especialmente em países em desenvolvimento.

Os grupos internacionais como o G8, G7 e G20 desempenham papéis críticos ao estabelecer agendas e compromissos globais para a redução de emissões e o desenvolvimento de energias renováveis. O Grupo de Trabalho de Transições Energéticas do G20, por exemplo, facilita a cooperação entre as maiores economias do mundo para promover a sustentabilidade energética. A Iniciativa Internacional de Energias Renováveis (IREI) e a Iniciativa para a Energia na América Latina e Caribe (ILAC) promovem a cooperação global e regional, respectivamente, em projetos de energias renováveis, facilitando investimentos e o desenvolvimento de soluções energéticas inovadoras. A Ministerial de Energia Limpa (CEM) acelera o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de energia limpa através de cooperação e inovação.

O Tratado da Carta da Energia (EC) facilita investimentos em infraestrutura energética sustentável e promove a segurança energética. Esses esforços coletivos demonstram como a cooperação internacional pode proporcionar as ferramentas e o suporte necessários para enfrentar os desafios das mudanças climáticas de maneira eficaz e sustentável, promovendo um futuro energético mais limpo e resiliente.

Os acordos internacionais, como o Acordo de Paris, estabelecem metas e compromissos compartilhados pelos países para reduzir as emissões de GEE no setor energético e promover a adoção de fontes renováveis de energia. Além disso, a transferência de tecnologia desempenha um papel crucial, permitindo que países em desenvolvimento adotem soluções mais avançadas e eficientes em termos de energia renovável e eficiência energética. Outros mecanismos, como o financiamento climático, por meio do *Green Climate Fund* da UNFCCC e outros fundos internacionais, assim como os sistemas de comércio de emissões de carbono, visam facilitar o investimento em projetos de energia limpa e promover a transição para uma economia de baixo carbono. A cooperação em pesquisa e inovação também desempenha um papel vital, promovendo o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções para enfrentar os desafios energéticos das mudanças climáticas de forma mais eficaz.

Nesse contexto, a Tabela 3 a seguir destaca alguns dos principais mecanismos de cooperação internacional no setor energético e sua importância no combate às mudanças climáticas.

Tabela 3- Mecanismos de cooperação internacional.

Mecanismo	Descrição
Acordos internacionais	Tratados e convenções entre países para definir metas e compromissos em relação à redução de emissões de gases de efeito estufa, como o Acordo de Paris.
Transferência de tecnologia	Troca de conhecimento e tecnologia entre países desenvolvidos e em desenvolvimento para facilitar a adoção de práticas e tecnologias mais limpas e sustentáveis.
Financiamento climático	Disponibilização de fundos por países desenvolvidos para apoiar projetos de mitigação e adaptação em países em desenvolvimento, ajudando a acelerar a transição para energias renováveis.
Mecanismos de mercado	Implementação de sistemas de comércio de emissões de carbono, como o mercado de carbono (via sistemas de <i>cap and trade</i>), assim como o financiamento verde e o uso de impostos seletivos (<i>carbon tax</i>), a fim de incentivar a redução de emissões e promover investimentos em tecnologias limpas.
Cooperação em pesquisa e inovação	Colaboração entre instituições científicas e empresas de diferentes países para desenvolver soluções tecnológicas inovadoras e sustentáveis para enfrentar os desafios das mudanças climáticas.
Capacitação e desenvolvimento institucional	Assistência técnica e apoio para fortalecer as capacidades institucionais e regulatórias dos países em desenvolvimento, ajudando-os a implementar políticas climáticas eficazes.

Fonte: Elaboração da autora, com referências de IPCC (2014) e UNFCCC (2015 e 2024).

Esses esforços demonstram como a governança climática e a cooperação internacional podem fornecer as ferramentas e o suporte necessários para enfrentar os desafios das mudanças climáticas de maneira eficaz. A transparência, o fortalecimento institucional e a justiça climática são aspectos essenciais para garantir que a transição para um sistema energético mais sustentável seja realizada de forma equitativa e eficiente e as que as metas estabelecidas na NDC possam ser alcançadas. É importante ressaltar que a discussão apresentada sobre a governança climática e a cooperação internacional não pretende ser uma análise detalhada ou exaustiva do tema. Em vez disso, buscou-se fornecer algumas reflexões finais sobre interações entre esses elementos e seu impacto no cumprimento das metas das NDCs, no contexto das simulações realizadas neste estudo.

6 Conclusão

Esta dissertação analisou a transição energética global e suas implicações para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2050, utilizando modelos de dinâmica de sistemas, como as Calculadoras 2050. A hipótese inicial de que a modelagem integrada de sistemas poderia auxiliar na identificação de cenários mais eficazes para a transição energética foi confirmada, pois os modelos demonstraram ser ferramentas valiosas e objetivas para prospecção e comparação com as NDCs. Os objetivos geral e específicos da dissertação foram atendidos, proporcionando uma visão detalhada das diferentes trajetórias de transição energética de países e regiões selecionados, como Brasil, Índia, Estados Unidos e União Europeia.

Os resultados evidenciam que, apesar dos avanços na adoção de tecnologias de energia renovável e nas políticas climáticas, os esforços globais ainda são insuficientes para cumprir as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris. As análises realizadas indicam que, se mantidas as trajetórias atuais, haverá concentrações atmosféricas de GEE que levarão a um aquecimento global que ultrapassa os limites considerados seguros pelo IPCC. A implementação eficaz das NDCs é crucial para alcançar metas de redução de emissões até 2030 e 2050, e as análises comparativas destacaram que políticas específicas e avanços tecnológicos serão fundamentais nesse processo. Esses resultados corroboram com análises do IPCC e outros estudos, mas trazem uma abordagem metodológica diferenciada, com novas perspectivas de análise e discussão setorial, quanto à identificação de caminhos futuros mais sustentáveis à transição energética.

Os resultados demonstram que há uma disparidade entre o discurso oficial e as trajetórias observadas e pretendidas para mitigação de carbono. Na maioria dos casos, as metas pretendidas somente são atendidas em simulações extremas nos modelos utilizados, o que reforça a necessidade de se intensificar a implementação das promessas internacionais realizadas pelos diversos países. O grande desafio é não apenas reduzir emissões, mas reduzi-las mais rapidamente, haja vista a emergência climática em curso. Enquanto a Índia está progredindo em direção às suas metas de emissões devido à sua NDC altamente insuficiente, a União Europeia está avançando na redução das emissões em um cenário mais otimista, embora tenha maior responsabilidade histórica sobre as emissões e importe várias matérias-primas e produtos manufaturados do exterior. No entanto, nenhum desses países ou regiões, incluindo a UE, está no caminho de alcançar completamente as metas de 2030 e a neutralidade de carbono até 2050, sem a adoção de

políticas climáticas mais ambiciosas. Análises de especialistas do *Climate Action Tracker* (CAT), discutidas neste trabalho, também apontam que as NDCs apresentadas até agora não são suficientemente ambiciosas para limitar o aquecimento global a 1,5°C.

A discussão sobre justiça climática é fundamental ao avaliar as metas de emissões para 2030 e 2050. A comparação entre países evidencia que, apesar dos recursos financeiros e tecnológicos superiores dos Estados Unidos e da União Europeia, esses países ainda enfrentam desafios significativos para atingir suas metas climáticas. Tais desafios incluem a modernização de infraestruturas energéticas, o avanço de tecnologias ainda não competitivas, como o CCS, o fortalecimento de políticas de eficiência energética e a gestão de pressões políticas internas.

Por outro lado, países em desenvolvimento como Brasil e Índia enfrentam desafios mais acentuados devido a suas realidades socioeconômicas complexas. O Brasil precisa conciliar a conservação da floresta amazônica, vital para a mitigação global, com a expansão de sua infraestrutura de energias renováveis. A Índia, com sua alta dependência de carvão e uma população crescente, enfrenta a tarefa complexa de equilibrar o crescimento econômico com a redução de emissões, considerando os desafios de desenvolvimento do país.

Essas disparidades nas capacidades de implementar metas climáticas levantam questões importantes de justiça climática. Embora países em desenvolvimento tenham uma contribuição histórica menor para as emissões globais, frequentemente são os mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas e possuem menos recursos para mitigação e adaptação. Assim, alcançar a justiça climática requer não apenas esforços internos desses países, mas também um apoio substancial e cooperação internacional, especialmente das nações mais desenvolvidas, para assegurar que as metas globais sejam alcançadas de maneira justa e equitativa.

A Governança Climática e o papel da cooperação internacional na transição energética são, portanto, determinantes para enfrentar os desafios climáticos de forma eficaz e sustentável. Mecanismos de financiamento climático e a harmonização de políticas são indispensáveis para acelerar a transição global para um sistema energético mais sustentável. A cooperação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento se faz necessária para garantir a transferência de tecnologia, o financiamento adequado e a coordenação das políticas climáticas. Considerar as características únicas de cada país,

como sua geografia, cultura e infraestrutura existente, também deve ser feito para a formulação de estratégias eficazes para a transição energética.

Por fim, a construção de uma matriz energética sustentável é um desafio complexo que exige esforços conjuntos de governos, setor privado e sociedade civil. A transição energética não é apenas uma questão técnica, mas também um imperativo ético e moral para assegurar um futuro sustentável para as próximas gerações. A urgência das ações necessárias exige comprometimento contínuo e colaboração em todos os níveis da sociedade para alcançar um mundo com baixas emissões de carbono e mais resiliente às mudanças climáticas.

6.1 Recomendações para estudos futuros

Para avançar na compreensão e implementação eficaz da transição energética, recomenda-se aprofundar a análise dos impactos socioeconômicos dessa transição, com ênfase na equidade global e justiça ambiental. Estudos futuros devem investigar como as mudanças no setor energético afetam diferentes grupos sociais e regiões, considerando as disparidades existentes e garantindo que a transição beneficie de maneira justa todos os segmentos da população. Além disso, é importante explorar novas tecnologias emergentes e cenários de políticas mais ambiciosas que possam acelerar a descarbonização dos sistemas energéticos. A inovação tecnológica e a implementação de políticas mais comprometidas são necessárias para superar os desafios atuais e atingir as metas climáticas de forma eficaz. A pesquisa deve focar em identificar e desenvolver soluções que ofereçam avanços significativos na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Outra área de investigação relevante é o desenvolvimento de estratégias de adaptação para lidar com os impactos inevitáveis das mudanças climáticas. É fundamental criar e implementar medidas que ajudem as comunidades locais a se prepararem e se adaptarem às novas condições climáticas, minimizando os riscos e danos associados às mudanças. Integrar análises regionais detalhadas também é recomendável para entender melhor as particularidades locais e identificar as melhores práticas na transição energética. Cada região pode enfrentar desafios únicos e ter oportunidades específicas que precisam ser consideradas para o desenvolvimento de estratégias de transição bem-sucedidas e adaptadas às suas necessidades e contextos locais.

Finalmente, é necessário atualizar e seguir aprimorando as Calculadoras 2050 existentes, inclusive para períodos futuros (ex.: 2060, 2080 etc.), assim como desenvolver novas calculadoras para outros países, entre outros modelos sistêmicos de mitigação climática, reduzindo incertezas e aumentando a acurácia das simulações. Isso inclui a melhoria da base de dados e a adequada integração de variáveis. Esses modelos desempenham um papel importante na previsão de cenários futuros e na avaliação das estratégias de mitigação. Melhorar a precisão e a inclusão de países ainda não contemplados é importante para garantir que todos os países possam contribuir adequadamente para a redução das emissões e alcançar as metas climáticas globais.

7 Referências

Akrofi, M. M., Okitasari, M., & Kandpal, R. (2022). Recent trends on the linkages between energy, SDGs and the Paris Agreement: a review of policy-based studies. *Discover Sustainability*, 3(1), 32.

AR6. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Banco Mundial. (2022). Brasil. Recuperado de <https://data.worldbank.org/country/brazil?locale=pt>

Banco Mundial. (2024). Estados Unidos. Recuperado de <https://data.worldbank.org/country/united-states?view=chart>

BPIE, Roscini, A. V., Rapf, O., & Kockat, J. (2020). Contributions from the building sector to a strengthened 2030 climate target – On the way to a CLIMATE-NEUTRAL EUROPE 2030. Brussels.

Brasil. (2017). *Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)*. Ministério de Minas e Energia. <https://www.mme.gov.br/documents/10584/20210471/Politica+Nacional+de+Biocombust%C3%ADveis+RenovaBio.pdf>

Brasil. (2018). *Programa Rota 2030: Mobilidade e eficiência energética*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). <https://www.inmetro.gov.br/rotas2030>

BRICS Policy Center. (2023). *Sumário Executivo: Ambição Climática* [PDF]. Recuperado de https://bricspolicycenter.org/wp-content/uploads/2023/03/Sumario-Executivo-Ambicao-Climatica-BRICS_WEB.pdf

Capros, P., van der Zwaan, B., & Dimitriou, A. (2016). *EU Reference scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions: Trends to 2050*. European Commission. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20EU%20Reference%20Scenario%202016%20-%20Main%20Report.pdf>

Casa Civil. (2021). Aprovada a criação do Programa Combustível do Futuro. Casa Civil. Recuperado de <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/abril/aprovada-a-criacao-do-programacombustivel-dofuturo#:~:text=O%20Programa%20Combust%C3%ADvel%20do%20Futuro%2C%20que%20tem%20como,um%20passo%20na%20lideran%C3%A7a%20da%20transi%C3%A7%C3%A3o%20>.

CAT. Climate Action Tracker (2024a). Brazil. Recuperado de <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/>

CAT. Climate Action Tracker. (2023b). India. Recuperado de <https://climateactiontracker.org/India>

CAT. Climate Action Tracker. (2024c). European Union. Recuperado de <https://climateactiontracker.org/countries/EU/>

CAT. Climate Action Tracker. (2024d). United States. Recuperado de <https://climateactiontracker.org/countries/usa/>

Cheng, Y., Awan, U., Ahmad, S., & Tan, Z. (2021). How do technological innovation and fiscal decentralization affect the environment? A story of the fourth industrial revolution and sustainable growth. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120398.

Chilvers, J., Foxon, T. J., Galloway, S., Hammond, G. P., Infield, D., Leach, M., ... & Thomson, M. (2017). Realising transition pathways for a more electric, low-carbon energy system in the United Kingdom: Challenges, insights and opportunities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 231(6), 440-477.

Climate Interactive. 2024. En-Roads. Recuperado de <https://en-roads.climateinteractive.org>

Climate Transparency. (2022). Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action. Recuperado de <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT2022-India-Web.pdf>

Climate Transparency. (2024). EU Climate Policy Analysis.

CNPE. Conselho Nacional de Política Energética. (2021, 20 de abril). Resolução CNPE nº 7, de 20 de abril de 2021. Institui o Programa Combustível do Futuro e dá outras

providências. Recuperado de https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-docnpe/arquivos/2021/ResoluesCNPE7_2021.pdf

Comissão Europeia. (2020). Building renovation. Recuperado de https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/building-renovation_en

Comissão Europeia. (2020). Sustainable and smart mobility strategy. Recuperado de https://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2020-mobility-strategy_en

De La Peña, L., Guo, R., Cao, X., Ni, X., & Zhang, W. (2022). Accelerating the energy transition to achieve carbon neutrality. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105957.

de Oliveira, Y. L. (2021). Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. *Meio Ambiente (Brasil)*, 4(1).

Devezas, T., LePoire, D., Matias, J. C., & Silva, A. M. (2008). Energy scenarios: Toward a new energy paradigm. *Futures*, 40(1), 1-16.

EIA. Energy Information Administration. (2024). U.S. Energy Facts. Recuperado de <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/>

Elizondo, A., Pérez-Cirera, V., Strapasson, A., Fernández, J. C., & Cruz-Cano, D. (2017). Mexico's low carbon futures: An integrated assessment for energy planning and climate change mitigation by 2050. *Futures*, 93, 14-26.

ENGIE Brasil. (2023). A norma de hidreletricidade sustentável. Recuperado de <https://www.alemnaenergia.engie.com.br/a-norma-de-hidreletricidade-sustentavel/>

EPA. (2024b). Inventário das emissões e sumidouros de gases de efeito estufa dos EUA. Recuperado de <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>

EPA. Environmental Protection Agency (EPA). (2024a). Sources of Greenhouse Gas Emissions. Recuperado de <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>

EPE. (2024). Balanço Energético Nacional: Síntese 2024. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024.pdf

EPE. 2022. Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica EPE/DPG/SDB nº 03/2022: Intensidade de carbono - Transporte Rodoviário [PDF]. Recuperado de https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf

EUR-LEX. European Union. (2021). EUR-LEX: Access to European Union Law. Estados Membros. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/PT/legal-content/glossary/member-states.html#:~:text=Atualmente%2C%20a%20UE%20%C3%A9%20constitu%C3%ADda,%20Eslov%C3%A1quia%20Finl%C3%A2ndia%20e%20Su%C3%A9cia.>

Eurostat. (2021). Gross domestic product (GDP) at market prices by NUTS 2 regions. Recuperado de https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/NAMA_10_GDP

Ferreira, T. B., & Machado, G. V. (2021). O papel do planejamento na transição energética: mais luz e menos calor. *Revista Brasileira de Energia*, 27(2).

Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T., & Matsuoka, Y. (2006). Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *The Energy Journal*, Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy Special Issue III, 343-354.

GAIN. GAIN Energy Calculator. 2024. Recuperado de <https://gain.ornl.gov/#/calculator/calculate>

GC. Calculator, G. (2017). Prosperous living for the world in 2050: insights from the Global Calculator. Recuperado de https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7cfcb1e5274a33be6483e1/Global_calc_report_WEB.pdf

Global Carbon Budget. (2023). Global Carbon Budget 2023. Global Carbon Project. https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/23/files/GCP_CarbonBudget_2023.pdf

IAG. Instituto de Agricultura e Meio Ambiente. 2024. Políticas Públicas Globais para a Sustentabilidade: Um Estudo de Caso sobre Mudanças Climáticas e Energia. Recuperado

de<https://agro.insper.edu.br/storage/papers/February2024/IAG%20PoliticPublicasGlo-bais.pdf>

IEA. (2021). India energy outlook 2021. World Energy Outlook Special Report.

IESS. (2023). India Energy Security Scenarios (IESS) 2047 Version 3.0.

Imperial College London. 2023. [Site institucional] The 2050 Calculator Programme, [online]. <https://www.imperial.ac.uk/2050-calculator/about/> (Acessado em 28 de maio de 2023)

InfoMoney. (2023). Quais são as 20 maiores economias do mundo? Para o FMI, o Brasil está em 9º lugar. Recuperado de <https://www.infomoney.com.br/economia/quais-sao-as-20-maiores-economias-do-mundo-para-o-fmi-o-brasil-esta-em-9-lugar/>

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, et al., Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC.

IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

IRENA & Climate Policy Initiative. (2023). *Global landscape of renewable energy finance, 2023*. International Renewable Energy Agency.

IRENA. 2018. *Renewable energy and jobs – Annual review 2018*. IRENA, Abu Dhabi.

IRENA. 2023. *Energy Transition*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>

- Kober, T., Schiffer, H. W., Densing, M., & Panos, E. (2020). Global energy perspectives to 2060—WEC's World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100523.
- Lannelongue, L., Grealey, J., & Inouye, M. (2021). Green algorithms: quantifying the carbon footprint of computation. *Advanced Science*, 8(12), 2100707.
- Losekann, L., & Tavares, A. (2021). Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural.
- Losekann, L., & Tavares, F. B. (2019). Política Energética no BRICS: desafios da transição energética (No. 2495). Texto para Discussão.
- McCollum, D. L., Zhou, W., Bertram, C., De Boer, H. S., Bosetti, V., Busch, S., ... & Riahi, K. (2018). Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Energy*, 3(7), 589-599.
- MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2024. Sinapse - Sistema Nacional de Projeções de Emissões. Recuperado de <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/sinapse>
- Meadows, D. H. (2022). *Pensando em sistemas: Pensamento sistêmico para problemas complexos*. Editora Cultrix. Recuperado de <https://www.amazon.com.br/Pensando-sistemas-pensamento-sist%C3%AAmico-problemas/dp/6555644524>
- Mikulčić, H., Baleta, J., Klemeš, J. J., & Wang, X. (2021). Energy transition and the role of system integration of the energy, water and environmental systems. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126027.
- MInfra. Ministério da Infraestrutura. (2023). Descarbonização no Setor de Transportes: Infra S.A. promove seminário com propostas para reduzir emissões de gases de efeito estufa. Recuperado de <https://www.infrasa.gov.br/descarbonizacao-no-setor-de-transportes-infra-s-a-promove-seminario-com-propostas-para-reduzir-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa/>
- MMA. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2024). Biodiversidade brasileira. <https://antigo.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-brasileira.html>
- NEP. National Electricity Policy. (2023). Government of India. Ministry of Power. Central Electricity Authority. (2023).

NEXT IAS. (2023). Global Biofuel Alliance. Recuperado de <https://www.nextias.com/blog/global-biofuel-alliance/>

NITI Aayog. (2023). India Energy Security Scenarios (IESS) 2047 V3.0. Government of India.

Nunes, M. S. (2022). O Brasil no Acordo de Paris sobre Mudanças Climáticas: um estudo sobre o cumprimento das metas de redução de emissões no setor de energia. Editora Licuri, 1-47.

Ockwell, D. G., Watson, J., MacKerron, G., Pal, P., & Yamin, F. (2008). Key policy considerations for facilitating low carbon technology transfer to developing countries. *Energy policy*, 36(11), 4104-4115.

Our World in Data. (2024). Emissões de CO₂ por país. Recuperado de <https://ourworldindata.org/co2/country/united-states>

Parlamento Europeu. (2018). Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor. Retrieved from <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>

Parlamento Europeu. (2021). Relatório especial: Emissões de gases de efeito estufa na UE. Recuperado de <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/PDF/?uri=SWD:2023:339>

Pestiaux, J., Matton, V., Cornet, M., Costa, L., Hezel, B., Kelly, G., ... & Taylor, E. (2019). Introduction to the eucalc model cross-sectoral model description and documentation. European Commission: Brussels, Belgium.

PNUD Brasil. (2021). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Objetivo 13: Ação contra a mudança global do clima. Recuperado em março 08, 2022, de <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>

Quitrow, R., Thielges, S., Goldthau, A., Helgenberger, S., & Mbungu, G. (2019). Advancing a global transition to clean energy—the role of international cooperation. *Economics*, 13(1).

Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887-935.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. (2024). Plataforma SEEG. <https://seeg.eco.br>

Silva, B. N., & Sanquetta, C. R. (2017). *Álise da contribuição nacionalmente determinada (ndc) brasileira em comparação aos países do BRICS*. *Revista Presença Geográfica*, 4(1), 73-89.

Smil, V. (2000). Perils of long-range energy forecasting: reflections on looking far ahead. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(3), 251-264.

Smil, V. (2018). *Energy and civilization: a history*. MIT press.

Söderholm, P., Hildingsson, R., Johansson, B., Khan, J., & Wilhelmsson, F. (2011). Governing the transition to low-carbon futures: A critical survey of energy scenarios for 2050. *Futures*, 43(10), 1105-1116.

Spain & European Commission. (2023). *Update of the NDC of the European Union and its Member States: Submission by Spain and the European Commission on behalf of the European Union and its Member States*. Madrid.

Strachan, N., Pye, S., & Kannan, R. (2009). The iterative contribution and relevance of modelling to UK energy policy. *Energy Policy*, 37(3), 850-860.

Strapasson, A., Woods, J., Meessen, J., Mwabonje, O., Baudry, G., & Mbuk, K. (2020). EU land use futures: modelling food, bioenergy and carbon dynamics. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100545.

Strapasson, A., Woods, J., Pérez-Cirera, V., Elizondo, A., Cruz-Cano, D., Pestiaux, J., ... & Chaturvedi, R. (2020). Modelling carbon mitigation pathways by 2050: Insights from the Global Calculator. *Energy Strategy Reviews*, 29, 100494.

TALANOIA, 2023. *NDC brasileira com metas corrigidas para 2025 e 2030*. Nota Técnica 4. Série “NDC brasileira”. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: institutotalanoia.org/documentos

The White House. (2021, February 19). Executive order on tackling the climate crisis at home and abroad. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/01/27/executive-order-on-tackling-the-climate-crisis-at-home-and-abroad/>

UNEP. (2021). Emissions gap report 2020. UN.

UNFCCC. (2023). Global stocktake. United Nations Framework Convention on Climate Change. Recuperado de <https://unfccc.int/global-stocktake>.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris Agreement. Recuperado de <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2020). Nationally Determined Contributions (NDCs). Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>

UNFCCC. (2024). Technology Mechanism. United Nations Framework Convention on Climate Change. Retrieved from https://unfccc.int/ttclear/technology_mechanism

União Europeia. (2021). Climate Action: European Green Deal. Recuperado de https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en

US. United States. (2021). Nationally Determined Contribution. Recuperado de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/United%20States%20NDC%20April%2021%202021%20Final.pdf>

Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Den Elzen, M. G. J., van Veldhuizen, J. E., Kram, T., et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31.

Wang, H., & Chen, W. (2019). Modeling of energy transformation pathways under current policies, NDCs and enhanced NDCs to achieve 2-degree target. *Applied Energy*, 250, 549-557.

Webber, M. E. (2016). *Thirst for power: Energy, water, and human survival*. Yale University Press.

WeForum. World Economic Forum. (2023). Investment in low-carbon energy broke records in 2022. World Economic Forum. Retrieved from <https://www.weforum.org>

WRI Brasil. (2021). SIMULADOR DE POLÍTICAS SETORIAIS E EMISSÕES: MÉTODOS, DADOS E RESULTADOS PARA O BRASIL EM 2050 [Nota técnica]. Recuperado de <https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wribrasil-nota-tecnica-eps-brasil-pt.pdf>

WRI Brasil. (2024). Gráficos: Emissões per capita de gases de efeito estufa por país. Recuperado de <https://www.wribrasil.org.br/noticias/graficos-emissoes-per-capita-gases-de-efeito-estufa-paises>.