

Lucas Samuel de Lima Tiburcio

Tendências em Eficiência Energética e Emissões de CO₂:
Uma Análise Envoltória de Dados

Sorocaba
2024

Lucas Samuel de Lima Tiburcio

Tendências em Eficiência Energética e Emissões de CO₂:
Uma Análise Envoltória de Dados

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales
Paredes

Sorocaba
2024

T554t

Tiburcio, Lucas Samuel de Lima

Tendências em eficiência energética e emissões de CO2 :
uma análise envoltória de dados / Lucas Samuel de Lima

Tiburcio. -- Sorocaba, 2024

130 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes

1. Análise energética. 2. Dióxido de carbono atmosférico. 3.
Análise de envoltória de dados. 4. Sustentabilidade. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Tendências em Eficiência Energética e Emissões de CO₂: uma Análise Evolutória de Dados

AUTOR: LUCAS SAMUEL DE LIMA TIBÚRCIO

ORIENTADOR: HELMO KELIS MORALES PAREDES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba

Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Prof. Dr. ALEXANDRE CÂNDIDO MOREIRA (Participação Virtual)
Núcleo de Inovação, Pesquisa e Ensino em Mecatrônica - NIPEM / Universidade Federal de São João del-Rei

Sorocaba, 09 de dezembro de 2024

A todos meus familiares, dedico este trabalho
Em especial aos meus pais, que com amor, apoio e incentivo
estiveram ao meu lado e me ajudaram
a conquistar mais esta etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes, pela orientação, paciência e pela grande oportunidade de me aceitar como seu orientado nesta instituição.

Aos amigos do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), em especial ao Doutorando Paulo Fernando Silva, pelas constantes ajudas e pelo apoio durante esta jornada.

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, por proporcionar o ambiente necessário para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a todos que, de alguma forma, incentivaram e torceram pelo desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Se você quer ser bem-sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si.”

Ayrton Senna

RESUMO

O cenário energético global apresenta desafios significativos em decorrência à dependência de recursos não renováveis e ao uso insustentável desses recursos, que intensificam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e comprometem a sustentabilidade do consumo energético. Em resposta, a eficiência energética (EE) tornou-se uma prioridade para o desenvolvimento econômico, evidenciada em iniciativas como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Este trabalho realiza uma análise comparativa do desempenho energético dos países do Grupo dos Vinte (G20) (África do Sul, Alemanha, Arábia Saudita, Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, França, Índia, Indonésia, Itália, Japão, México, Reino Unido, Rússia e Turquia), examinando a relação entre desenvolvimento econômico e consumo de energia. Para isso, desenvolveu-se em R, com o pacote *Benchmarking*, uma Análise Envoltória de Dados (DEA) por meio do modelo *Banker, Charnes e Cooper* (BCC) com análise de janelas, orientado a entrada. Posteriormente, por meio do cálculo da fronteira invertida e dos índices composto e normalizado, obteve-se o índice de Eficiência Energética Total de Fatores (EETF) para cada país. Os resultados indicam que o Reino Unido apresenta os melhores índices de eficiência, seguido pela França e Alemanha. Em contraste, países como China, África do Sul e Argentina apresentaram os menores índices, apontando para a necessidade de revisão de políticas energéticas visando melhorias no uso de recursos. No Brasil, apesar da predominância das energias renováveis, persistem desafios na expansão de tecnologias sustentáveis e no controle do desmatamento, destacando a necessidade de avanços para alcançar padrões mais elevados de eficiência.

Palavras-chave: Eficiência energética. Grupo dos Vinte. Análise Envoltória de Dados. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The global energy landscape presents significant challenges stemming from the reliance on non-renewable resources and their unsustainable use, which exacerbate greenhouse gas (GHG) emissions and jeopardize the sustainability of energy consumption. In response, energy efficiency (EE) has become a priority for economic development, as seen in initiatives like the Paris Agreement and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). This study conducts a comparative analysis of the energy performance of the Group of Twenty (G20) countries (South Africa, Germany, Saudi Arabia, Argentina, Australia, Brazil, Canada, China, South Korea, the United States, France, India, Indonesia, Italy, Japan, Mexico, the United Kingdom, Russia, and Turkey), examining the relationship between economic development and energy consumption. To this end, Data Envelopment Analysis (DEA) was developed in R, using the Benchmarking package, through the Banker, Charnes, and Cooper (BCC) model with window analysis, input-oriented. Subsequently, by calculating the inverted frontier and the composite and normalized indices, the Total Factor Energy Efficiency (TFEE) index for each country was obtained. The results indicate that the United Kingdom shows the highest efficiency indices, followed by France and Germany. In contrast, countries such as China, South Africa, and Argentina exhibited the lowest indices, highlighting the need for a review of energy policies to improve resource use. In Brazil, despite the predominance of renewable energy sources, significant challenges remain in expanding sustainable technologies and controlling deforestation, underscoring the need for progress to achieve higher efficiency standards.

Keywords: Energy efficiency. Group of Twenty. Data Envelopment Analysis. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia primária mundial por fonte nas últimas décadas	23
Figura 2 – Crescimento da população mundial nas últimas décadas	24
Figura 3 – Produção da energia primária mundial nas últimas décadas	24
Figura 4 – Porcentagem de participação das fontes da matriz energética mundial	25
Figura 5 – Os dez principais países produtores de carvão	25
Figura 6 – Os dez principais países produtores de gás natural	26
Figura 7 – Os dez principais países produtores de petróleo	26
Figura 8 – Porcentagem de participação das fontes da matriz energética brasileira	27
Figura 9 – Consumo de energia primária brasileira nas últimas décadas	28
Figura 10 – Consumo final total de energia brasileira por setor em 2022	29
Figura 11 – IE mundial nas últimas décadas	33
Figura 12 – IE brasileira nas últimas décadas	34
Figura 13 – Emissão de CO ₂ mundial por setor nas últimas décadas	38
Figura 14 – Emissões mundiais de GEE por gás nas últimas décadas	39
Figura 15 – Os dez maiores emissores de GEE	41
Figura 16 – Emissões de CO ₂ por setor no Brasil durante as últimas décadas	41
Figura 17 – Emissões de CO ₂ provenientes da mudança de uso da terra e uso da energia no Brasil	42
Figura 18 – Elementos da DMU	45
Figura 19 – Representação da fronteira de eficiência resultante do uso da DEA	49
Figura 20 – Classificação entre ganhos de escala e orientação	52
Figura 21 – Exemplo de fronteira de eficiência modelo BCC	54
Figura 22 – Fluxograma aplicação DEA	61
Figura 23 – Fluxograma algoritmo implementado no software R	68
Figura 24 – Critério para seleção do índice normalizado	69

Figura 25 – Índices de EETF médio até 0.7	74
Figura 26 – Índices de EETF médio acima de 0.7 e menor que 0.85	74
Figura 27 - Índices de EETF médio maior que 0.85	75
Figura 28 – Análise da frequência de palavras-chave da 1ª e 2ª combinação de palavras	114
Figura 29 – Publicações no Scopus da 1ª e 2ª combinação de palavras	115
Figura 30 – Periódicos no Scopus da 1ª e 2ª combinação de palavras	115
Figura 31 – Os dez autores com maior número de publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras	116
Figura 32 – Os dez autores brasileiros com maior número de publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras	116
Figura 33 – Os dez países com maior quantidade de publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras	117
Figura 34 – Áreas de conhecimento com maiores publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação das publicações mais relevantes analisadas	118
Quadro 2 – Ferramentas computacionais DEA	119
Quadro 3 – Resumo dos resultados DEA obtidos na Análise 1	123
Quadro 4 – Resumo dos resultados DEA obtidos na Análise 2	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais modelos DEA	51
Tabela 2 – Classificação EETF do G20 entre os anos de 2000 e 2022	76
Tabela 3 – Comparação entre as Análises 2 e 1	78
Tabela 4 – Análise 1: EETF médio calculado para aos anos entre 2000 e 2010	122
Tabela 5 – Análise 1: EETF médio calculado para aos anos entre 2011 e 2022	122
Tabela 6 – IE em ktep/milhões de USD	124
Tabela 7 – Força de trabalho	125
Tabela 8 – Capital Bruto	126
Tabela 9 – Produto Interno Bruto (PIB)	127
Tabela 10 – Análise 2: EETF médio calculado para aos anos entre 2000 e 2010	128
Tabela 11 – Análise 2: EETF médio calculado para aos anos entre 2011 e 2022	128
Tabela 12 – Emissões totais anuais de CO ₂ incluindo mudanças no uso da terra (medidas em toneladas)	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AED	Análise Envoltória de Dados (Data Envelopment Analysis – DEA)
AT	Ajuste Total
BCC	Banker, Charnes e Cooper
CCE	Circular Carbon Economy
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CEA	Consumo de Energia Alvo
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de carbono
CO_{2e}	Dióxido de carbono equivalente
CRE	Consumo Real de Energia
CRS	Constant Return to Scale
CTEP	Consumo total de energia primária
DMU	Decision Making Unit
Ec	Eficiência clássica
EE	Eficiência energética
EELP	Energy Efficiency Leading Programme
EETF	Eficiência Energética Total de Fatores (Total Factor Energy Efficiency – TFEE)
Einv	Eficiência invertida
F-Gas	Gases fluorados
G20	Grupo dos Vinte
G7	Grupo dos Sete
GEE	Gás de Efeito Estufa
IC	Índice composto

ICmax	Valor máximo para o índice composto
ICmin	Valor mínimo para o índice composto
IE	Intensidade Energética
IN	Índice normalizado
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MME	Ministério de Minas e Energia
N₂O	Óxido nitroso
NDC	Nationally Determined Contribution
OCDE Econômico	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIT	Organização Internacional do Trabalho
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PIB	Produto interno bruto
PL	Programação Linear
SF₆	Hexafluoreto de enxofre
VRS	Variable Return to Scale

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Watt
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
GW	Gigawatt
TW	Terawatt
kWh	Kilowatt por hora
MWh	Megawatt por hora
TWh	Terawatt por hora
J	Joule
kJ	Kilojoule
MJ	Megajoule
TJ	Terajoule
PJ	Petajoule
Mt	Tonelada métrica
bcm	Bilhões de metros cúbicos
°C	Grau celsius
Gt	Gigatonelada
Toe	Tonelada de equivalente de petróleo
Mtoe	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
Wh/\$	Watt-hora por dólar
Kgoe/\$	Quilograma equivalente de petróleo por dólar
US\$	Dólar americano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	15
1.1.1	Objetivos específicos	15
1.2	Justificativa	15
1.2.1	Contribuição do presente estudo	16
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Energia e desenvolvimento	21
2.1.1	Cenário energético global e nacional	22
2.2	Eficiência energética	30
2.2.1	Intensidade energética	31
2.2.2	Índices de EE global e nacional	32
2.3	Emissões de Gases de Efeito Estufa	35
2.3.1	Emissões de CO ₂	37
2.3.2	Índices de emissões global e nacional	37
2.4	Análise Envoltória de Dados	43
2.4.1	Elementos DEA	44
2.4.2	Modelagem	50
2.4.3	Eficiência Energética Total de Fatores	58
3	METODOLOGIA	61
3.1	Seleção das DMUs	62
3.2	Seleção dos fatores	63
3.3	Procedimento para aplicação do método DEA	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Análise 1	71
4.2	Análise 2	76
4.3	Discussão	78
5	CONCLUSÕES	95
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	98
5.2	Publicações realizadas	98

REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A - Análise bibliométrica do tema: energia e eficiência energética	114
APÊNDICE B - As principais ferramentas computacionais do método DEA	119
APÊNDICE C - Resultados complementares: Algoritmo R desenvolvido	121
APÊNDICE D - Resultados complementares: Análise 1	122
APÊNDICE E - Resultados complementares: Análise 2	128

1 INTRODUÇÃO

A energia é a força vital por trás de todos os aspectos da civilização moderna, influenciando a economia, moldando a sociedade, impulsionando a inovação tecnológica e tendo um impacto profundo no meio ambiente (CARVALHO, 2014; HEUBAUM, 2018). Ao longo da história, a humanidade adotou uma postura predominantemente extrativista em relação aos recursos naturais e, conseqüentemente, a preocupação com a preservação ambiental e o declínio dos recursos naturais tem aumentado consideravelmente, ganhando crescente notoriedade à medida que as mudanças climáticas recebem maior reconhecimento dos pesquisadores e da sociedade em geral (SORLIN, 2022; HANACEK *et al.*, 2024).

Anualmente, a demanda por energia para sustentar o desenvolvimento dos países cresce exponencialmente. Paralelamente, observa-se um aumento na concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE), em particular o dióxido de carbono (CO₂), na atmosfera, o que intensifica o efeito estufa e o conseqüente aquecimento global. Sua emissão vem principalmente da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, todos pertencentes a fontes primárias não renováveis (SONG, 2006). Dessa forma, as emissões de CO₂ estão intimamente relacionadas na forma como geramos e consumimos energia. Nesse contexto, o aumento do consumo de energia tornou-se uma preocupação crítica, uma vez que os padrões globais de produção e consumo energético são predominantemente baseados em combustíveis fósseis, resultando em emissões de GEE, poluentes locais, além de ameaçar o suprimento de longo prazo de energia no planeta, devido à natureza não renovável dessas fontes (LUCON, GOLDEMBERG, 2007).

Portanto, como um esforço para promover a construção de uma economia mundial mais eficiente na utilização de recursos, é necessário avaliar e estimar o potencial dos países para economizar energia e reduzir emissões, levando em conta o crescimento econômico. Sendo composto pelas principais economias do mundo, o Grupo dos Vinte (G20), que representa cerca de 85% do Produto Interno Bruto (PIB) global e mais de 75% do comércio internacional, desempenha um papel fundamental para promover a construção de uma economia mundial mais eficiente e na promoção da eficiência energética global (DFAT, 2023). Segundo *Climate and Clean air Coalition* (CCC) (2016) a iniciativa com a implementação do *G20 Energy Efficiency Leading Programme* (EELP) é um exemplo ao estabelecer o objetivo de melhorar a eficiência

energética (EE) global em setores prioritários. Mais recentemente, buscando promover uma abordagem de “economia circular” para o carbono, onde o CO₂ emitido seja reduzido, foi lançado o *Circular Carbon Economy* (CCE) em 2020. Essas iniciativas demonstram o compromisso e relevância do G20 em abordar questões energéticas e climáticas por meio de medidas concretas, regulamentos nacionais e internacional (ALSARHAN *et al.*, 2021).

Dentro desse contexto, na busca por uma análise mais abrangente, diferentes abordagens para a mensuração do desempenho em EE têm sido discutidas na literatura. Estudos acadêmicos destacam a importância de metodologias diversificadas que permitam uma avaliação holística das práticas de EE, considerando fatores como indicadores de desempenho e contextos setoriais variados. Tradicionalmente, há dois conhecidos indicadores utilizados para mensurar como insumos energéticos são utilizados de forma eficiente: a Intensidade Energética (IE), que mede a quantidade de energia para cada produto econômico, sendo uma das mais utilizadas, e o outro é a produtividade energética, definida como produção econômica, dividido pela entrada de energia (SCHURR, 1982; CHIU, CHANG, HU, 2022). Cada um destes indicadores representa medidas idênticas a partir de perspectivas diferentes. No entanto, ambas têm limitações que levaram ao desenvolvimento de outras abordagens e métricas mais sofisticadas para capturar nuances e influências setoriais e regionais (SCHURR, 1982; CHIU, CHANG, HU, 2022).

A Análise por Envoltória de Dados (AED, do inglês *Data Envelopment Analysis* – DEA) é uma abordagem que tem sido amplamente aplicada para avaliar o desempenho comparativo da EE entre diferentes entidades (BOYD, PANG, 2000; RAMANATHAN, 2000; ONUT, SONER, 2006; HU, WANG, 2006; HU, KAO, 2007; AZADEH *et al.*, 2007; LEE, 2008; ZHOU, ANG, 2008; ZHOU, ANG, POH, 2008; ZHANG *et al.*, 2011; SOUZA, 2012; CAMIOTO, REBELATTO, ROCHA, 2016), entre outros. Esses estudos analisam a EE a partir de uma perspectiva que considera o processo produtivo como uma produção conjunta, em que múltiplos insumos, incluindo energia, são utilizados para a geração de múltiplos resultados.

Um dos avanços significativos que a DEA oferece em comparação com indicadores tradicionais, como a IE, é sua capacidade de calcular o índice de Eficiência Energética Total de Fatores (EETF). Este índice reflete a eficiência global de um sistema produtivo, levando em conta não apenas a energia, mas todos os

fatores de produção envolvidos, transformando a DEA em uma ferramenta para identificar melhores práticas e comparar o desempenho entre diferentes entidades.

Dado o contexto apresentado, este estudo realiza uma análise comparativa do desempenho energético dos países do G20, com destaque para os resultados do Brasil. Para tanto, foi utilizada a metodologia DEA, empregando um modelo *Banker, Charnes e Cooper* (BCC) orientado a entrada com análise de janelas. Em seguida, foram calculados o índice da EETF para cada país, a partir da fronteira invertida e dos índices composto e normalizado.

5.3 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa do desempenho energético dos países que compõem o G20, apresentando uma visão detalhada sobre os países que se destacam dentro do grupo no período de 2000 a 2022. Essa análise busca identificar não apenas os líderes em eficiência energética, mas também as tendências e padrões que emergem ao longo desse intervalo.

5.3.3 Objetivos específicos

- Investigar a problemática relacionada à demanda e ao consumo de energia, bem como as implicações para a EE, visando entender os fatores que influenciam essas variáveis;
- Calcular o índice de EETF para cada país durante o período analisado, utilizando a DEA como ferramenta metodológica para obter resultados precisos e comparáveis;
- Avaliar a posição do Brasil em relação aos demais países do G20, identificando seus pontos fortes e fracos em termos de desempenho energético e propondo recomendações para aprimorar sua eficiência energética no contexto global.

1.2 Justificativa

A sustentabilidade energética é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos, como a escassez de recursos naturais, a demanda de energia e as elevadas emissões de GEE. Nesse contexto, a EE contribui para a redução do

consumo de energia e, conseqüentemente, para a mitigação dos impactos ambientais. As preocupações relacionadas à saúde pública e às mudanças climáticas estão diretamente ligadas ao aumento das emissões de GEE, que resultam do uso intensivo de energia. Diante dessas questões, diversos estudos têm se concentrado na análise da EE, buscando compreender como novas metodologias, tecnologias e políticas energéticas podem auxiliar na redução das emissões de GEE e na promoção de um futuro energético mais sustentável.

1.2.1 Contribuição do presente estudo

A contribuição deste trabalho reside na realização de uma análise comparativa do desempenho energético dos países que compõem o G20. A escolha do G20 fundamenta-se na importância desses países para a economia internacional e na sua influência no cenário energético global, permitindo também a discussão de temas essenciais para o desenvolvimento socioeconômico, como a EE e a sustentabilidade.

A metodologia adotada neste estudo contempla a aplicação do índice de EETF, complementada pela implementação do índice normalizado. Essa abordagem permite uma avaliação mais aprofundada e consistente da EE dos países analisados, relacionando-a com seu desenvolvimento econômico e os desafios associados à sustentabilidade energética. Com isso, o presente trabalho visa não apenas fornecer um panorama do desempenho energético, mas também estabelecer uma base para discussões sobre políticas e práticas que promovam avanços em eficiência e sustentabilidade em escala global.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, que por sua vez estão subdivididos em seções que abordam os temas pertinentes para dar sustentação teórica à pesquisa. Além destes capítulos, foram incluídos apêndices com informações complementares.

O primeiro capítulo consiste nesta introdução; o segundo apresenta uma revisão da literatura, com a exposição dos fundamentos pertinentes ao tema do trabalho; o terceiro apresenta a metodologia aplicada; o quarto descreve uma análise comparativa entre os países do G20, relacionando as diferenças de desempenho

energético por seus contextos econômicos e políticas energéticas; e o último apresenta as conclusões e também algumas sugestões de trabalhos futuros, bem como as publicações resultantes do atual trabalho. No Apêndice A, é apresentado um estudo teórico que contextualiza os temas de energia, EE e DEA, por meio de uma análise bibliométrica. Já o Apêndice B aborda as principais ferramentas computacionais empregadas no método DEA. O Apêndice C contém dados complementares sobre o algoritmo desenvolvido em R. Por fim, o Apêndice D apresenta informações adicionais relacionadas aos resultados obtidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda os fundamentos teóricos pertinentes ao tema em análise e examina uma seleção de estudos correlatos que estão alinhados com a metodologia utilizada neste trabalho. Além disso, o Apêndice A apresenta uma análise desenvolvida por meio de técnicas bibliométricas, com o intuito de rastrear a evolução do estudo da EE ao longo do tempo. Essa análise busca identificar os tópicos mais intimamente relacionados à EE e avaliar a intensidade relacional do estudo da DEA dentro desse contexto. Os resultados obtidos indicam que, ao longo dos anos examinados, a maioria dos pesquisadores concentrou seus esforços na investigação das relações de causalidade entre o consumo de energia e o PIB, revelando um foco significativo nas implicações do desenvolvimento econômico sobre o consumo energético, destacando a interdependência entre esses dois fenômenos e a importância de entender como o crescimento econômico influencia as demandas energéticas. Essa análise oferece uma base sólida para discutir as tendências atuais e futuras da EE em relação ao desenvolvimento socioeconômico.

É pertinente, inicialmente, apresentar uma visão abrangente sobre as discussões e os avanços recentes no campo da EE, bem como sua relação com o desenvolvimento econômico e as emissões de GEE. Essa revisão tem o propósito de contextualizar as abordagens teóricas e empíricas adotadas por diversos autores, destacando os principais resultados alcançados e as lacunas ainda presentes na literatura.

Amano (1990) analisa as condições do mercado mundial de petróleo, destacando que o aumento do consumo global permitirá uma elevação nos preços do petróleo substancialmente. Visando adiar esse aumento de preços, seria necessário um crescimento econômico lento mundial ou esforços intensivos de conservação de energia. Além disso, o trabalho discute um modelo de consumo de energia/emissão de CO₂, sugerindo que os preços reais crescentes da energia e avanços em tecnologias de economia de energia podem estabilizar as emissões nos países desenvolvidos. Para reduzir as emissões, propõe-se um imposto sobre combustíveis fósseis e esforços mais intensivos de economia de energia nos países desenvolvidos, destacando a necessidade de uma abordagem global para enfrentar o problema das emissões excessivas de CO₂.

Reddy (1991) aborda o interesse nas melhorias da EE devido ao reconhecimento do potencial economia de energia. Identificou-se os diferentes atores envolvidos na implementação dessas melhorias e as barreiras que enfrentam, desde os consumidores de energia até as agências financeiras globais. Com os resultados alcançados, conclui-se que quatro fatores são facilitadores na disseminação das melhorias na EE: o uso de combinações de medidas para superar as dificuldades relacionadas, a implementação de políticas energéticas e a promoção das inovações tecnológicas.

Dincer (1998) traz o papel do consumo de energia no contexto da poluição, deterioração ambiental e emissões de GEE. Destaca-se que o aumento do consumo de energia é impulsionado pelo crescimento populacional e desenvolvimento econômico, gerando preocupações ambientais. Introduce e discute quatro aspectos importantes relacionados aos padrões presentes e futuros: impactos ambientais, consumo de energia, conservação de energia e substituição de combustíveis. Com os resultados, conclui-se que são necessárias mudanças políticas, econômicas e institucionais para orientar as futuras políticas energéticas, e destaca-se o papel da EE no controle e redução dos impactos ambientais.

Rosen (1999) discute a relação entre energia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável, enfatizando a importância de descobrir recursos energéticos sustentáveis e aumentar a EE. Observações significativas destacam a necessidade de ações robustas para reduzir as emissões GEE, a capacidade das indústrias de energia de se adaptarem a mudanças quando adequadamente incentivadas, a importância da EE na matriz energética e a necessidade de instrumentos regulatórios, como impostos sobre carbono, para mitigar as emissões. Assim, destaca-se a importância das políticas energéticas e intervenções governamentais diretas em setores, nos quais os consumidores não priorizam a eficiência e o impacto ambiental.

Geller *et al* (2006) destaca a importância da melhoria da EE no equilíbrio energético global ao longo das últimas três décadas nas nações da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Sem essas melhorias, essas nações teriam usado significativamente mais energia. É revisado as tendências de IE desde 1973, examinando quanto da redução geral na IE foi devido à melhoria da EE e quanto foi devido a mudanças estruturais. Assim, foram analisadas as políticas energéticas e programas de EE no Japão, Estados Unidos, Europa Ocidental e

Califórnia, demonstrando que políticas bem elaboradas podem resultar em economias substanciais de energia em vários setores.

Allcott, Mullainathan (2010) aborda o investimento significativo de muitos países em pesquisa e desenvolvimento (P&D) de tecnologias energeticamente eficientes. Argumenta-se que a EE não depende apenas dessas tecnologias, mas também das escolhas dos usuários. No entanto, as políticas energéticas muitas vezes visam influenciar essas escolhas por meio de mudanças de preço e divulgação de informações. Com isso, destaca-se a necessidade de incorporar os aspectos comportamentais na elaboração de políticas de EE.

Wang *et al* (2011) analisam as relações entre as emissões de CO₂, o consumo de energia e o crescimento econômico na China de 1995 a 2007. Os resultados mostram que esses três fatores estão relacionados, havendo uma ligação bidirecional entre as emissões de CO₂ e o consumo de energia, bem como entre o consumo de energia e o crescimento econômico. Além disso, os resultados obtidos trazem o consumo de energia e o crescimento econômico como as principais causas de longo prazo das emissões de CO₂, enquanto as emissões de CO₂ também influenciam o consumo de energia e o crescimento econômico.

Cai *et al* (2018) investigam a relação entre consumo de energia limpa, crescimento econômico e emissões de CO₂ nos países do Grupo dos Sete (G7). Com os resultados obtidos foram identificados casos em que o consumo de energia limpa influencia o crescimento econômico e as emissões de CO₂, e vice-versa. Reforçando assim, a importância de estratégias sustentáveis para reduzir as emissões de CO₂.

Dong *et al* (2020) tratam do aumento das emissões de CO₂ causadas pela atividade humana e da necessidade de entender os fatores por trás desse aumento para desenvolver políticas públicas eficazes de controle. Os resultados revelam que o crescimento econômico é o principal impulsionador das emissões de CO₂, seguido pelo crescimento populacional, especialmente em países de baixa renda. A análise destaca a importância da implementação de medidas para reduzir a IE e promover energias limpas e renováveis, e que sem tais medidas as emissões teriam sido ainda maiores.

Li *et al* (2022) destaca a importância da aprendizagem a longo prazo com experiências internacionais para alcançar metas de mitigação climática e aumentar o uso de energia renovável. Observa-se o crescimento da energia renovável na União Europeia e em outras grandes economias, além do rápido desenvolvimento

tecnológico nessa área. Enfatiza-se a necessidade de políticas energéticas adaptadas às características de cada país. Dessa forma, é destacada a importância de melhorar a EE, orientar políticas para a energia renovável e promover a flexibilidade da demanda de energia.

A análise sobre EE e seu papel no desenvolvimento econômico aponta que, apesar de avanços significativos na implementação de políticas energéticas, o progresso rumo a uma maior eficiência depende da integração entre o crescimento econômico e inovações. Dando continuidade a essa discussão, a próxima seção explora a relação entre energia e desenvolvimento, enfatizando que, para promover uma economia sustentável, é imprescindível atender às crescentes demandas industriais e populacionais, assegurando, ao mesmo tempo, a preservação ambiental. São também identificados os principais desafios a serem superados nesse processo, como a diversificação das fontes de energia e a otimização do uso dos recursos energéticos.

2.1 Energia e desenvolvimento

No mundo contemporâneo, o acesso a fontes confiáveis e sustentáveis de energia é um pré-requisito fundamental para o crescimento econômico, social e ambiental das nações (ROSEN, 2021). Países que conseguem desenvolver e manter sistemas energéticos bem estruturados e confiáveis, com diversidade de fontes, capacidade adequada de geração e distribuição, e resiliência a interrupções, tendem a prosperar mais do que aqueles que enfrentam dificuldades em estabelecer essa infraestrutura (NEJAT *et al*, 2015). No entanto, os desafios no caminho para um desenvolvimento energético sustentável são significativos. Questões como acesso desigual à energia, dependência de combustíveis fósseis e infraestruturas inadequadas representam obstáculos que precisam ser superados.

A complexa rede de desafios relacionados à energia não apenas molda os rumos da sociedade moderna, mas também influencia diretamente a economia e exerce um impacto profundo sobre o meio ambiente (ZAKARI, ADEDOYIN, BEKUN, 2021).

Entre os diversos desafios enfrentados no cenário energético global, há uma forte dependência de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, especialmente em regiões como a Ásia-Pacífico, onde países como China e Índia

continuam a expandir sua utilização para atender à crescente demanda energética (NEJAT *et al*, 2015). Segundo Goldemberg (2015), considerando que a matriz energética mundial é fortemente baseada em combustíveis fósseis, os seguintes problemas surgem:

- Disponibilidade: as reservas de combustíveis fósseis são finitas, tornando seu declínio gradual um processo previsível e inevitável;
- Disputas geopolíticas: vários conflitos no mundo estão relacionados à distribuição não homogênea das principais fontes de energia;
- Degradação da saúde e do meio ambiente: devido à grande emissão de gases, problemas como a geração de poluição atmosférica, ocorrência de chuva ácida e contribuições para o aquecimento global têm ocorrido.

Em outro estudo, IEA (2021) apresenta o consumo de energia em vários países e aponta que há uma necessidade de fazer um balanço desse consumo para reduzir a pobreza em escala global e atender aos limites de sustentabilidade e impactos ambientais.

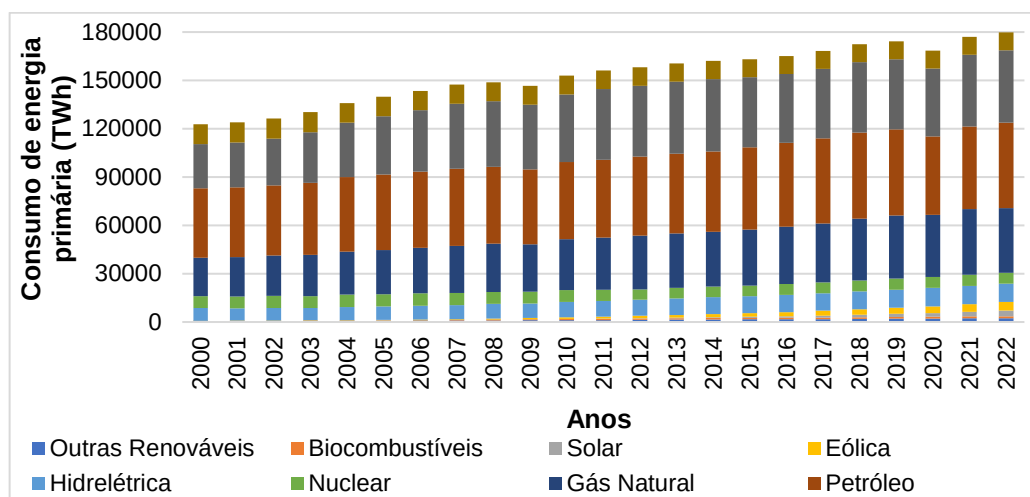
2.1.1 Cenário energético internacional e nacional

O cenário energético internacional atual é marcado por uma série de desafios e tendências que moldam a forma como o mundo produz, distribui e consome energia. Desde a crescente demanda por energia até as preocupações com a sustentabilidade e a transição para fontes renováveis, várias questões estão influenciando o panorama global de energia (KABEYI, OLANREWAJU, 2021).

O crescimento econômico está diretamente ligado ao aumento do consumo de energia, visto que à medida que as economias crescem, há uma maior demanda por energia para alimentar as indústrias, o comércio, os serviços e a infraestrutura (ZHANG, REN, 2011). A Figura 1 traz o consumo primário de energia mundial nas últimas décadas, o qual tem sido caracterizado por um crescimento significativo. Esse crescente aumento do consumo de energia global observado pode ser atribuído a diversos fatores inter-relacionados, como o crescimento econômico, especialmente nos países em desenvolvimento, que ampliam seu consumo à medida que buscam atingir padrões de vida mais elevados. Além disso, a rápida urbanização desempenha um papel crucial, pois intensifica a demanda por energia nas áreas urbanas, impulsionada pela expansão da infraestrutura essencial, como sistemas de transporte,

redes elétricas, construção de edifícios, além de serviços públicos como abastecimento de água, esgoto e telecomunicações.

Figura 1 – Consumo de energia primária mundial por fonte nas últimas décadas



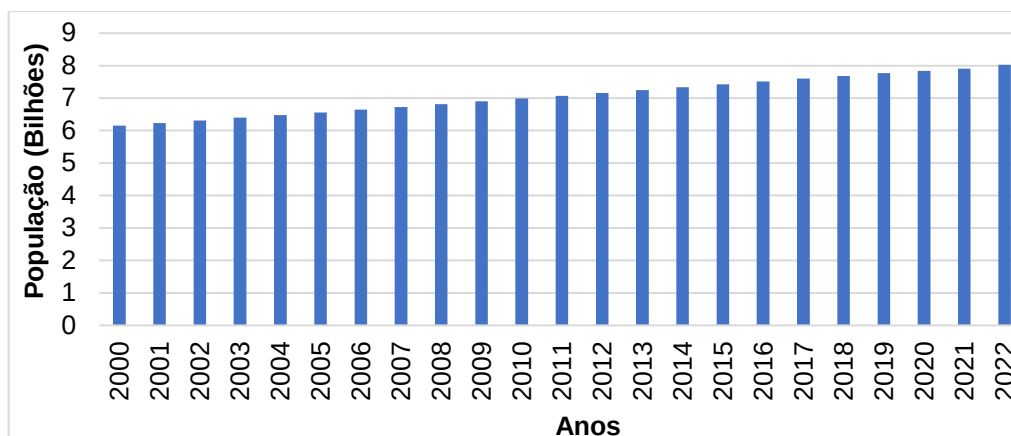
Fonte: Dados adaptados de ENERGY INSTITUTE (2023)

Dessa forma, o progresso tecnológico e a industrialização têm promovido um aumento significativo no consumo de energia (JIN, DUAN, SHI, JU, 2017). As indústrias contemporâneas são intrinsecamente dependentes de energia para a operação de máquinas, equipamentos e processos produtivos. Além disso, o desenvolvimento de infraestrutura que abrange estradas, pontes, edifícios, sistemas de transporte e redes elétricas demandam grandes quantidades de energia, tanto para a construção quanto para a operação e manutenção contínua dessas estruturas. Essa interdependência ressalta a importância da energia no crescimento econômico e no progresso da sociedade moderna.

O acelerado processo de urbanização que o mundo enfrenta, caracterizado pelo crescente deslocamento de populações das áreas rurais para os centros urbanos, constitui um dos fatores inter-relacionados que contribuem para o aumento do consumo de energia (SELOD, SHILPI, 2021). Essa migração não apenas altera a dinâmica demográfica, mas também intensifica a demanda por energia nas áreas urbanas, à medida que a infraestrutura e os serviços necessitam de maiores quantidades de energia para atender às necessidades da população.

A Figura 2 mostra o crescimento populacional global nas últimas décadas, que tem sido notório, e também se mostra como um grande contribuinte para o aumento do consumo de energia.

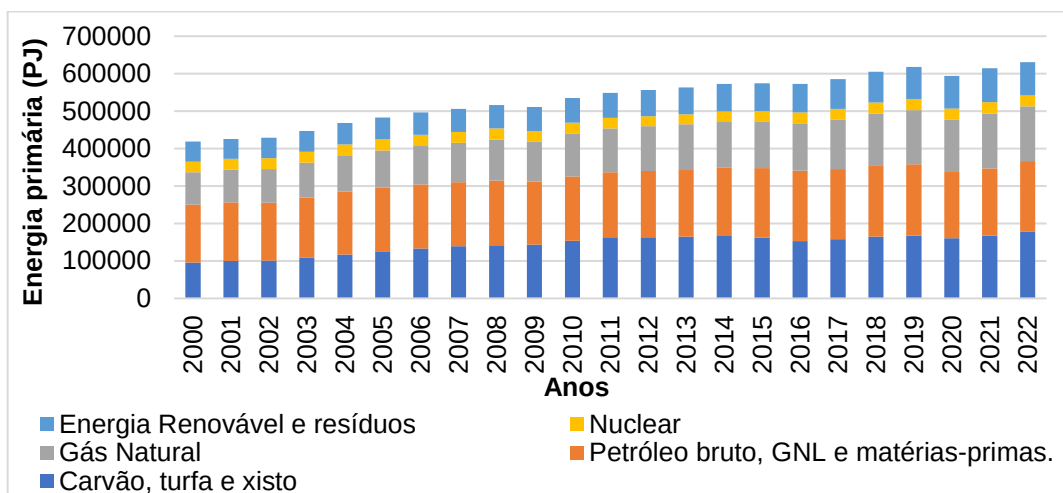
Figura 2 – Crescimento da população mundial nas últimas décadas



Fonte: Dados adaptados de WORLD BANK (2023)

A população mundial, que se aproxima dos 8 bilhões, e continua a crescer, coloca uma pressão adicional sobre os recursos energéticos do planeta. Com mais pessoas no mundo, há uma demanda crescente de geração por parte das fontes de energia primárias. A Figura 3 traz a produção das principais fontes de energia no mundo nas últimas décadas. Embora a produção de energia primária sofra pequenas variações por ano, apresenta um crescimento notório.

Figura 3 – Produção da energia primária mundial nas últimas décadas

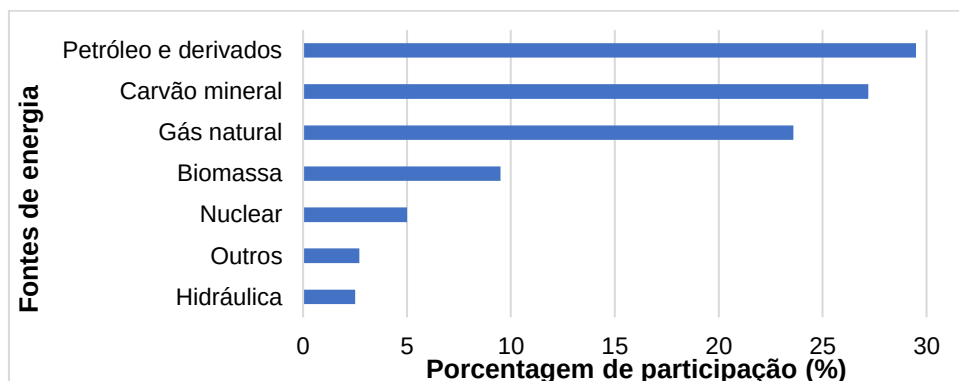


Fonte: Dados adaptados de ENERDATA (2024)

As principais fontes de energia primárias variam dependendo da região e das políticas energéticas de cada país, porém as principais fontes de energia mundiais são o petróleo, o carvão e o gás natural. A Figura 4 evidencia a participação dessas

fontes, trazendo a porcentagem de participação das principais fontes de energia da matriz energética mundial de 2022.

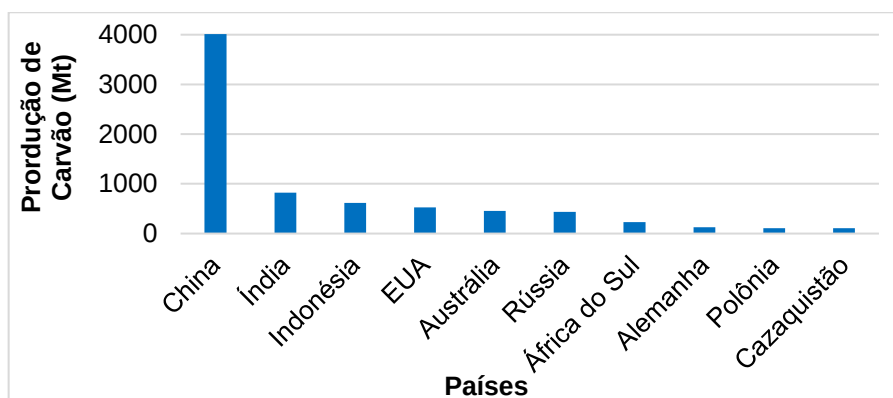
Figura 4 – Porcentagem de participação das fontes da matriz energética mundial



Fonte: Dados adaptados de IEA (2023)

Percebe-se que a produção de energia a partir do carvão, do petróleo e do gás natural desempenha um papel fundamental no suprimento energético global, onde juntas representam cerca de 80% da matriz energética mundial. No entanto, é importante considerar não apenas a importância dessas fontes de energia, mas também os desafios enfrentados à medida que sua demanda continua a crescer. As Figuras 5 e 6 trazem mais informações sobre a produção de carvão, gás, e as reservas disponíveis nos dez principais países produtores do mundo em 2022.

Figura 5 – Os dez principais países produtores de carvão

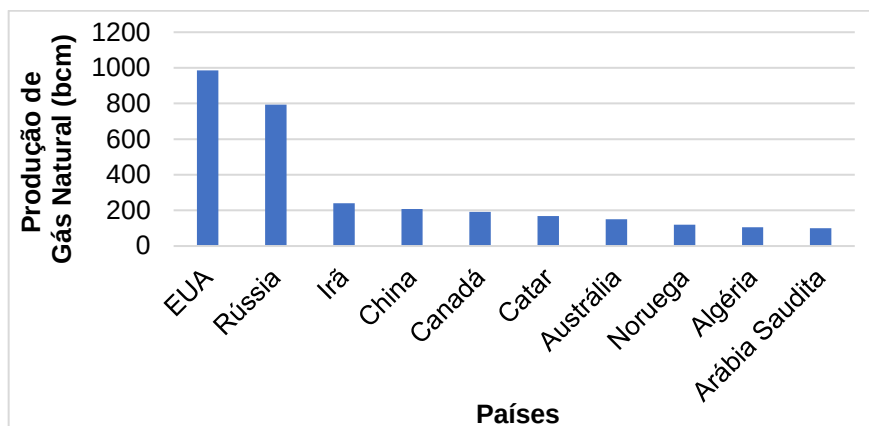


Fonte: Dados adaptados de BP (2022)

Com a taxa de extração recorrente e considerando que não serão disponibilizados mais recursos, o que depende das políticas dos governos, da tecnologia disponível e da lucratividade da mineração, estima-se que as reservas

mundiais de carvão serão esgotadas até o ano de 2130, com o pico da mineração ocorrendo entre 2028 e 2040 (BP, 2022).

Figura 6 – Os dez principais países produtores de gás natural

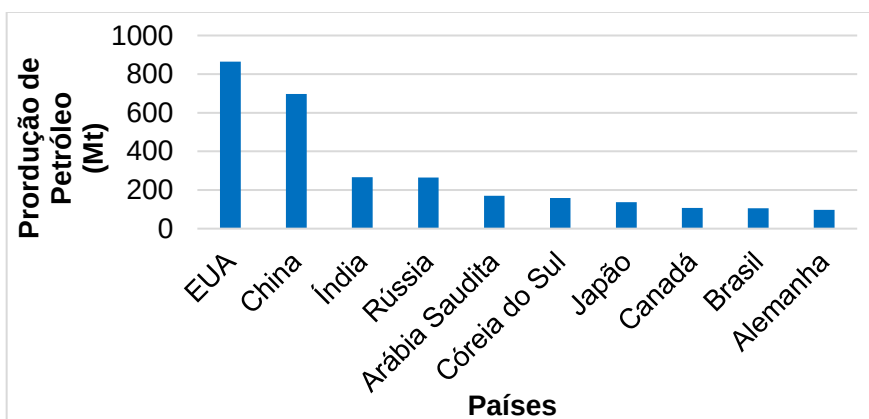


Fonte: Dados adaptados de BP (2022)

Conforme discutido em BP (2022), o gás natural mundial seria esgotado até 2067. Como 38% da eletricidade nos EUA vem do gás, o esgotamento futuro das reservas de gás forçará a economia americana a mudar para o carvão, seguindo o atual cenário do governo chinês, ou a investir rapidamente em fontes renováveis ou até mesmo em usinas nucleares. Isso demonstra o quanto a situação energética de um país depende de uma política energética de longo prazo.

O petróleo, semelhante ao gás natural, de acordo com BP (2022) é estimado durar até 2064. A Figura 7 traz a produção de petróleo nos dez principais países produtores do mundo em 2021.

Figura 7 – Os dez principais países produtores de petróleo

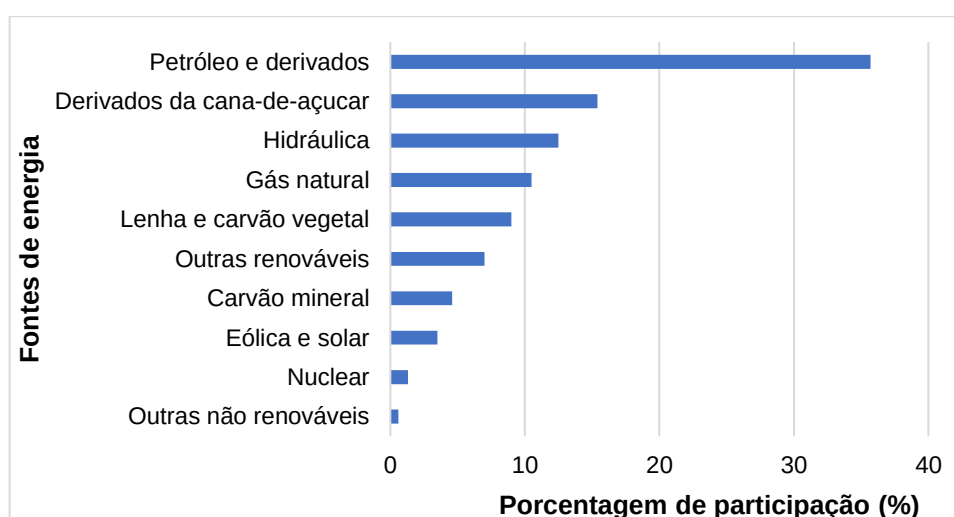


Fonte: Dados adaptados de BP (2022)

Analisando a Figura 7, é perceptível os Estados Unidos e a China estão explorando mais intensamente suas reservas de petróleo. No entanto, a China já importa a maioria de seu petróleo e, dessa forma, está a caminho de se tornar um país importador de petróleo (ZHANG *et al.*, 2023). Embora o Brasil importe uma quantidade significativa de petróleo para complementar sua produção doméstica e atender a demanda interna, a produção geralmente supera as importações (MME, 2024). Dessa forma, alternativas sustentáveis são necessárias para se evitar a escassez e a instabilidade ambiental e econômica. Algumas das alternativas incluem o investimento em energias renováveis, bem como avanços em tecnologias de armazenamento de energia e EE, assim, diminuindo expressivamente o consumo do petróleo para fins energéticos (GIELEN *et al.*, 2019; SONG, 2006).

O cenário energético nacional atual também reflete uma crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade, impulsionada por preocupações ambientais e econômicas. O país possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, com destaque para a energia hidrelétrica, que historicamente desempenha um papel significativo na geração de eletricidade. A Figura 8 traz a porcentagem de participação das principais fontes de energia da matriz energética brasileira de 2022.

Figura 8 – Porcentagem de participação das fontes da matriz energética brasileira



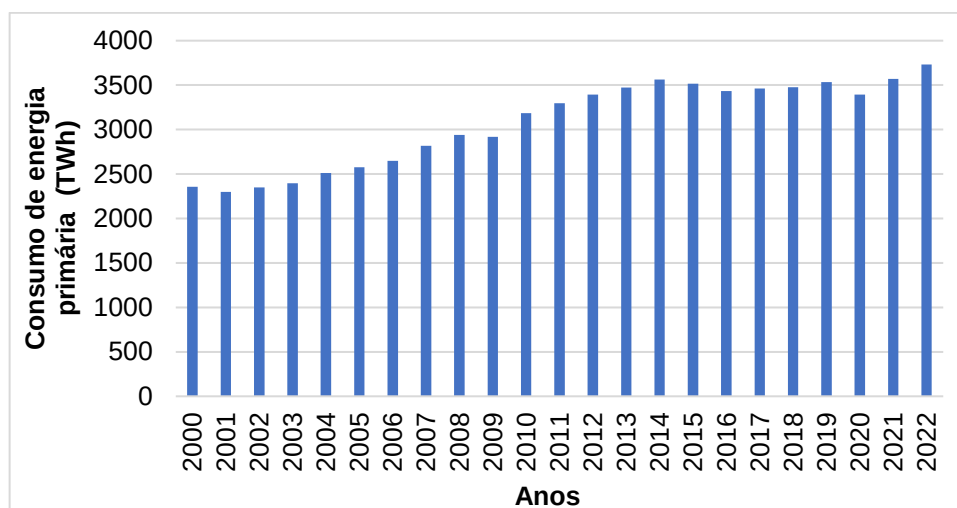
Fonte: Dados adaptados de EPE (2023)

Percebe-se que o Brasil também tem explorado outras fontes renováveis, como a energia eólica e solar, que têm ganhado espaço nos últimos anos. Contudo, o país

enfrenta desafios relacionados à segurança energética e à diversificação da matriz, buscando reduzir a dependência de fontes específicas. Estes incluem a necessidade de garantir a segurança energética, assegurando que a oferta de energia seja estável e confiável, especialmente diante da intermitência dessas fontes. Além disso, há uma busca por diversificação da matriz energética para reduzir a dependência de fontes específicas, como as hidrelétricas, o que implica em integrar novas tecnologias e infraestrutura. A implementação de políticas públicas eficazes e a obtenção de financiamento adequado para projetos de energia renovável são essenciais para viabilizar essa transição energética. Dessa forma, a transição para um sistema energético mais sustentável requer uma abordagem integrada e colaborativa entre governo, setor privado e sociedade.

Diferentemente da tendência do aumento do consumo mundial de energia, o consumo energético do Brasil nos anos recentes, a partir de 2014, tem sido caracterizado por uma variação pouco significativa. A Figura 9 traz o consumo de energia primária do Brasil nas últimas décadas, na qual nota-se uma aparente estagnação do consumo de energia primária nos anos recentes.

Figura 9 – Consumo de energia primária brasileira nas últimas décadas



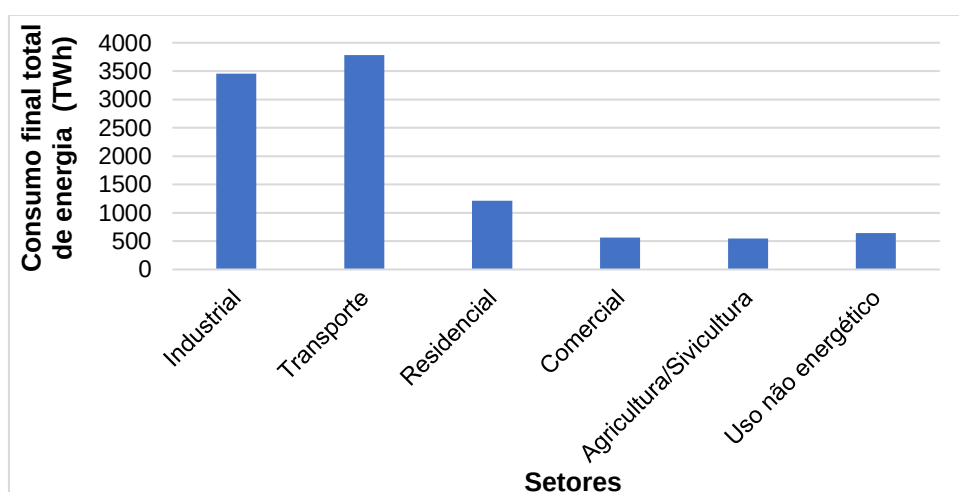
Fonte: Dados adaptados de ENERGY INSTITUTE (2023); EIA (2023)

Essa oscilação pode ser vista tanto como algo positivo quanto negativo, dependendo do contexto e das razões por trás dessa possível estagnação. Sob uma ótica positiva, a estagnação pode refletir avanços significativos em EE com o país conseguindo utilizar sua energia de forma mais eficiente. Além disso, se a estagnação

ocorrer em meio a um aumento no uso de fontes de energia renovável, isso pode ser visto como um passo positivo em direção à diversificação da matriz energética e à redução da dependência de fontes não renováveis e poluentes. Por outro lado, sob uma perspectiva negativa, a estagnação no consumo de energia pode ser um sinal de desaceleração econômica, uma vez que a demanda por energia não está aumentando, o que poderia ter consequências adversas para o emprego e o crescimento econômico.

O Brasil possui uma economia onde cada setor tem necessidades específicas de energia, que inclui setores como agricultura, indústria, serviços, entre outros, resultando em uma distribuição heterogênea do consumo. A Figura 10 apresenta essa distribuição peculiar do consumo total final de energia brasileiro entre os diferentes setores no ano de 2022.

Figura 10 – Consumo final total de energia brasileira por setor em 2022



Fonte: Dados adaptados de IEA (2021)

Ao analisar o perfil do consumo final total de energia no Brasil, observa-se que os setores industrial e de transporte destacam-se como os principais responsáveis por esse consumo, refletindo a IE e a demandada para a produção e mobilidade no contexto brasileiro. O setor industrial brasileiro, com sua base amplamente diversificada, é historicamente um dos principais consumidores de energia do país, abrangendo atividades que vão desde a produção de alimentos até a manufatura de produtos tecnológicos (IEA, 2021; EIA, 2023b). A IE da indústria brasileira se reflete na elevada demanda por eletricidade e combustíveis, essenciais para manter os processos produtivos em funcionamento (IEA, 2021; EIA, 2023b). Por outro lado, o

setor de transporte destaca-se como o maior consumidor de energia, impulsionado pelo uso predominante de combustíveis fósseis como a gasolina, o diesel e biocombustíveis, especialmente etanol (IEA, 2021; EIA, 2023b). Esse consumo energético se distribui entre veículos de passeio, transporte de carga e transporte público, como ônibus e aviação (CACHOLA et al., 2023).

A distribuição do consumo final de energia entre esses setores resulta de uma combinação de fatores econômicos, geográficos e sociais. A dimensão territorial do Brasil, aliada ao papel central da logística de transporte e ao crescimento industrial, demanda uma abordagem estratégica. Assim, o desenvolvimento de políticas energéticas deve considerar esses fatores para promover uma matriz mais eficiente e sustentável, assegurando o suprimento e a segurança energética em um cenário de longo prazo.

2.2 Eficiência energética

A eficiência energética (EE) representa a relação entre a energia útil produzida e a energia consumida em processos de conversão, constituindo uma métrica fundamental para avaliar a capacidade de sistemas, dispositivos ou processos de minimizar perdas e maximizar o aproveitamento energético (MARTINEZ, WAGNER, EBENHACK, 2019). Aplicada amplamente, a EE é essencial na adoção de tecnologias avançadas nos setores industrial e residencial, visando uma conversão energética mais limpa e sustentável, enquanto minimiza conversões indesejadas, como dissipação de calor ou outras formas de desperdício energético. Contudo, a EE não se limita ao aprimoramento tecnológico, mas também abrange o desenvolvimento de práticas e políticas voltadas para o uso responsável e consciente da energia em diversos setores da sociedade (COSTA, ANDRADE, 2021).

Com o intuito de impulsionar a EE, organizações intergovernamentais, bem como os poderes governamentais e órgãos reguladores do setor elétrico endossam uma variedade de práticas, que buscam por ganhos técnicos, econômicos, sociais e ambientais (COSTA, ANDRADE, 2021; BARKI, et al 2020; MOMETE, 2018). Essas práticas abordam desde a padronização de procedimentos até a promoção de mudança nos padrões de comportamento da sociedade. Isso engloba ainda o fomento a investimentos tanto de ordem pública quanto privada e a implementação de avanços técnicos em dispositivos e processos. Essas diligências almejam assegurar que a

eletricidade continue a subsistir como um pilar essencial para o desenvolvimento sustentável e econômico, ao mesmo tempo em que se empenha em minimizar as consequências adversas para a sociedade e o meio ambiente.

Um dos principais ganhos está relacionado à redução dos custos de produção. Adotando metodologias e práticas mais eficientes no uso de energia, as empresas diminuem as despesas com insumos energéticos, aumentando a competitividade no mercado financeiro (BANDARRA, VALDEZ, PEREIRA, 2016; BARKI, *et al* 2020). Essa busca também contribui para a criação de empregos e o desenvolvimento de novas oportunidades de negócio (MOMETE, 2018). Os benefícios sociais também são significativos, possibilitando uma melhoria na qualidade de vida da população, uma vez que a utilização mais eficiente da energia promove o acesso a serviços essenciais, como iluminação, transporte e refrigeração, de forma mais acessível e sustentável. A promoção da EE também contribui para a redução da vulnerabilidade energética, tornando as comunidades menos dependentes de fontes de energia externas e mais resilientes a choques e crises energéticas (MARTINEZ, EBENHACK, WAGNER, 2019).

A redução dos custos de produção, a criação de empregos, a mitigação das mudanças climáticas e a melhoria da qualidade de vida são apenas alguns dos benefícios que podem ser alcançados por meio de práticas mais eficientes no uso da energia. Porém, a busca por eficiência envolve também a regulamentação, educação e a conscientização, incentivando indivíduos, empresas e governos a adotar práticas mais sustentáveis.

2.2.1 Intensidade energética

A intensidade energética (IE) é uma métrica que relaciona a quantidade de energia consumida com a produção de uma determinada atividade econômica, como o PIB, área construída ou volume de produção industrial, destacando-se como uma medida crítica de eficiência em diferentes setores (LIU, ANG, 2007; MENEGAKI, TSANI, 2018). Reduzir a IE é essencial para entender e aplicar conceitos e indicadores que possam quantificar a EE em setores econômicos variados, promovendo práticas de consumo mais sustentáveis (MENEGAKI, TSANI, 2018).

Existem diferentes indicadores que permitem avaliar a IE em distintos setores da economia. Por exemplo, o consumo de energia por unidade de produção pode ser

utilizado para medir a IE industrial, enquanto no setor de construção, a IE pode ser quantificada com base no consumo de energia por metro quadrado de área, oferecendo uma visão clara sobre a eficiência de edificações e a gestão de energia durante a operação e manutenção. Esses indicadores fornecem uma visão clara do consumo de energia em relação à atividade econômica, permitindo identificar oportunidades de melhoria e estabelecer metas de EE (COSTA, ANDRADE, 2021).

Quando aplicada a nações, a IE é geralmente calculada como:

$$IE = \frac{CTEP}{PIB} , \quad (1)$$

sendo:

IE a intensidade energética

CTEP o consumo total de energia primária;

PIB o produto interno bruto.

Um cenário ideal é aquele que relaciona o avanço do crescimento econômico com uma estabilidade ou redução da energia total requerida. Por isso, a IE é um indicador valioso para avaliar a relação entre o consumo de energia e o crescimento econômico, tanto em nível nacional quanto em setores específicos, como a indústria.

Ao relacionar o crescimento econômico com uma estabilidade ou redução na quantidade de energia, significa que a economia está produzindo mais riqueza ao mesmo tempo que mantém ou reduz seu consumo energético (YORK, KUSHLER, 2005). Isso é essencialmente o conceito de EE, ao produzir mais com menos. Assim, a IE é frequentemente usada como uma medida de EE em estudos acadêmicos (PROSKURYAKOVA, KOVALEV, 2015).

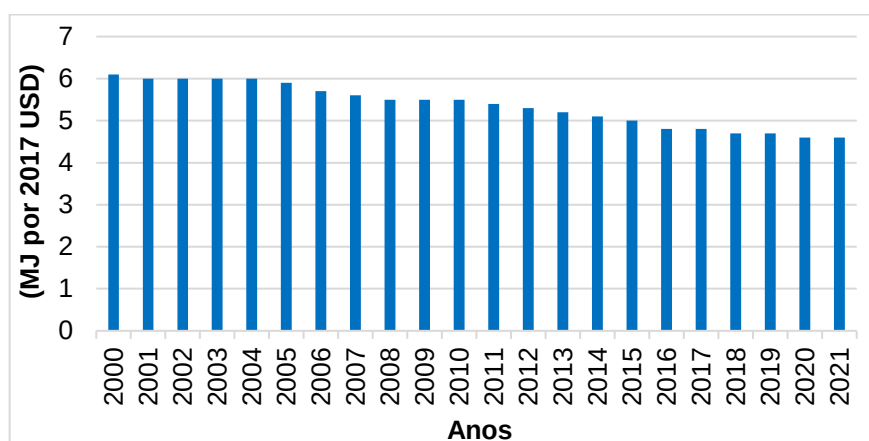
2.2.2 Índices global e nacional

A EE tornou-se uma questão central em todo o mundo, com várias tendências e desenvolvimentos notáveis em curso (GIELEN *et al.*, 2019). Sendo a transição para fontes de energia renovável, como a energia solar, eólica e hidrelétrica, uma prioridade global constante (ALVES, *et al* 2021). A adoção de veículos elétricos e a expansão da infraestrutura de carregamento também têm se mantido em crescimento

mundialmente, contribuindo para a EE no setor de transporte (HUSAIN, 2021). Regulamentações mais rigorosas têm sido introduzidas em várias regiões, principalmente na Europa, com setores para incentivar a adoção de tecnologias e práticas mais eficientes em termos energéticos (BUKARICA, TOMSIC, 2017; VERHAEGHE, MAUERHOFER, 2023). Esse contexto também tem favorecido o aumento da conscientização sobre as mudanças climáticas e os impactos ambientais, incentivando tanto empresas quanto indivíduos a adotarem medidas de eficiência energética em suas operações e estilos de vida.

A Figura 11 traz a tendência global da IE entre o período de 2000 e 2021 (ENERDATA, 2024).

Figura 11 – IE mundial nas últimas décadas



Fonte: Dados adaptados de ENERDATA (2024)

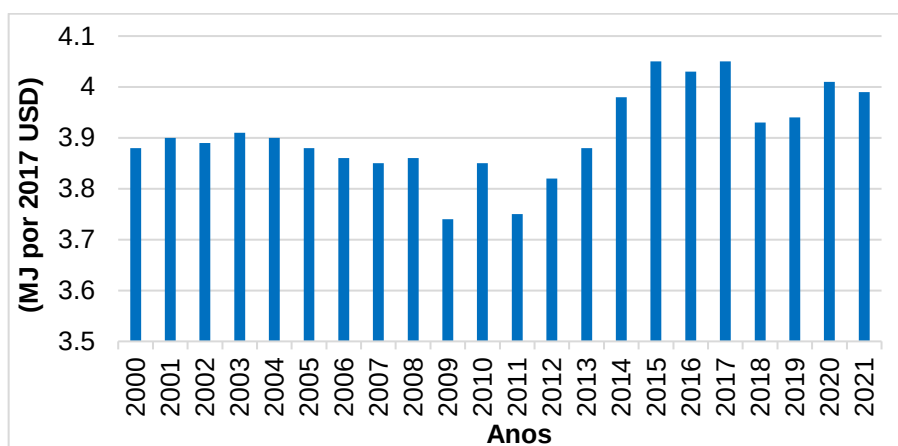
Analisando os índices da IE demonstrados na Figura 11, é visto que a tendência global está diminuindo, trazendo um reflexo dos esforços ao redor do globo para uma maior EE. Porém, a taxa de diminuição atual nos permite compreender que essa tendência permanece insuficiente em comparação com a diminuição necessária de mais de 3,5%/ano para atingir o cenário de limitar o aquecimento global em 2°C (ROGELJ., et al 2016).

O Brasil figura entre os dez países com maior consumo de eletricidade, se destaca como um significativo fabricante de derivados de petróleo, conforme Figura 12, e ocupa a segunda posição no *ranking* mundial de produção de etanol (RFA, 2023). Devido à sua notável influência no cenário internacional e ao impacto substancial em suas estratégias de EE, o governo brasileiro tem implementado algumas medidas com o propósito de promover suas fontes de energia renovável,

porém, embora existam discussões e iniciativas relacionadas à transição energética, o governo brasileiro ainda não possui um plano consolidado único para essa transição. Apesar desse cenário, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) (2020), o país tem investido consideravelmente em pesquisa, desenvolvimento e demonstração de projetos de EE, sendo que no período de 2013 a 2020, foram destinados quase 2 bilhões de reais para essas iniciativas.

A constante transição da matriz energética brasileira deveria aumentar a EE do país, e consequentemente, reduzir sua IE. Contudo, apesar dos investimentos significativos em fontes de energia renováveis e do aumento da eficiência do sistema elétrico, a Figura 12 evidencia que a IE no Brasil ainda não apresenta uma tendência de reduções em seu valor (IEA., *et al*, 2023).

Figura 12 – IE brasileira nas últimas décadas



Fonte: Dados adaptados de IEA *et al.*, (2023)

Observa-se uma notável discrepância entre as tendências da evolução da IE mundial e no Brasil, embora os valores do país estejam abaixo da média global. Enquanto a IE global demonstra uma tendência regressiva gradual, embora em um ritmo mais lento do que o desejado, a trajetória histórica brasileira foge completamente a essa observação, exibindo consideráveis flutuações em sua IE. Essa variação pode ser atribuída a uma diversidade de fatores, que incluem a interconexão entre o consumo de energia, a instabilidade econômica do país e a instabilidade IE, como a demanda por energia e atividade econômica, os investimentos em infraestrutura e desenvolvimento, as variações na produção e no consumo, bem como as políticas energéticas e regulamentações.

2.3 Emissões de Gases de Efeito Estufa

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera da Terra. Ele é essencial por manter a temperatura média da superfície terrestre em um nível adequado para a vida, sendo essencial para o equilíbrio térmico do planeta (SOUZA, 2016). No entanto, nas últimas décadas, as atividades humanas têm intensificado esse efeito, levando ao aquecimento global, que é um aspecto específico de um fenômeno mais amplo, às mudanças climáticas (FRIEDLINGSTEIN, 2020).

O clima é caracterizado como a síntese das condições meteorológicas, ou seja, a representação estatística (médias e variabilidade) da temperatura, precipitação e velocidade do vento ao longo de um período de trinta anos (WMO, 2016). Os principais elementos que constituem o sistema climático incluem ar, água, gelo, terra e vegetação, e suas interações. Este sistema está sujeito a variações ao longo do tempo devido à sua própria dinâmica interna e à alteração do balanço radiativo entre a Terra e a atmosfera (SOUZA, 2016).

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (2013), as mudanças no balanço radiativo podem ser ocasionadas por causas naturais ou causadas por atividades humanas, também conhecidas como fontes antropogênicas. Existem três formas de alterar esse balanço para modificar a temperatura média da Terra:

- Modificação da energia solar incidente através de mudanças na órbita terrestre ou na atividade solar;
- Alteração da fração de radiação refletida por variações na cobertura de nuvens, presença de aerossóis atmosféricos ou mudanças no uso da terra;
- Modulação da radiação infravermelha emitida pela Terra por meio de variações no conteúdo de gases de efeito estufa.

Devido ao equilíbrio térmico da Terra, é crucial que ela irradie para o espaço a mesma quantidade de energia que recebe do Sol. No entanto, pelas leis da termodinâmica, a Terra deveria estar a uma temperatura muito mais baixa do que a realmente medida na superfície para emitir a energia prevista. Essa discrepância é explicada pelo efeito estufa natural, que resulta da presença de gases na atmosfera capazes de absorver a radiação emitida pela superfície terrestre (SOUZA, 2016). Portanto, mudanças climáticas referem-se a alterações no estado do clima que podem ser identificadas por mudanças na média ou variação de suas propriedades e que

persistem por um longo período de tempo. Essas mudanças podem ser causadas tanto por processos naturais internos quanto por influências externas, como modulações nos ciclos solares, erupções vulcânicas e mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera (IPCC, 2013). Por outro lado, *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) (1992) define a mudança climática como uma mudança no clima que é atribuída, direta ou indiretamente, à atividade humana, que altera a composição da atmosfera global e que vai além da variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis. Assim, é possível distinguir entre mudanças climáticas atribuídas às atividades humanas que alteram a composição atmosférica e a variabilidade climática atribuída a causas naturais.

As emissões de GEE são um dos principais impulsionadores das mudanças climáticas globais, contribuindo significativamente para o aumento da temperatura média global, causando uma série de impactos ambientais e socioeconômicos (GUPTA, 2023).

Os impactos incluem o derretimento das calotas polares e das geleiras, elevação do nível do mar, aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos e alterações nos padrões de precipitação (SOUZA, 2016). Além disso, as emissões de GEE estão ligadas a problemas de saúde pública, como aumento da incidência de doenças respiratórias devido à poluição do ar, e impactos negativos em ecossistemas terrestres e aquáticos, incluindo perda de biodiversidade e acidificação dos oceanos (GUPTA, 2023; ZAKARI, ADEDOYN, BEKUN, 2021). Essas emissões são causadas principalmente por fontes antropogênicas e por essa razão, cada vez mais países têm procurado aumentar a eficiência de suas atividades produtivas para garantir a redução de emissões (BOND, *et al* 2013; NEJAT, *et al* 2015). Contudo, a redução das emissões de GEE apresenta diversos desafios, incluindo a dependência contínua de combustíveis fósseis, a falta de incentivos econômicos para a adoção de tecnologias limpas, a necessidade de cooperação internacional para enfrentar o problema em escala global e as questões socioeconômicas relacionadas à transição para uma economia de baixo carbono (SONG, 2006; LE QUERE, *et al* 2020). Além disso, políticas e regulamentações ambientais insuficientes, interesses comerciais conflitantes e a falta de conscientização pública sobre a urgência da redução das emissões representam obstáculos adicionais (LE QUERE, *et al* 2020).

2.3.1 Emissões de CO₂

Reduzir as emissões de CO₂ é crucial para proteger o meio ambiente, preservar a biodiversidade, garantir a segurança alimentar e promover um futuro sustentável e resiliente para as gerações futuras (FRIEDLINGSTEIN, *et al* 2020; ROGELJ., *et al* 2016). Esse desafio é global e requer cooperação e ação coordenada de todos os setores da sociedade. Uma abordagem alternativa para reduzir as emissões de CO₂ é a transição para fontes de energia renovável e limpa, como solar, eólica, hidrelétrica e a biomassa (LI., *et al* 2022). Investimentos em tecnologias de energia limpa, bem como incentivos para sua adoção em larga escala, são essenciais para acelerar essa transição e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, políticas governamentais eficazes desempenham um papel crucial na redução das emissões de CO₂.

A implementação de regulamentações ambientais mais rigorosas, o estabelecimento de metas para a redução de emissões, a adoção de mecanismos de precificação do carbono e a criação de incentivos fiscais para práticas sustentáveis constituem algumas das estratégias que os governos podem adotar para promover a descarbonização da economia (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2020; ALLCOTT, MULLAINATHAN, 2010). No entanto, reduzir as emissões de CO₂ não é apenas uma responsabilidade dos governos e das indústrias. Em nível individual, é possível contribuir para a mitigação das mudanças climáticas por meio de escolhas cotidianas que impactem positivamente o meio ambiente. A utilização de transporte público, a adoção de uma dieta com maior base vegetal e menor consumo de produtos de origem animal, a economia de energia em residências e o apoio a empresas e marcas que adotam práticas sustentáveis são ações que, quando incorporadas ao dia a dia, podem reduzir substancialmente as emissões de CO₂. Tais atitudes representam um esforço importante para promover a sustentabilidade e mitigar os efeitos do aquecimento global (HEYD, 2010).

2.3.2 Cenário de emissões global e nacional

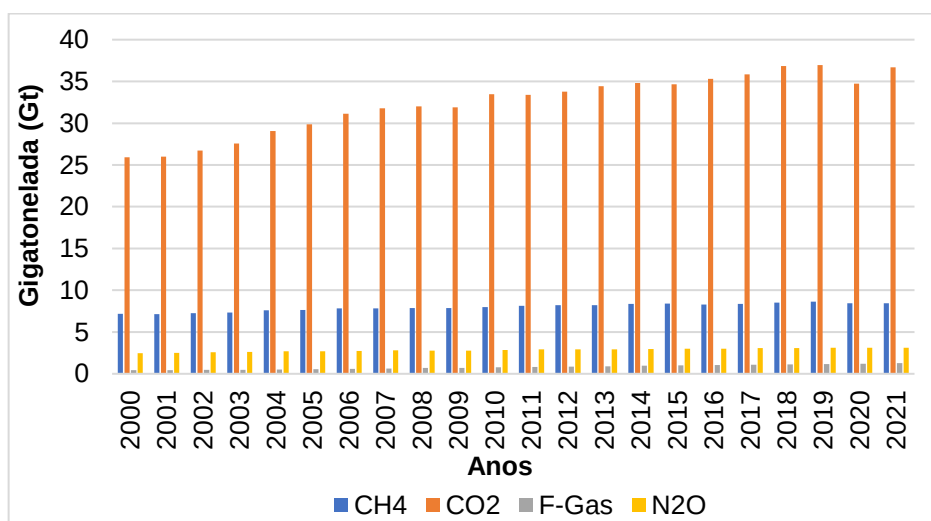
Os índices de emissões de GEE apresentam variações de acordo com o contexto e os objetivos específicos da análise. Estes índices são fundamentais na avaliação do progresso na redução das emissões de GEE, no desenvolvimento de

políticas energéticas e climáticas, e na implementação de medidas de mitigação das mudanças climáticas (FRIEDLINGSTEIN et al., 2020). Abaixo, destacam-se alguns dos principais índices empregados para a mensuração e relato das emissões de GEE:

- **Emissões Totais de GEE:** Refere-se à quantidade total de gases de efeito estufa emitidos em uma determinada região, país ou em escala global. Essas emissões são frequentemente expressas em unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), que é uma medida que combina o potencial de aquecimento global de diferentes gases de efeito estufa;
- **Emissões per Capita:** Esse índice calcula a quantidade média de emissões de GEE por pessoa em uma determinada área geográfica, como um país ou região. Ele permite comparar o impacto das emissões de GEE entre diferentes populações e países, levando em consideração o tamanho da população;
- **Intensidade de Carbono:** Esse índice mede a quantidade de emissões de GEE por unidade de atividade econômica, como o PIB ou a produção de energia. Ele é usado para avaliar a eficiência na redução das emissões de GEE em relação ao crescimento econômico ou à produção industrial;
- **Tendências Temporais:** Esse índice analisa as mudanças nas emissões de GEE ao longo do tempo, permitindo avaliar se as emissões estão aumentando, diminuindo ou permanecendo estáveis ao longo de períodos específicos.

A Figura 13 mostra a tendência temporal das emissões globais dos GEE pelos principais gases, proveniente de combustíveis fósseis.

Figura 13 – Emissões mundiais de GEE por gás nas últimas décadas

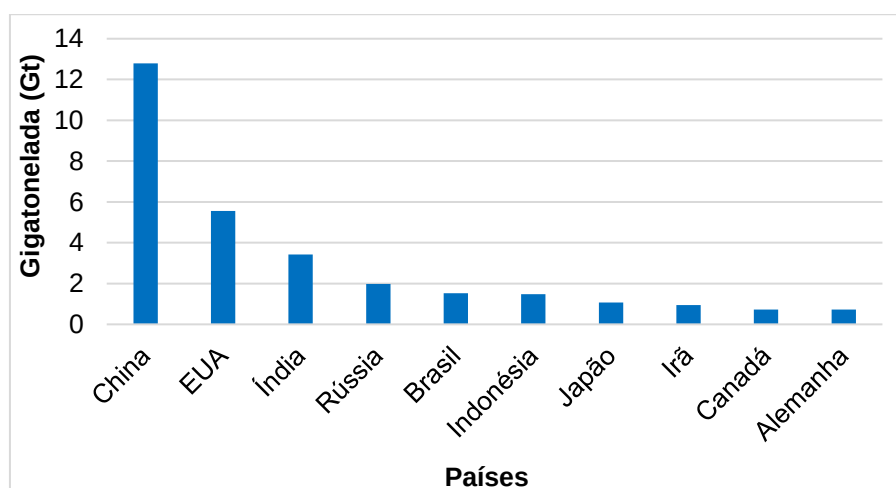


Fonte: Dados adaptados de CLIMATEWATCH (2022)

Analisando a Figura 13, nota-se que o CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), e também os gases fluorados (F-Gas), como hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorocarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) estão entre os principais gases que contribuem para o efeito estufa. Contudo, o CO₂ é responsável por aproximadamente 75% das emissões globais de GEE no ano de 2021, sendo o principal contribuinte para o aumento do efeito estufa. Sua emissão vem principalmente proveniente da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. Contudo, também liberado por processos naturais, como a respiração de seres vivos e a decomposição de matéria orgânica. Assim, evidencia-se as emissões de CO₂ como as mais significativas em termos de volume, causando o maior impacto ambiental. Contudo, é importante abordar todas as fontes de emissões de gases de efeito estufa para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental.

Historicamente, países industrializados têm sido os maiores emissores de GEE, devido ao seu alto consumo de energia e produção industrial. No entanto, nas últimas décadas, os países em desenvolvimento também aumentaram significativamente suas emissões devido ao rápido crescimento econômico e industrial. A Figura 14 apresenta os dez maiores emissores de GEE mundiais em 2022.

Figura 14 – Os dez maiores emissores de GEE



Fonte: Dados adaptados de CLIMATEWATCH (2022)

Os dez principais emissores globais de GEE impactam profundamente o cenário das emissões e o enfrentamento das mudanças climáticas, como atores econômicos e industriais de destaque, esses países carregam a responsabilidade de

adotar políticas rigorosas e inovadoras para mitigar suas emissões, desempenhando um papel crucial na busca por um futuro sustentável e de baixas emissões de carbono.

A China lidera as emissões globais, 26% do total. Esse nível de emissões se deve em grande parte à rápida industrialização, alta dependência do carvão como fonte energética e intensa urbanização (ZHANG, SONG, YANG, 2021; DAVIDSON, 2024). No entanto, o país também está entre os principais investidores em tecnologias sustentáveis e energias renováveis, o que reflete seu compromisso com soluções de baixo carbono (DAVIDSON, 2024).

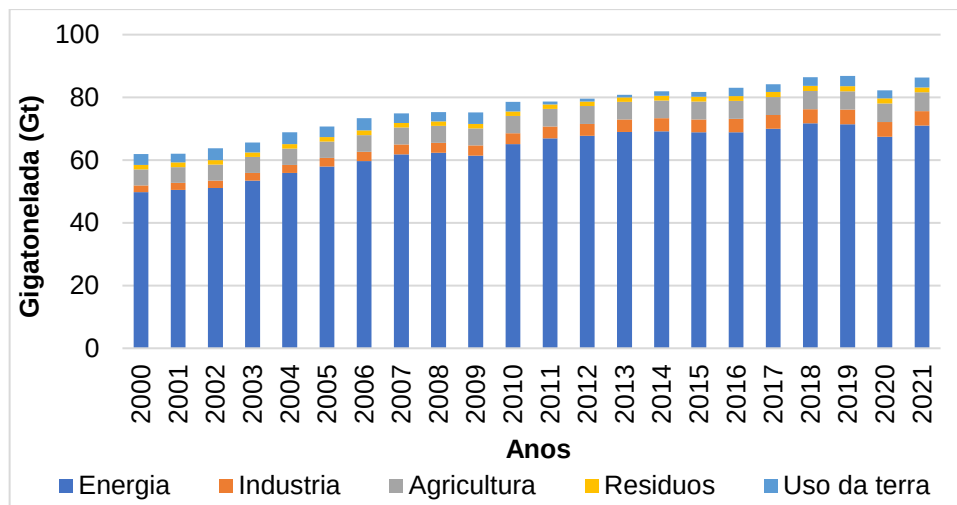
Os Estados Unidos (EUA), o segundo maior emissor global, são responsáveis por cerca de 11% das emissões de GEE. As principais fontes de emissão no país são a queima de combustíveis fósseis para geração de eletricidade, transporte e processos industriais (EPA, 2022).

O Brasil, embora contribua com cerca de 3% das emissões globais, destaca-se por ter como principal fonte de emissões o desmatamento e mudanças no uso da terra, em contraste com outros países cuja emissão está mais atrelada ao consumo de energia (SOUZA, 2022). O país comprometeu-se a reduzir suas emissões em 43% até 2030, com a meta de atingir uma redução de 50% até 2050, tomando como referência os níveis de 2005 (MOURA, JUNIOR, 2023).

A Alemanha, única nação europeia entre os dez maiores emissores, contribui com cerca de 1,5% das emissões globais, em grande parte devido ao seu status de maior economia da Europa. O país, entretanto, assume uma posição de destaque na transição energética, sendo pioneiro em políticas e investimentos em energia renovável (CASTRO, 2018).

A Figura 15 mostra a emissão de CO₂ global por setores nas últimas décadas, destacando assim os principais setores responsáveis pelas maiores emissões de CO₂ nas últimas décadas. Observa-se que o setor de energia é um pilar central nas emissões globais de CO₂, correspondendo por quase três quartos das emissões globais, e, portanto, na luta contra as mudanças climáticas. Essa dominância se deve a várias razões, entre os principais motivos a alta dependência de combustíveis fósseis, a infraestrutura energética existente, e regulações mais rígidas sobre as emissões. A transformação deste setor é vital para alcançar as metas de redução de emissões e para mitigar os impactos adversos das mudanças climáticas no futuro.

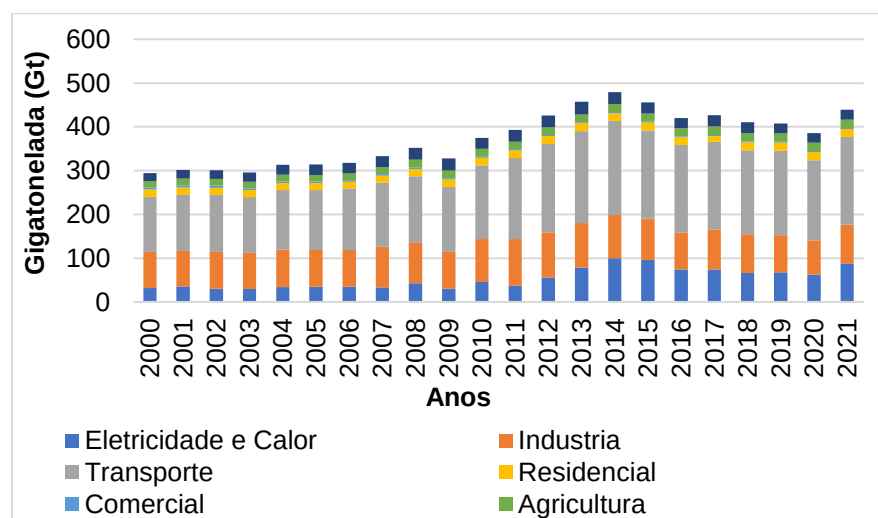
Figura 15 – Emissão de CO₂ mundial por setor nas últimas décadas



Fonte: Dados adaptados de CLIMATEWATCH (2022)

No cenário nacional, o Brasil enfrenta o desafio de balancear seu compromisso ambiental com a realidade de suas emissões, que, apesar de uma matriz energética relativamente limpa, ainda colocam o país entre os maiores emissores. A Figura 16 mostra a divisão setorial das emissões de CO₂ no Brasil provindas de combustíveis fósseis.

Figura 16 – Emissões de CO₂ por setor no Brasil durante as últimas décadas



Fonte: Dados adaptados de IEA (2023b)

A análise da Figura 16 evidencia que o setor de transporte é uma das maiores fontes de emissões de CO₂ no Brasil, impulsionada principalmente pela frota de veículos movidos a combustíveis fósseis, como gasolina e diesel (BRANCO *et al.*,

2023; JUNIOR *et al.*, 2015). Apesar dos investimentos em biocombustíveis e veículos elétricos, o uso de combustíveis fósseis ainda predomina, refletindo uma necessidade de transição gradual para tecnologias de transporte mais limpas e sustentáveis.

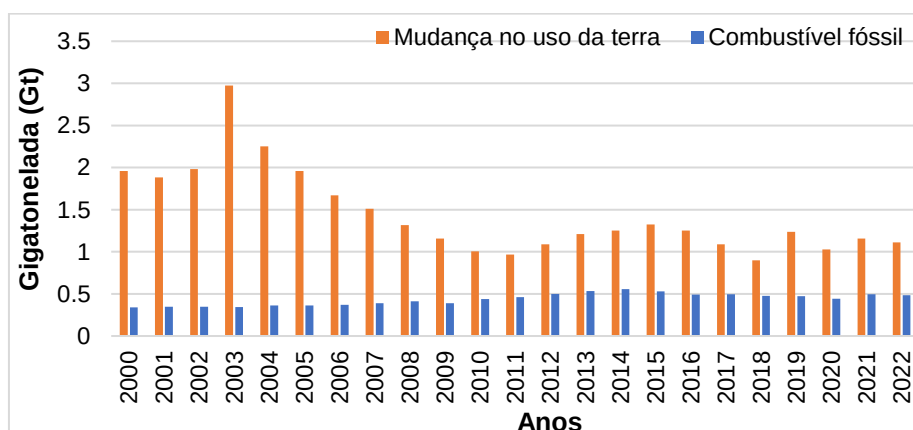
Na indústria, as emissões de CO₂ estão associadas, em grande medida, à queima de combustíveis fósseis em processos de alta IE, como os de produção de aço, cimento, papel e celulose (GRAMKOW, ANGER-KRAAVI, 2019). Esses setores industriais permanecem como fontes expressivas de emissões devido à dependência de processos intensivos em energia e matéria-prima.

No setor residencial e comercial, as emissões de CO₂ são atribuídas ao consumo de eletricidade e ao uso de sistemas de aquecimento e refrigeração. Embora o país conte com uma matriz elétrica predominantemente renovável, ainda há consumo de energia proveniente de fontes que envolvem combustíveis fósseis em menor escala, afetando as emissões de forma indireta.

A agricultura, um setor chave da economia nacional, apresenta uma baixa contribuição de emissões provindas de combustíveis fósseis, porém, também contribui significativamente para as emissões de CO₂ totais, especialmente em práticas de manejo e uso da terra (IPEA, 2021).

A matriz energética brasileira é uma das mais limpas do mundo, destacando-se pelo uso intensivo de fontes renováveis na geração de eletricidade, o que contribui para níveis relativamente baixos de emissões de CO₂. Contudo, uma das principais fontes de emissões de GEE no Brasil é o desmatamento, como ilustrado na Figura 17, refletindo desafios críticos para o alcance de metas ambientais.

Figura 17 – Emissões de CO₂ provenientes da mudança de uso da terra e uso da energia no Brasil



Fonte: Dados adaptados ANDREW, PETERS (2023)

Segundo IEMA (2023) as atividades de uso do solo, correspondentes aos setores de mudança de uso da terra, representaram 49% das emissões brasileiras de 2021. O desmatamento ocorre especialmente na Amazônia e no Cerrado, resultando na liberação de grandes quantidades de CO₂ armazenado nas florestas, contribuindo para o país figurar entre os dez maiores emissores mundiais de GEE.

A busca por soluções sustentáveis aos desafios mencionados anteriormente tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas analíticas que avaliam e aprimoram o desempenho de diferentes setores em termos de sustentabilidade. Essas ferramentas visam identificar as melhores práticas e as ineficiências em sistemas complexos, contribuindo para a formulação de políticas e estratégias voltadas para a redução das emissões e a maximização da EE. Na próxima seção, será discutida a aplicação de uma técnica de análise de dados.

2.4 Análise Envoltória de Dados

A DEA é uma metodologia baseada em Programação Linear (PL) voltada para a otimização de problemas que envolvem múltiplas alternativas de decisão e que são sujeitas a restrições específicas (BARBOSA, FUCHIGAMI, 2018). Utilizada principalmente para mensurar a eficiência produtiva de unidades operacionais, a DEA permite avaliar a performance de entidades que utilizam múltiplos insumos para produzir múltiplos produtos, sendo amplamente aplicada em cenários de produção e comercialização de bens e/ou serviços. Por ser uma abordagem não paramétrica, a DEA não exige a especificação de uma forma funcional exata entre insumos e produtos, o que possibilita maior flexibilidade na avaliação de eficiência (SANTOS, NOVA, 2005).

Historicamente, a DEA evoluiu a partir dos conceitos de eficiência propostos por Farrell em 1957, que focavam em cenários com um único insumo e um único produto. Em 1978, Edward Rhodes, sob a orientação de William Cooper pela *Carnegie Mellon University*, expandiu esses conceitos ao desenvolver um modelo baseado em programação matemática, aplicável a situações mais complexas com múltiplos insumos e produtos. Esse avanço deu origem ao método DEA, que rapidamente se consolidou como ferramenta analítica para avaliar a eficiência relativa de unidades produtivas em contextos diversos (SANTOS, NOVA, 2005).

Desde sua introdução, a DEA tem sido amplamente adotada em diferentes áreas como saúde, educação, finanças, manufatura, gestão organizacional, e em avaliações governamentais, permitindo uma comparação de eficiência em contextos em que outras abordagens paramétricas não são aplicáveis (LIU *et al.*, 2013). A flexibilidade da DEA é atribuída à sua capacidade de lidar com múltiplas entradas e saídas sem necessidade de especificação de uma relação de produção ou de um sistema de ponderação, o que a torna ideal para ambientes complexos e heterogêneos (HEYNES, DINC, 2005). Essas características da DEA possibilitam que organizações e setores econômicos identifiquem oportunidades de melhoria operacional e otimizem o uso dos recursos disponíveis, contribuindo significativamente para o aumento da eficiência global em diversos contextos econômicos e administrativos.

2.4.1 Elementos DEA

Para garantir uma análise eficaz por meio da DEA, é essencial uma compreensão clara dos conceitos de unidade produtiva e de conjunto de unidades produtivas. Esses elementos formam a base para a avaliação de eficiência e para a obtenção de resultados precisos.

- Unidades de Tomada de Decisão

Na DEA, a unidade de tomada de decisão é também conhecida como *Decision Making Unit* (DMU), ou unidade produtiva, e refere-se a entidades que consomem recursos (entradas) para gerar produtos ou serviços (saídas). As entradas representam todos os insumos empregados no processo produtivo, tais como mão-de-obra, materiais e energia, enquanto as saídas correspondem aos produtos finais ou aos serviços prestados, refletindo os resultados do processo produtivo (KHEZRIMOTLAGH, 2015).

Cada DMU é analisada em relação a outras unidades semelhantes, compondo um conjunto de unidades produtivas que formam a base de comparação. Com isso, a DEA busca identificar a fronteira eficiente, onde as DMUs mais eficientes estão situadas, servindo como alvo (do inglês, *benchmark*) para aquelas que operam abaixo desse patamar. As DMUs que não alcançam a fronteira eficiente revelam ineficiências no uso de seus recursos, indicando áreas de potencial melhoria (COOK, TONE, ZHU,

2014). A Figura 18 exemplifica a estrutura básica de uma DMU, com entradas e saídas bem definidas para ilustrar como cada unidade é avaliada dentro de um conjunto, destacando a importância de escolher adequadamente as variáveis de entrada e saída para que a análise seja significativa e aplicável a um contexto específico.

Figura 18 – Elementos da DMU



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse processo, a DMU com a maior produtividade é tomada como referência, e a eficiência das demais unidades é determinada pela razão entre a sua produtividade e a produtividade da DMU de referência. Dessa forma, a DMU mais produtiva terá sempre uma eficiência de 100%.

- Produção

A produção, ou processo produtivo, é definida como um conjunto de atividades em que insumos, como serviços de mão de obra, matéria-prima e bens de capital, são transformados em um produto final (VASCONCELLOS; OLIVEIRA, 2010). Dessa forma, o termo 'processo produtivo' refere-se a todas as atividades que, impulsionadas pela vontade humana, resultam na geração de um produto ou serviço, considerado como a variável de saída, sendo alimentado por determinadas macro variáveis de entrada que são intrínsecas e essenciais ao próprio processo (PEREIRA, 2009).

Os fatores de produção, ou macro variáveis de entrada, podem ser classificados em dois grandes grupos: o trabalho, que representa a capacidade dos seres humanos de transformar materiais e/ou objetos em novos produtos, e o capital, que abrange tanto os estoques de recursos naturais (como a terra) quanto os estoques de bens produzidos a partir de processos produtivos.

- Capital

O capital é um fator de produção que representa o potencial produtivo de uma economia, ou seja, a capacidade de transformar insumos em bens ou serviços. Diferentemente de um bem ou serviço disponível de forma imediata, ele se refere ao estoque de bens econômicos heterogêneos, como máquinas, terras e matérias-primas, que possuem a aptidão para gerar outros bens e serviços. (SOUZA, 2012).

- Avaliação Comparativa

A avaliação comparativa entre empresas, comumente designada pelo termo em inglês *benchmarking*, é definida por Badin (1995) como um processo contínuo e sistemático de análise de empresas e serviços, realizado por meio da comparação com unidades consideradas eficientes. Esse processo visa ao estabelecimento de ações gerenciais efetivas, com o objetivo de aprimorar os resultados, como a redução de custos e o aumento da produção, entre outros.

- Rendimentos de Escala

O conceito de rendimentos de escala refere-se à relação entre a variação na quantidade produzida e o aumento nos fatores de produção. Os rendimentos (ou retornos) de escala podem apresentar-se de três formas distintas: crescente, constantes ou decrescentes, conforme o impacto da variação nos fatores sobre a produção. Sejam $x_1, \dots, x_n$ os fatores de produção e q a quantidade produzida associada a estes fatores. São eles: Retornos constantes de escala (λ); Retornos crescentes de escala ($\lambda_1 > \lambda$); Retornos decrescentes de escala ($\lambda_2 < \lambda$);

$$\begin{aligned} f(\lambda x_1, \dots, \lambda x_n) &= \lambda * f(x_1, \dots, x_n), \\ f(\lambda x_1, \dots, \lambda x_n) &= \lambda_1 * f(x_1, \dots, x_n), \\ f(\lambda x_1, \dots, \lambda x_n) &= \lambda_2 * f(x_1, \dots, x_n). \end{aligned} \tag{2}$$

- Eficácia

A eficácia é a capacidade de uma unidade produtiva atingir a produção que tinha como meta. Leva em consideração o que é produzido, sem levar em conta os recursos usados para a produção (COOPER, SEIFORD, TONE, 2007).

- Produtividade

A produtividade é definida como a relação entre a quantidade de bens ou serviços produzidos e os recursos alocados no processo produtivo. Assim, ela representa uma métrica fundamental da eficiência com que insumos – como trabalho e capital – são empregados para transformar recursos em resultados tangíveis, refletindo o grau de aproveitamento desses fatores na geração de saída (SOUZA, 2012). A produtividade aumenta à medida que a proporção entre a quantidade produzida e os insumos utilizados se eleva. A mensuração da produtividade pode ser efetivamente realizada por meio da razão entre a produção gerada e os recursos empregados. Dessa forma, essa abordagem fornece uma base clara para a análise do desempenho produtivo em diversos contextos econômicos e setoriais, permitindo identificar áreas de eficiência e oportunidades de melhoria. A simplicidade dessa métrica torna-a uma ferramenta valiosa para comparações entre diferentes segmentos de mercado, facilitando a tomada de decisões informadas sobre alocação de recursos e estratégias operacionais. A abordagem mais intuitiva para medir a produtividade é a utilização da razão:

$$Produtividade = \frac{Produtos(Saída)}{Insumos(Entrada)}, \quad (3)$$

O ideal seria adotar uma medida de produtividade total, que considere todos os insumos e produtos gerados. No entanto, surge a dificuldade de integrar diferentes fatores, como capital e trabalho, em um único índice. Uma das abordagens para contornar essa limitação é realizar a soma ponderada dos produtos e dividi-la pela soma ponderada dos recursos utilizados (BATISTA, 2009). Em um processo, por exemplo, que utiliza três entradas para produzir duas saídas, a medida de produtividade total pode ser expressa da seguinte forma:

$$Produtividade\ Total = \frac{Saída1*u1 + Saída2*u2}{Entrada1*v1 + Entrada2*v2 + Entrada3*v3}, \quad (4)$$

onde:

$u1$ e $u2$ são os pesos atribuídos às saídas;

$v1$, $v2$ e $v3$ são os pesos atribuídos às entradas.

Ou seja, a soma das saídas, cada qual, multiplicado por seus respectivos pesos, dividido pelas entradas, multiplicados por seus respectivos pesos.

- Pesos

Os pesos representam a importância atribuída a cada variável de entrada e saída no cálculo da eficiência relativa de uma DMU. A metodologia DEA ajusta esses pesos de modo a maximizar a eficiência de cada DMU, garantindo que cada unidade seja avaliada da forma mais favorável possível, sem permitir que nenhuma outra DMU alcance um índice de eficiência superior a 1 (100%) (QI, GUO, 2014). Dessa maneira, as DMUs podem destacar as variáveis nas quais demonstram maior desempenho, o que resulta em uma análise flexível que considera as particularidades de cada unidade.

- Folga

Termo utilizado para descrever a subprodução de saídas ou o uso excessivo de insumos refere-se à necessidade de melhorias, que podem se manifestar como um aumento nas saídas ou uma redução nas entradas. Essas melhorias são essenciais para permitir que uma unidade ineficiente alcance um estado de eficiência (HEYNES, DINC, 2005).

- Alvos

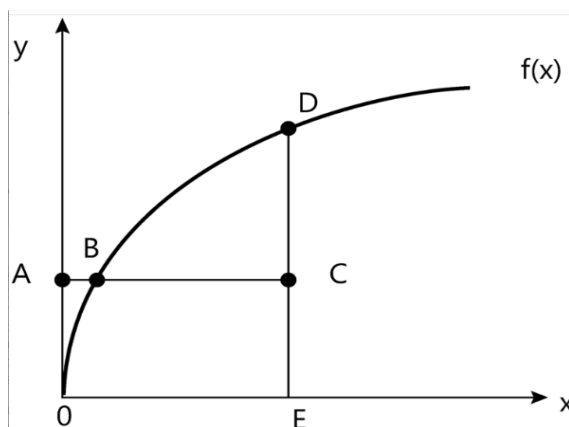
Consiste nos valores das entradas e saídas a serem atingidos para que uma unidade ineficiente se torne eficiente (HEYNES, DINC, 2005).

- Fronteira de eficiência

A fronteira que representa o desempenho máximo das DMUs é denominada fronteira de eficiência, também conhecida como fronteira clássica. Essa fronteira é composta pelas unidades que exibem a maior eficiência na transformação de suas entradas em saídas (HEYNES, DINC, 2005). As unidades que delimitam essa fronteira são classificadas como 100% eficientes; assim, qualquer unidade situada fora da fronteira apresenta um índice de eficiência inferior a 100%. A eficiência de uma unidade produtiva considerada ineficiente, ou seja, não 100% eficiente, está, portanto, relacionada à sua distância radial em relação à fronteira (HEYNES, DINC, 2005).

A Figura 19 ilustra uma função de produção, na qual a entrada é representada pela variável X e saída é representada pela variável Y .

Figura 19 – Representação da Fronteira de eficiência resultante do uso da DEA



Fonte: JÚNIOR, GASPARIANI (2006)

A máxima quantidade de saída que a unidade X pode gerar é representada pela função de produção $f(x)$. Observa-se que os pontos B e D atingiram a fronteira de eficiência, caracterizando-os como unidades eficientes. O ponto D , por exemplo, utilizou a mesma quantidade de entradas que C , mas alcançou resultados superiores. Já o ponto C está posicionado abaixo da fronteira, indicando menor eficiência, uma vez que, apesar de empregar a mesma quantidade de entradas que D , obteve saídas inferiores.

- Fronteira invertida

A fronteira invertida é uma abordagem que inverte os papéis das entradas (fatores de produção) e saídas (resultados) na avaliação da eficiência. Enquanto a fronteira clássica busca maximizar a saída para um nível fixo de entradas, a fronteira invertida visa minimizar o uso de insumos para um nível fixo de produção (LETA *et al.*, 2005; REINAS *et al.*, 2011).

A fronteira invertida oferece uma alternativa que complementa a análise tradicional da DEA, proporcionando uma compreensão mais ampla da eficiência e uma solução aprimorada para resolver possíveis empates entre DMUs eficientes.

- Índice composto

Trata-se de uma medida agregada que integra múltiplos indicadores de desempenho em uma única pontuação. No contexto da DEA, essa medida pode ser utilizada para consolidar os resultados de eficiência ao longo de diferentes períodos, variáveis de entrada e saída, ou entre distintas DMUs. Ela é calculada a partir da média aritmética entre o índice da fronteira clássica e o índice da fronteira invertida, ajustado por uma unidade (REINAS *et al.*, 2011). Pode ser expressa da seguinte forma:

$$IC = \frac{Ec + (1 - Einv)}{2}, \quad (5)$$

onde:

IC é o índice composto;

Ec é a eficiência clássica;

$Einv$ é a eficiência invertida.

- Índice normalizado

Trata-se de uma forma de ajustar os resultados da DEA para compará-los em uma escala comum. A normalização é frequentemente usada para ajustar os dados de eficiência para que todas as DMUs ou períodos fiquem em uma escala entre 0 e 1. Isso é feito para garantir que as comparações entre as DMUs sejam justas e que a variabilidade nos dados seja minimizada (COOPER, SEIFORD, TONE, 2007). A maneira mais simples de calcular o índice normalizado é por meio da razão:

$$IN = \frac{IC - I_{cmin}}{I_{cmax} - I_{cmin}}, \quad (6)$$

onde:

IN é o índice normalizado;

IC é o Índice composto;

I_{cmin} é o valor mínimo para o índice composto;

I_{cmax} é o valor máximo para o índice composto.

2.4.2 Modelagem

Os principais modelos tradicionais do método DEA foram desenvolvidos por Charnes, Cooper e Rhodes (CCR) em 1978 e Banker, Charnes e Cooper (BCC) em 1984, basicamente classificados segundo o retorno de escala assumido na formulação do problema, ou seja, Constante (do inglês *Constant Return to Scale* – CRS) ou Variável (do inglês *Variable Return to Scale* – VRS) (BARBOSA, FUCHIGAMI, 2018). Além dos modelos CCR e BCC, outros modelos foram desenvolvidos para atender a diferentes necessidades e contextos de análise. A Tabela 1 apresenta um resumo das características dos modelos da DEA com maior destaque.

Tabela 1 – Principais modelos DEA

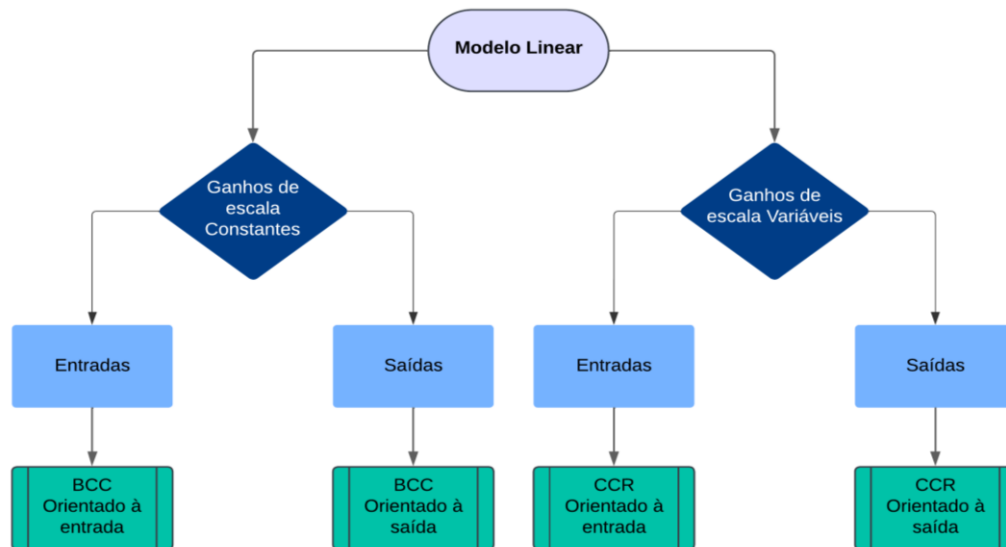
Modelo	Retorno à escala	Forma da fronteira
BCC	VRS	Linear por partes
CCR	CRS	Reta de 45°
Aditivo	VRS	Linear por partes
Multiplicativo variante	VRS	Cobb-Douglas por partes
Multiplicativo invariante	CRS	Log-Linear por partes
DEA de Janela	VRS/CRS*	Linear por partes
Super-Eficiência	VRS/CRS*	Linear por partes
Interval DEA / Fuzzy DEA	VRS/CRS*	Linear por partes com dados imprecisos
Network DEA	VRS/CRS*	Varia conforme a estrutura de rede

*Depende do modelo base

Fonte: Adaptado de BOGETOFT, OTTO (2011)

É possível criar e estimar modelos que proporcionam projeções de entrada ou saída orientada tanto para retornos de escala CRS como VRS, conforme ilustração apresentada na Figura 20. Sendo que, ao solucionar problemas orientados à entrada, procura-se otimizar a diminuição proporcional das variáveis de entrada mantendo as saídas constantes, já problemas orientados à saída visam a otimização do número de saídas mantendo as entradas constantes.

Figura 20 – Classificação entre ganhos de escala e orientação



Fonte: Adaptado de KASSAI (2002)

O método DEA possibilita a medida da eficiência relativa uma vez que determina o desempenho da DMU sob avaliação quando esta é comparada às demais unidades. Por este motivo, é sensível à inclusão ou exclusão de qualquer unidade no conjunto sob análise. A DMU considerada como mais eficiente servirá de parâmetro para o julgamento de todas as outras, permitindo desta forma a análise comparativa. Assim, o objetivo do DEA é construir um conjunto de referência e classificar as DMUs em unidades eficientes ou ineficientes, tendo como parâmetro delineador uma fronteira de eficiência (ARAUJO, 2008).

- Modelo BCC

O modelo BCC considera VRS, isto é, substitui o axioma da proporcionalidade entre entradas e saídas pelo axioma da convexidade. Por este motivo, esse modelo também é conhecido como VRS. Ao obrigar que a fronteira seja convexa, o modelo BCC permite que DMUs que operam com baixos valores de entradas tenham retornos crescentes de escala e as que operam com altos valores tenham retornos decrescentes de escala (MACEDO, BENGIO, 2003).

Consideremos um processo produtivo com n DMUs a serem avaliadas. Cada DMU estará sujeita a m entradas, ou irá consumir m tipos de insumos, o que resultará em s saídas, ou s produtos distintos.

$$Ej = \frac{\sum_{r=1}^s Ur * Yrj}{\sum_{i=1}^m Vi * Xij}, \quad (7)$$

sendo:

Ej a eficiência da j -ésima DMU;

Xij o valor da i -ésima entrada da j -ésima DMU, logo com $i=1...m$ e $j=1...n$;

Yrj o valor da r -ésima saída da j -ésima DMU, logo com $r=1...s$ e $j=1...n$;

Vi , com $i=1...m$ o peso referente ao aumento relativo na eficiência com cada redução unitária do valor de entrada; e

Ur com $r=1...s$ o peso referente à diminuição relativa na eficiência com cada redução unitária do valor de saída.

Usando técnicas de programação linear (PL), o método DEA atribui otimamente valores para os pesos Vi e Ur para cada DMU, relativos a cada uma das entradas e saídas consideradas. Esta atribuição é sujeita às seguintes restrições:

- Os pesos são atribuídos de forma tal que quando o mesmo conjunto de pesos de entrada e saída (Vi e Ur) de uma DMU for aplicado a todas as outras DMUs que estão sendo comparadas, nenhuma outra DMU terá eficiência superior a 1, ou seja, DMUs terão um valor de eficiência sempre menor ou igual a 1;
- os pesos, Vi e Ur são não negativos.

A função objetivo, que deverá ser maximizada, da j -ésima DMU é a razão entre a saída total ponderada dividida pela entrada total ponderada:

$$Max Ej = \frac{\sum_{r=1}^s Ur * Yrj}{\sum_{i=1}^m Vi * Xij}, \quad (8)$$

condicionado a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s Ur * Yrj}{\sum_{i=1}^m Vi * Xij} \leq 1 \text{ para } j=1...n, \quad (9)$$

sendo $Vi \geq 0$ para $i=1...m$ e $Ur \geq 0$ para $r=1...s$.

Os pesos U e V são escolhidos de forma a maximizarem o escore de eficiência da unidade sob análise.

As equações (10) e (11) descrevem os modelos BCC orientado às entradas e às saídas, respectivamente, com suas funções objetivo e suas devidas restrições.

$$\text{Max } Ej = \sum_{r=1}^s Ur * Yrj + U * ,$$

condicionado a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m Vi * Xij &= 1 , \\ - \sum_{r=1}^s Ur * Yrk + U * + \sum_{i=1}^m Vi * Xik &\geq 0, \quad k=1 \dots n , \\ Ur' Vi &\geq 0, \forall X, Y, U * \in R, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Min } Ej = \sum_{i=1}^m Ur * Yrj + U * ,$$

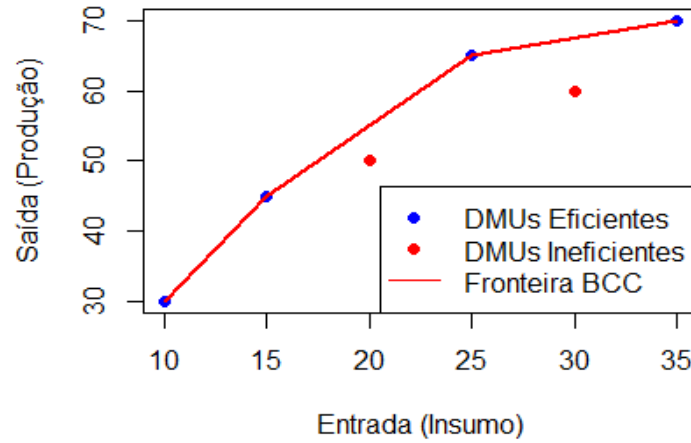
condicionado a:

$$\begin{aligned} \sum_{r=1}^s Ur * Yrj &= 1 , \\ \sum_{i=1}^m Vi * Xik + V * - \sum_{r=1}^s Ur * Yrk &\geq 0, \quad k = 1 \dots n , \\ Ur' Vi &\geq 0, V * \in R, \end{aligned} \quad (11)$$

onde $U *$ e $V *$ representam coeficientes de retorno de escala.

A Figura 21 ilustra o Modelo BCC, no qual se observa que o modelo considera os ganhos de escala quando calcula a eficiência.

Figura 21 – Exemplo de fronteira de eficiência modelo BCC



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa maneira, a eficiência de uma DMU é obtida dividindo-se sua produtividade pela maior produtividade dentre as DMUs que apresentam o mesmo tipo de retorno a escala, resultando em uma fronteira formada por retas de ângulos variados o que caracteriza uma fronteira linear por partes (MARIANO; ALMEIDA; REBELATTO, 2006). Matematicamente, a convexidade da fronteira introduzida no modelo BCC equivale a uma restrição adicional, que passa a ser conforme indicado em (12) para orientação a entradas, e (13) para orientação a saídas.

O valor mínimo de θ_j está condicionado a:

$$\begin{aligned}
 \theta_j * X_{ij} - \sum_{k=1}^n X_{ik} * \lambda_k &\geq 0, \forall i \text{ para } i = 1 \dots m, \\
 -Y_{rj} + \sum_{k=1}^n Y_{rk} * \lambda_k &\geq 0, \forall j \text{ para } r = 1 \dots s, \\
 \sum_{k=1}^n \lambda_k &= 1, \\
 \lambda_k &\geq 0, \forall k,
 \end{aligned} \tag{12}$$

O valor máximo de θ_j está condicionado a:

$$\begin{aligned}
 X_{ij} - \sum_{k=1}^n X_{ik} * \lambda_k &\geq 0 \text{ para } i = 1 \dots m, \\
 -\theta_j * Y_{rj} + \sum_{k=1}^n Y_{rk} * \lambda_k &\geq 0, \text{ para } r = 1 \dots s, \\
 \sum_{k=1}^n \lambda_k &= 1, \\
 \lambda_k &\geq 0, \forall k,
 \end{aligned} \tag{13}$$

nestes modelos $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$ é associada às variáveis duais U^* e V^* .

- **Análise de Janela**

Representa uma variação do modelo tradicional da DEA, permitindo a abordagem de problemas que envolvem variáveis transversais e temporais. Esta técnica baseia-se no princípio de médias móveis e estabelece medidas de eficiência ao considerar cada DMU em diferentes períodos como unidades independentes (COOPER, SEIFORD, TONE, 2007). Essa abordagem é particularmente útil para identificar tendências no desempenho de uma unidade ao longo do tempo. O desempenho de uma DMU em um determinado período pode ser comparado tanto com seu próprio desempenho em períodos anteriores quanto com o desempenho de outras DMUs. Essa comparação aumenta o número de pontos de análise, o que se revela vantajoso quando se trabalha com amostras pequenas (ASMILD *et al.*, 2004).

Portanto, a análise DEA de janela possibilita explorar a evolução do desempenho através de uma sequência de janelas sobrepostas. A ideia básica é considerar cada DMU como se fosse uma DMU diferente em cada período de tempo considerado. Variando a largura da janela, que é o número de períodos de tempo incluídos na análise, é possível cobrir o espectro da análise contemporânea, que inclui observações apenas de um período de tempo, à análise intertemporal, que inclui observações do período de estudo integral (TULKENS; VANDEMECKAUT, 1995; ASMILD *et al.*, 2004).

Estando o valor da largura da janela entre um e o período total de tempo em estudo, a janela definida para análise pode ser considerada um caso especial de análise sequencial. Na análise sequencial, presume-se que o que era viável no passado continua sendo viável, e, por isso, todas as observações anteriores são levadas em conta. Contudo, na análise de janela, apenas as observações dentro do intervalo temporal correspondente à largura da janela são consideradas. Assim, as observações contidas nessa janela são avaliadas de maneira intertemporal (COOPER, SEIFORD, TONE, 2007).

É importante destacar que, ao medir todas as unidades dentro de uma determinada janela umas em relação às outras, essa abordagem assume implicitamente que não ocorrem mudanças técnicas dentro de cada janela. Essa

questão representa um desafio geral do método de análise em janela. Portanto, para que a análise produza resultados válidos, a largura da janela deve ser selecionada de modo que se possa supor que as mudanças tecnológicas dentro de cada janela sejam insignificantes. Logo, recomenda-se o uso de larguras de janela mais estreitas para mitigar esse problema.

Será apresentada uma revisão do modelo de equacionamento do método DEA em janelas, conforme desenvolvido por Cooper, Seiford, Tone (2007) e Asmild *et al.* (2004). Seja uma sequência de dados referentes a N DMUs ($n=1...N$) as quais foram observadas em T períodos ($t=1...T$) e cujo processo produtivo possui m entradas e s saídas. A amostra tem, portanto, $N*T$ observações, e a n -ésima DMU no período t tem o vetor de entrada (com dimensão igual a m): $x_t^n = (x_{1t}^n, x_{2t}^n, \dots, x_{mt}^n)'$ e o vetor de saída (com dimensão igual a s): $y_t^n = (y_{1t}^n, y_{2t}^n, \dots, y_{st}^n)'$.

A janela com início no tempo k ($1 \leq k \leq T$) e com a largura w ($1 \leq w \leq T - k$) é denotada por k_w e tem $N*w$ observações.

A matriz de entradas para a análise de janela é dada por:

$$X_{k_w} = (x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^n, x_{k+1}^1, x_{k+1}^2, \dots, x_{k+1}^n, x_{k+w}^1, x_{k+w}^2, \dots, x_{k+w}^n), \quad (14)$$

A matriz de saídas é dada por:

$$Y_{k_w} = (y_k^1, y_k^2, \dots, y_k^n, y_{k+1}^1, y_{k+1}^2, \dots, y_{k+1}^n, y_{k+w}^1, y_{k+w}^2, \dots, y_{k+w}^n), \quad (15)$$

O problema DEA orientado a entradas que deverá ser então solucionado para a DMU_t^o é dado por:

$$\begin{aligned} \theta X_t^0 - X_{k_w} * \lambda &\geq 0, \\ Y_{k_w} * \lambda - Y_t^0 &\geq 0, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N * w. \end{aligned} \quad (16)$$

Para o problema considerado com N DMUs, T períodos e largura de janela igual a w tem-se:

$$n^{\circ} \text{ de janelas } (z) = T - w + 1$$

$$n^{\circ} \text{ de DMUs diferentes} = N * w * z$$

$$\Delta n^{\circ} \text{ de DMUs} = N * (w - 1) * (T - w)$$

Sendo que Δ representa o acréscimo no número de DMUs em relação ao que seria considerado na análise DEA sem a tratativa dispensada às janelas temporais.

Em relação aos períodos que se podem obter, ZHANG *et al.* (2011) constatou que uma janela de tempo de três ou quatro períodos tendem a produzir o melhor equilíbrio entre informatização e estabilidade dos escores de eficiência.

2.4.3 Eficiência Energética Total de Fatores

Como já foi descrito anteriormente, o principal indicador adotado para estudar como insumos energéticos são utilizados é a IE, que calculado de forma convencional, consiste na realidade em um fator parcial de avaliação da produtividade, uma vez que a energia é a única entrada considerada, enquanto a substituição ou complemento entre energia e outros insumos (por exemplo, força de trabalho e capital) são negligenciados (CHANG; HU, 2010).

Na verdade, indicadores que simplesmente relacionam consumo de energia e PIB, sem levar em conta a possibilidade de substituição entre outros fatores de produção, podem constituir uma ferramenta insuficiente na classificação da eficiência em comparações temporais ou espaciais. Por exemplo, a relação de IE pode diminuir simplesmente substituindo o tipo de combustível utilizado ou mediante um aumento do número de trabalhadores manuais. Isso, entretanto, não significa que a energia é utilizada de forma mais eficiente. Embora a energia e o capital sejam complementares, máquinas, por exemplo, necessitam de energia e podem transformá-la, além disso, a substituição entre energia e capital também pode ocorrer. Investimentos em equipamentos que são mais eficientes na transformação ou distribuição de energia é uma forma de substituir a energia pelo capital quando a energia é cara, ou quando objetivos ambientais têm de ser cumpridos.

Para superar a desvantagem de fatores parciais de EE, um número crescente de pesquisadores tem se dedicado à análise da Eficiência Energética Total de Fatores (EETF), utilizando a DEA. O EETF, proposto inicialmente por Hu e Wang (2006), pode ser definido como a razão entre o consumo de energia ideal e o consumo de energia

real, propondo assim, uma solução que utiliza o modelo DEA CCR para determinação do EETF.

Em um trabalho posterior, Zhang *et al.* (2011), motivados pelas limitações do modelo CCR quanto à necessidade das DMUs, neste modelo, operarem em uma escala ótima e também quanto à necessidade de uniformidade entre as características das DMUs, adaptaram o equacionamento inicialmente proposto para o modelo DEA BCC. Tomando-se como ponto de partida o modelo BCC orientado a entradas, é possível observar que a metodologia DEA permite identificar o ponto mais eficiente na fronteira como um alvo para as DMUs ineficientes atingirem (COELLI; RAO; BATTESE, 1998).

Na metodologia para cálculo do EETF desenvolvida por Hu e Wang (2006), a distância entre o ponto ineficiente e seu alvo, é chamada de ajuste radial, pelo fato de ajustar o nível de insumos (entradas). O valor da entrada de energia alvo é identificado através da técnica DEA em conjunto com outros insumos, de modo a produzir uma saída econômica. Portanto, para a DMU i no tempo t , a eficiência de energia definida conforme equação (17) é chamada de EETF.

$$EETF(i,t) = \frac{CRE(i,t)}{CEA(i,t)}, \quad (17)$$

sendo:

CRE o valor do consumo real de energia;

CEA o valor de energia alvo.

O valor do ajuste total da entrada de energia é considerado como a parte ineficiente do Consumo Real de Energia (CRE) para uma região. Quanto maior o valor do ajuste total de entrada, menos eficiente é o consumo de energia. Assim, se o valor do ajuste total de entrada de energia é igual a zero, então o consumo de energia nesta região é o Consumo de Energia Alvo (CEA), o que significa a máxima eficiência quando sua produção é maximizada.

Como o CEA é o melhor nível prático de entrada de energia em uma região, o CRE é, portanto, sempre menor ou igual a CEA. Isso faz com o índice EETF tenha seu valor sempre entre 0 e 1. Quando o nível da entrada real de energia de uma DMU é igual ao consumo energético alvo, o índice de EETF será igual a unidade.

Inversamente, se o nível de entrada de energia real está longe do consumo energético alvo, então o índice se aproxima de zero, o que representa uma baixa eficiência.

Zhang *et al.* (2011), acrescentaram a este modelo o conceito de Ajuste Total (AT), sendo obtido a partir da diferença entre os valores do CEA e CRE. Dessa forma:

$$AT = CEA - CRE. \quad (18)$$

O alvo para o CRE neste estudo é, portanto, a entrada de CEA menos o AT e representa um nível mínimo de prática de energia que deve ser tomado como um alvo para se otimizar o consumo de energia.

Assim sendo, para a DMU i no tempo t , o EETF é dado por:

$$EETF(I,t) = \frac{CEA(I,t) - AT(I,t)}{CEA(I,t)}. \quad (19)$$

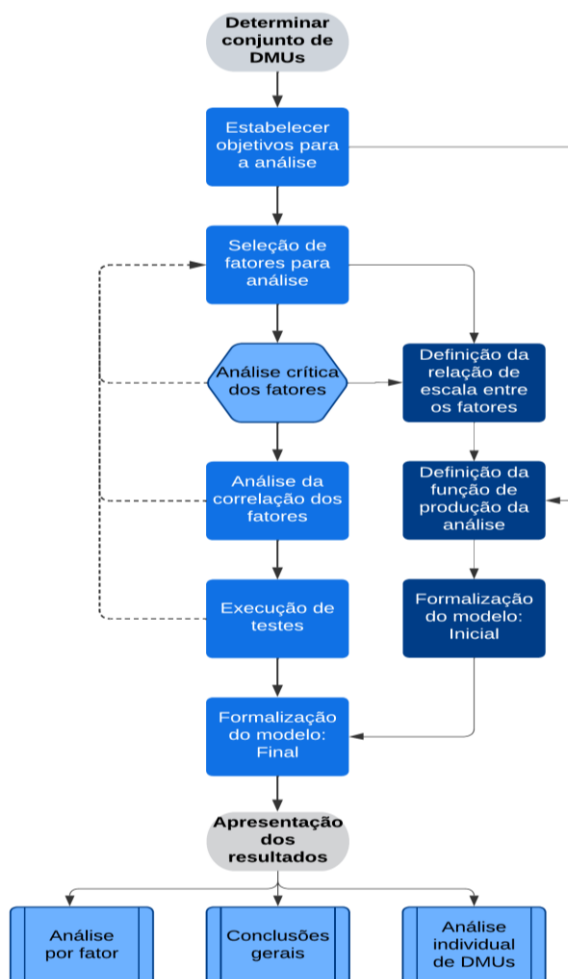
De acordo com o modelo, o AT será sempre maior ou igual a zero. Sendo que o AT igual a zero indica que a energia real consumida é de fato a entrada de energia do alvo, assim EETF é a unidade e a energia é utilizada na eficiência ideal. O EETF é menor do que a unidade se o total de ajustes são maiores do que zero. Isto implica que há uma fonte de energia redundante, que deve ser reduzida sem afetar a produção. Portanto, o índice de EETF está sempre entre zero e a unidade. Quanto maior o valor de EETF, mais eficiente o consumo de energia. Assim sendo, o modelo busca identificar para uma determinada DMU sob análise, o nível mínimo de consumo de energia em conjunto com outros insumos que propicie um valor máximo de saída.

O próximo capítulo apresenta a metodologia utilizada neste estudo, detalhando cada etapa do processo de aplicação da DEA. São descritos desde a seleção dos dados até a especificação do modelo adotado, bem como os critérios de avaliação empregados para interpretar a eficiência das unidades analisadas.

3 METODOLOGIA

A aplicação de qualquer abordagem analítica de avaliação requer um entendimento aprofundado da formulação de modelos, da seleção criteriosa de variáveis, das hipóteses subjacentes, da representação dos dados, da interpretação dos resultados e das limitações inerentes a essas metodologias (MAÇADA, BEEKER, 1999). A DEA não é uma exceção a essa premissa. O estudo de Golany, Roll (1989) propõe um procedimento para a aplicação do método DEA, ilustrado na Figura 22, que é utilizado na formulação do modelo e na simulação correspondente ao escopo deste trabalho.

Figura 22 – Fluxograma aplicação DEA



Fonte: Adaptado de GOLANY, ROLL (1989)

A aplicação do método deve abranger três fases no estudo da medida de eficiência: (1) a definição e seleção das Unidades de Decisão (DMUs); (2) a

identificação dos fatores, ou seja, das variáveis insumo (entradas) e produto (saídas) que são relevantes e adequadas para avaliar a eficiência relativa das DMUs selecionadas; e, por fim, (3) a simulação e análise dos resultados.

3.1 Seleção das DMUs

Para a aplicação da técnica DEA, é imprescindível que as unidades em análise formem um conjunto homogêneo, de modo a garantir que as comparações entre as DMUs sejam significativas. Um grupo de unidades pode ser considerado homogêneo para os propósitos da DEA quando:

- As unidades em questão desempenham funções equivalentes e perseguem objetivos semelhantes;
- Os insumos e produtos considerados, isto é, as variáveis de entrada e saída que caracterizam o desempenho de todas as unidades do grupo são idênticas, exceto por variações em intensidade ou magnitude;
- Todas as unidades comparadas operam sob as mesmas condições de mercado.

Uma vez definido um grupo homogêneo de unidades, o segundo passo consiste na determinação do tamanho do grupo de comparação. De acordo com Golany, Roll (1989), duas situações contraditórias podem surgir nesse contexto. Por um lado, há uma tendência de aumentar o número de unidades, uma vez que, em uma população mais ampla, existe uma maior probabilidade de que unidades de alto desempenho definam a fronteira de eficiência. Além disso, um conjunto com um maior número de unidades facilita a identificação das relações típicas entre entradas e saídas, bem como permite a inclusão de um maior número de variáveis na análise. Por outro lado, um grande número de unidades pode comprometer a homogeneidade do conjunto, aumentando a probabilidade de que alguns resultados sejam influenciados por fatores exógenos, o que não é desejável para a análise.

Dessa forma, Golany, Roll (1989) sugerem que, na definição do tamanho do conjunto de DMUs, uma regra a ser considerada é que o número de unidades deve ser, no mínimo, duas vezes superior ao número total de entradas e saídas consideradas.

Uma última consideração importante em relação à análise em janela refere-se à seleção das DMUs que compõem o modelo durante o processo de avaliação, sendo

esta influenciada por dois tipos de limites. O primeiro diz respeito às fronteiras organizacionais, físicas ou regionais que definem as unidades individuais. O segundo refere-se ao período utilizado para mensurar as atividades das DMUs, sendo preferível que os intervalos considerados sejam naturais e correspondam a ciclos sazonais.

A etapa final na determinação do conjunto de unidades consiste em “filtrar” as DMUs que podem ser consideradas *outliers*, ou seja, unidades ou períodos de tempo que se desviam da caracterização geral do grupo a ser analisado. É importante ressaltar que as considerações apresentadas se referem à aplicação do método DEA de maneira genérica. A pesquisa desenvolvida neste trabalho segue a mesma linha metodológica já testada por outros pesquisadores, entre os quais se destacam Hu e Wang (2006), Zhou, Ang (2008), Zhang *et al.* (2011), Souza (2012), e Camioto, Rebelatto e Rocha (2016), tratando-se, portanto, de uma metodologia previamente validada.

3.2 Seleção dos Fatores

Os fatores de avaliação são representados pelas variáveis de entrada e saída do processo produtivo analisado, e um dos principais desafios é a alta subjetividade envolvida na escolha desses fatores (JUBRAN, 2006). Experiências apresentadas por diversos pesquisadores revelam que a seleção adequada de variáveis de entrada e saída é crucial na aplicação do DEA para medir a eficiência de qualquer tipo de organização, pois determina o contexto da avaliação comparativa (YEH, 1996; MAÇADA, BEEKER, 1999).

Esta fase do processo envolve a identificação de um modelo de referência que descreva as relações de produção que regem as DMUs a serem analisadas. As variáveis devem ser devidamente classificadas como entradas ou saídas. Todos os insumos utilizados pelas DMUs são considerados entradas, enquanto as DMUs convertem esses insumos em produtos, caracterizando-se como saídas. Normalmente, o modelo de referência é elaborado com base em uma revisão da literatura, que pode ser acompanhada por um estudo empírico.

Os fatores escolhidos devem permitir uma clara distinção entre as unidades comparadas e servir de forma eficaz aos objetivos da análise. Este refinamento pode ser realizado em três estágios: (1) classificação crítica das variáveis; (2) análise

quantitativa e/ou qualitativa; e (3) escolha da ferramenta apropriada para a análise DEA.

Diversos autores indicam que a relação estabelecida entre as variáveis deve ser entre 4 a 5 vezes superior à quantidade de DMUs (ARAUJO, 2008). Cooper, Seiford e Tone (2007) definem que o número de DMUs deve ser pelo menos, três vezes maior que a quantidade de insumo m e produtos s . Com base nesses pressupostos, é possível definir a relação entre o número de variáveis e o tamanho da amostra (número de DMUs) conforme equação a seguir:

$$\begin{aligned} m * s, \\ 3 * (m + s), \end{aligned} \tag{20}$$

sendo:

n o número de DMUs;

m o número de entradas;

s o número de saídas.

Observa-se que não é necessário aplicar uma técnica específica para a seleção dos fatores quando há uma disponibilidade limitada de variáveis e um grande número de observações, ou nos casos em que o número de DMUs é reduzido em relação ao número de potenciais entradas e saídas. Nesse contexto, devem ser selecionados os fatores que melhor representam a performance das DMUs em análise (COOPER, SEIFORD, TONE, 2007).

3.3 Procedimento para aplicação do método DEA

A aplicação da DEA requer uma sequência estruturada de etapas. Inicialmente, deve-se realizar a seleção das DMUs, assegurando que estas sejam homogêneas, ou seja, que produzam os mesmos bens e serviços, utilizando insumos equivalentes.

O passo seguinte envolve a quantificação dos fatores selecionados. Para as variáveis quantitativas, é recomendado utilizar unidades de medida apropriadas e consistentes, de modo a representar corretamente as quantidades de insumos e

produtos envolvidos e permitir comparações diretas entre as DMUs. Já para as variáveis qualitativas, é necessário atribuir valores numéricos que permitam sua inclusão na avaliação matemática da eficiência. Nesta fase, é crucial considerar que os algoritmos computacionais podem ser sensíveis a valores iguais a zero, que podem surgir devido a períodos que não correspondem ao ciclo natural das operações ou a outros fatores que influenciam os dados. Em tais casos, é possível redefinir os períodos considerados ou acumular dados ao longo de vários intervalos, evitando, assim, a presença de valores nulos.

O próximo passo consiste em classificar as variáveis como entradas ou saídas. Embora, na maioria das situações, essa classificação seja direta, algumas variáveis podem ser interpretadas tanto como entradas quanto como saídas, dependendo da escolha metodológica, ou podem apresentar efeitos de feedback. Ademais, uma análise de correlação pode ser realizada para identificar a relação entre as variáveis de entrada e saída. Conforme Golany, Roll (1989), uma correlação fraca para determinadas variáveis pode indicar a necessidade de reexame e, se necessário, a exclusão dessas variáveis da análise. Por outro lado, correlações fortes podem sugerir que a informação fornecida por uma variável já está representada por outra, tornando sua exclusão uma opção viável. Além disso, se uma variável apresentar correlação fraca com as entradas e forte com as saídas, poderá ser classificada como entrada, enquanto o resultado inverso indicaria que se trata de uma saída. Portanto, a análise de correlação contribui para a eliminação de informações incorretas (HAYNES, DINC, 2005).

Considerando que a metodologia empregada nesta pesquisa já foi validada por outros autores, conforme mencionado anteriormente, optou-se por não aplicar a análise de correlação na determinação dos fatores de avaliação.

A etapa subsequente envolve a seleção do modelo DEA mais apropriado para o processamento das informações. No que diz respeito ao retorno de escala, existem dois modelos básicos, o CCR e o BCC. A restrição de convexidade na formulação do modelo BCC garante que a unidade comparada tenha um tamanho de escala semelhante ao da unidade avaliada. O escore de eficiência obtido com o modelo BCC é, no mínimo, igual ao escore obtido com o modelo CCR. Em relação à orientação do modelo, em alguns casos, as entradas podem ser particularmente inflexíveis, tornando mais adequado o uso de um modelo orientado para as saídas. Por outro lado, quando

as saídas estão ajustadas a metas pré-definidas ou limitadas por condições ambientais, recomenda-se a adoção de um modelo orientado para as entradas.

O último passo consiste na exploração das diversas ferramentas computacionais e soluções tecnológicas que possibilitam a incorporação do método DEA em sistemas de apoio à decisão. Estudos de Haynes, Dinc (2005), Barr (2004) e Meza *et al.* (2005) descrevem as principais características dessas ferramentas, apresentando uma análise crítica e comparativa dos pacotes de software mais relevantes para a aplicação da DEA, tanto comerciais quanto não comerciais. No Apêndice B, é apresentada uma comparação detalhada das principais ferramentas computacionais que permitem a implementação do método DEA.

Embora os softwares comerciais e de código aberto ofereçam praticidade e uma ampla gama de modelos e recursos para a aplicação da DEA, a capacidade de programar modelos DEA em uma planilha eletrônica ou em outras linguagens de programação representa uma vantagem significativa. Essa abordagem confere uma flexibilidade considerável na implementação dos modelos, permitindo não apenas adaptações personalizadas, mas também a exploração de inovações no processo analítico.

O R (<http://www.r-project.org/>) é um software livre e de código aberto, altamente extensível, que oferece uma ampla gama de funções para análise de dados e criação de gráficos, tanto por meio de suas funções nativas quanto por meio de pacotes (*packages*) disponíveis na internet. Este software inclui dois pacotes principais dedicados aos modelos de DEA: o FEAR (*Frontier Efficiency Analysis with R*) e o *Benchmarking* (BOGETOFT, OTTO, 2011). Ademais, o R transcende a simples biblioteca de pacotes, pois permite a criação de programas e pacotes personalizados. Assim, a utilização do R possibilita a obtenção de soluções de baixo custo, evitando as limitações frequentemente associadas a softwares dedicados exclusivamente à aplicação de modelos DEA.

Neste trabalho, optou-se pela utilização do programa R, especificamente com a biblioteca de pacotes *Benchmarking*, em virtude de suas capacidades robustas para o processamento de análises DEA em janela. Esta ferramenta permite a elaboração de interfaces gráficas amigáveis, uma fácil integração ao Excel e apresenta uma documentação abrangente. A referida documentação inclui exemplos de aplicação que estão contidos no livro *Benchmarking with DEA, SFA, and R*, de Bogetoft, Otto (2011).

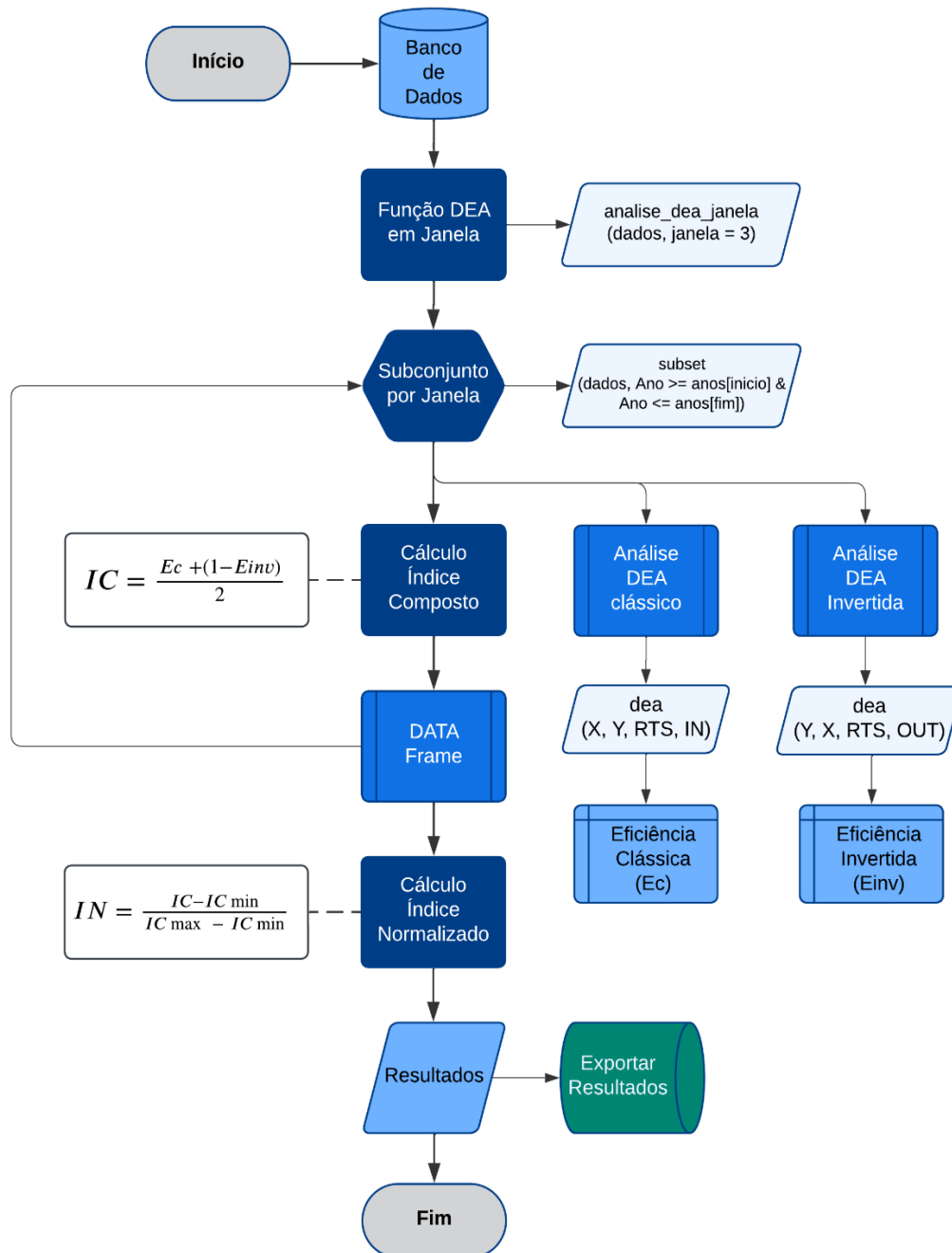
A seguir, são elencadas as principais características do *Benchmarking* no R, conforme apresentado por Bogetoft, Otto (2024):

- Função *dea()*: função principal para calcular a eficiência das DMUs, utilizando diferentes orientações e retornos de escala. Permite a realização de análises DEA com múltiplos inputs e outputs;
- Fronteira Invertida: permite o cálculo da fronteira invertida, onde os papéis de inputs e outputs são invertidos;
- Análise de Janelas: a função *dea()* pode ser aplicada em janelas temporais para analisar a eficiência das DMUs ao longo do tempo, permitindo a comparação de sua evolução em períodos consecutivos;
- Função *eff()*: extrai os escores de eficiência calculados pela análise DEA.
- Visualização de Resultados: funções como *dea.plot()* permitem a geração de gráficos da fronteira de eficiência e a comparação entre DMUs.

Essas funcionalidades tornam o pacote *Benchmarking* uma ferramenta de grande viabilidade para realizar estudos de eficiência e produtividade com DEA. Dado a escolha do programa utilizado, foi necessário elaborar uma rotina em linguagem R para executar a DEA.

Propôs-se um procedimento para o desenvolvimento do algoritmo, o qual é apresentado na Figura 23. O processo começa com a importação de dados de um banco que contém informações sobre as entradas e saídas de cada DMU. A análise é feita em janelas de três anos, segmentando o período total e selecionando dados dentro de cada intervalo temporal. Em cada janela, são realizadas duas análises de eficiência: a DEA clássica (com entradas *X* e saídas *Y*, e orientação para a entrada) e a DEA invertida (com papéis trocados e orientação para a saída). A partir dessas análises, calcula-se o índice composto (IC), que é normalizado (IN) para facilitar comparações entre DMUs e períodos. Os resultados são organizados em um *dataframe* e exportados para o Excel onde se realizou o cálculo do índice de EETF para cada janela gerada, para posteriormente, calcular o EETF médio de cada ano para sua respectiva DMU. Entretanto, como obteve-se mais de uma DMU *benchmark* para o método DEA clássico, foram calculados anteriormente os índices normalizados, utilizando-se dos índices compostos por meio do método DEA fronteira invertida. Dessa maneira, foi necessário estabelecer um critério para utilização dos índices normalizados.

Figura 23 – Fluxograma do algoritmo implementado no software R

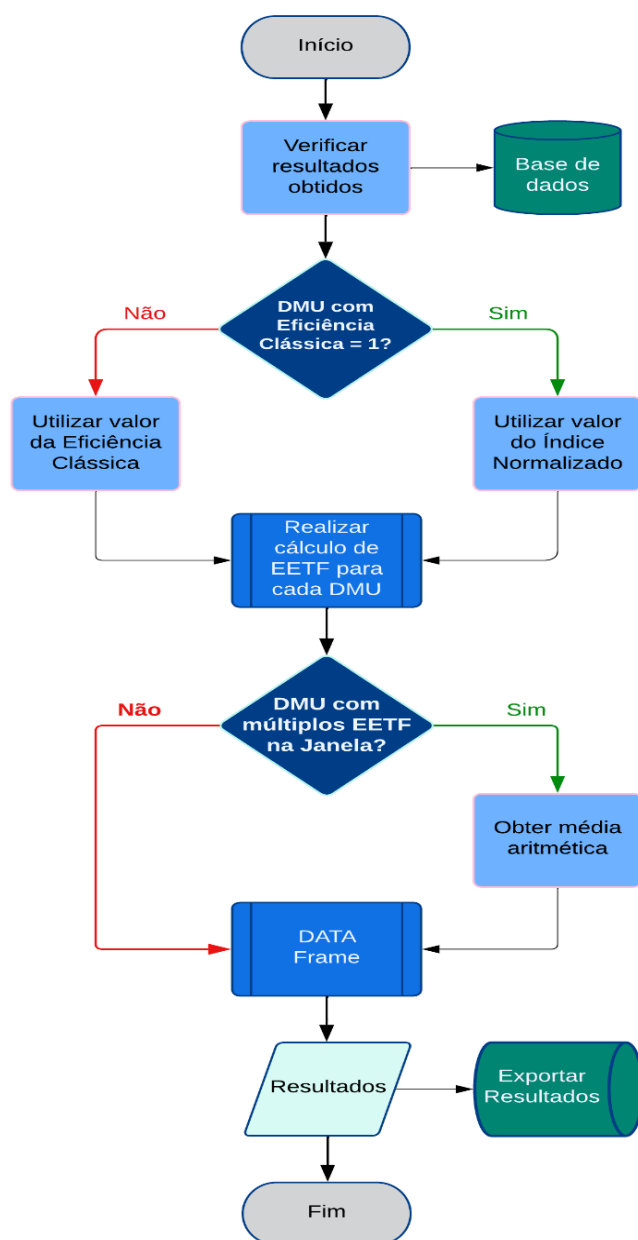


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 24 mostra a sequência de etapas e decisões realizadas para o processo de cálculo do índice de EETF. Inicialmente, verifica-se se alguma DMU possui E_c igual a 1. Se este for o caso, utiliza-se o IN ; caso contrário, adota-se o valor da E_c . Em seguida, procede-se ao cálculo do EETF para cada DMU. Quando há múltiplos valores de EETF para a mesma DMU dentro de uma janela de análise de 3

anos, calcula-se a média aritmética desses valores; caso contrário, mantém-se o valor único. Os resultados são, então, organizados em um *dataframe* e exportados para análises subsequentes. Esse processo visa garantir que apenas uma DMU seja plenamente eficiente em cada janela, além de realizar o cálculo do índice de EETF adequadamente.

Figura 24 – Critério para seleção do índice normalizado



Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, com o propósito de realizar uma análise comparativa do desempenho energético dos países membros do G20, no intervalo entre os anos de 2000 e 2022, bem como avaliar a posição do Brasil nesse contexto, determinados passos do procedimento metodológico foram ajustados. Alguns destes foram suprimidos por se mostrarem desnecessários ou inaplicáveis ao contexto específico da presente investigação. Assim, o conjunto de dados resultantes é composto por 19 países (logo, número de DMUs=19). O método DEA foi aplicado com base em uma função de produção econômica para a determinação do EETF. Dessa forma, foi utilizado um modelo orientado a entrada e a fronteira de eficiência estabelecida pela DEA, composta pelos países de melhor eficiência, que servem como base para o cálculo de eficiência dos demais países.

A formulação BCC foi adotada por ser menos restritiva, considerando que os países analisados apresentam diferentes tamanhos, o que pode influenciar sua capacidade de produção de saídas de forma eficiente. Além disso, sendo esta uma análise que abrange um período de tempo, a suposição CCR seria inadequada, pois não refletiria com precisão as variações na eficiência entre as diferentes unidades avaliadas. Além disso, foram calculados o índice normalizado e o índice composto, segundo a técnica da fronteira invertida, conforme descrita no item 2.3.1. Avaliou-se esta técnica como adequada, uma vez que o índice composto considera que todos os fatores em análise são importantes, distribuindo igualdade nas entradas, e o índice normalizado, visto que com a fronteira clássica se obtinha mais de uma DMU *benchmark*.

Para a análise dos resultados obtidos, é fundamental, primeiramente, estabelecer algumas considerações acerca das variações no consumo de energia entre os países.

A IE de um país em determinado período está sujeita a diversos fatores, tais como: a natureza das atividades econômicas, as variações na composição do produto, influenciadas pela participação de setores com diferentes intensidades de uso de energia, e as combinações de capital, força de trabalho e energia, que podem ser modificadas em função da variação dos preços relativos, de melhorias técnicas ou do progresso tecnológico. Além disso, o consumo de energia também é impactado por variáveis como o clima, o nível de desenvolvimento, os estilos de vida, o setor de

transportes, o setor industrial, e a eficiência no uso final da energia, incluindo equipamentos e edificações (WEC, 2010).

Outra constatação importante é que a indústria intensiva resulta em índices de IE seis vezes maior do que do setor de serviços. A participação da indústria no PIB varia de 18% na América do Norte, a 24% na Europa, cerca de 25% na Índia e África, e cerca de 30% para América Latina. Por sua vez, a participação do setor de serviços é de cerca de 55% na Ásia, 60% na América Latina, 65% na Europa e 75% na América do Norte (O'NEIL, 2024).

É importante observar que os países em desenvolvimento, de maneira geral, apresentam um consumo de energia per capita relativamente baixo (WEC, 2010). Em 2022, por exemplo, o consumo de energia per capita no Brasil correspondia a aproximadamente 29% do consumo per capita dos países membros da OCDE. Essa realidade torna inevitável o aumento no consumo de energia, uma vez que há uma demanda crescente por infraestrutura industrial, transporte e desenvolvimento urbano, que são fundamentais para sustentar o progresso econômico e social desses países. Essa situação é corroborada por estudos que indicam que a necessidade de expansão da infraestrutura e a urbanização acelerada frequentemente impulsionam o aumento da demanda energética, refletindo as particularidades do desenvolvimento econômico em contextos distintos.

Essas observações refletem as dinâmicas complexas entre crescimento econômico, EE e inovação tecnológica, que podem variar amplamente entre diferentes contextos nacionais.

4.1 Análise 1

A primeira análise desenvolvida objetivou estabelecer o EETF dos países do conjunto de DMUs selecionadas no período de 2000 a 2022. Portanto, o período de análise corresponde a 23 anos ($T=23$). Foram considerados quatro fatores de avaliação, sendo três entradas ($m=3$) e uma saída ($s=1$), sendo:

- Intensidade energética: entrada de valores em quilo toneladas equivalentes de petróleo (ktep). Refere-se à energia primária total consumida pelo PIB, que é equivalente à produção interna mais as importações, subtraídas as

exportações e combustíveis fornecidos a navios e aeronaves utilizados no transporte internacional (WORLD BANK, 2024d);

- Força de trabalho: entrada definida como o número de pessoas com idade a partir de 15 anos e que se enquadram na definição da Organização Internacional do Trabalho (OIT), como população economicamente ativa, ou seja, todas as pessoas que constituem oferta de trabalho para a produção de bens e serviços durante um determinado período. Inclui tanto os empregados, quanto os desempregados e as forças armadas. No entanto, não inclui trabalhadores não registrados e trabalhadores do setor informal (WORLD BANK, 2024b);
- Capital bruto: entrada com valores em percentagem do PIB. Refere-se a parcela do capital total que é investido em ativos fixos (tais como terrenos, edifícios, veículos, instalações e equipamentos) que permanecem nesta condição de ativo fixo num prazo superior a um período contábil. A formação bruta de capital é composta pelas adições aos ativos fixos da economia mais variações líquidas no nível dos estoques somados aos melhoramentos de terrenos, compra de máquinas e equipamentos, construção de estradas, ferrovias, e similares, incluindo escolas, escritórios, hospitais, habitações particulares residenciais e edifícios comerciais e industriais, sendo que as aquisições líquidas de valores também são consideradas formação de capital. (WORLD BANK, 2024c); e
- PIB: saída definida como o valor bruto (valores monetários) de todos os bens e serviços finais produzidos em um país, somados aos impostos sobre os produtos e subtraídos de quaisquer subsídios não incluídos no valor dos produtos. Calcula-se sem fazer deduções para depreciação de bens fabricados ou para a exaustão e degradação dos recursos naturais. O valor utilizado é o produto interno bruto convertido em dólares internacionais (constantes de 2005), com taxas de paridade de poder aquisitivo. O uso de taxas de paridade de poder aquisitivo ao invés de taxas de câmbio visa padronizar valores para os níveis de desenvolvimento econômico entre países e regiões e por conseguinte melhorar a análise comparativa (WORLD BANK, 2024).

Com base nos pressupostos apresentados anteriormente, a relação entre a quantidade de variáveis e a quantidade de DMUs é dada pela equação (20). Observa-se que a relação é satisfeita, já que $n=19$, $m=3$ e $s=1$.

Seguindo o que foi exposto na Análise de janela presente no item 2.3.2, optou-se pela utilização de janelas com 3 períodos ($w=3$). Nota-se, como já foi observado anteriormente que, todas as unidades dentro de uma determinada janela são medidas umas contra as outras. Assim, esta abordagem pressupõe implicitamente que não há mudanças técnicas dentro de cada janela. Desta forma para $w=3$ períodos, $T=23$ anos e $n=19$ DMUs, aplicando-se as equações da Análise de janela do item 2.3.2 tem-se:

nº de janelas (z) = 21;

nº de DMUs “diferentes” = 1197;

Δ nº de DMUs = 760, sendo que Δ representa o acréscimo no número de DMUs em relação ao que seria considerado na análise DEA sem a tratativa dispensada às janelas temporais, ou seja, $n^\circ DMUs = T * n$.

Assim, os três primeiros anos de 2000, 2001 e 2002 formam a primeira janela. A janela se move em um período de um ano, deixando de lado a formação original e acrescentando um novo ano. A segunda janela será formada pelos anos de 2001, 2002 e 2003. O processo continua até a última janela constituída pelos três últimos anos, ou seja, 2020, 2021 e 2022. Para cada país (DMU) analisado foram calculados, portanto, três valores de EETF em cada ano, com exceção de 2001 e 2021, que têm dois valores, e 2000 e 2022, que têm apenas um valor.

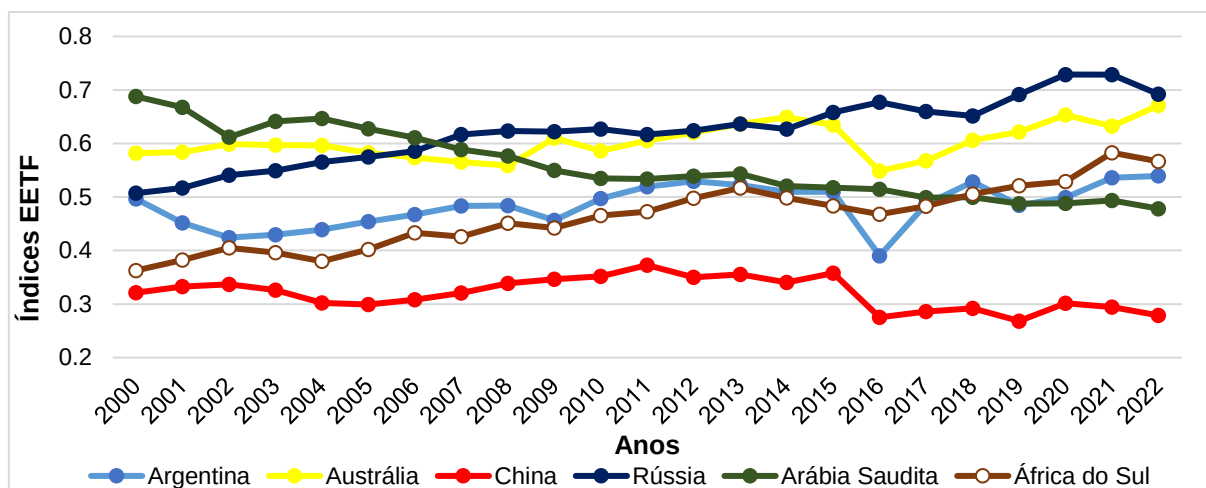
Destaca-se que todos os valores utilizados nesta análise estão presentes no Apêndice D.

Seguindo o mesmo método utilizado por Souza (2012), foi calculada a média dos resultados dos índices de EETF de cada país no mesmo ano. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 25, 26, 27, 28 e Tabela 2. Dados complementares referentes a esta análise estão no Apêndice D.

A Figura 25 refere-se aos países com valores de EETF médio até 0,7, ou seja, os países com os índices mais baixos de eficiência. São eles: Argentina, Austrália, China, Rússia, Arábia Saudita e África do Sul. Neste grupo, observa-se que China e

Arábia Saudita são os únicos países que apresentaram tendência decrescente entre os valores de 2000 e 2022; Argentina e Austrália tiveram seus valores oscilando em torno de um mesmo valor e Rússia e África do Sul apresentaram tendência crescente.

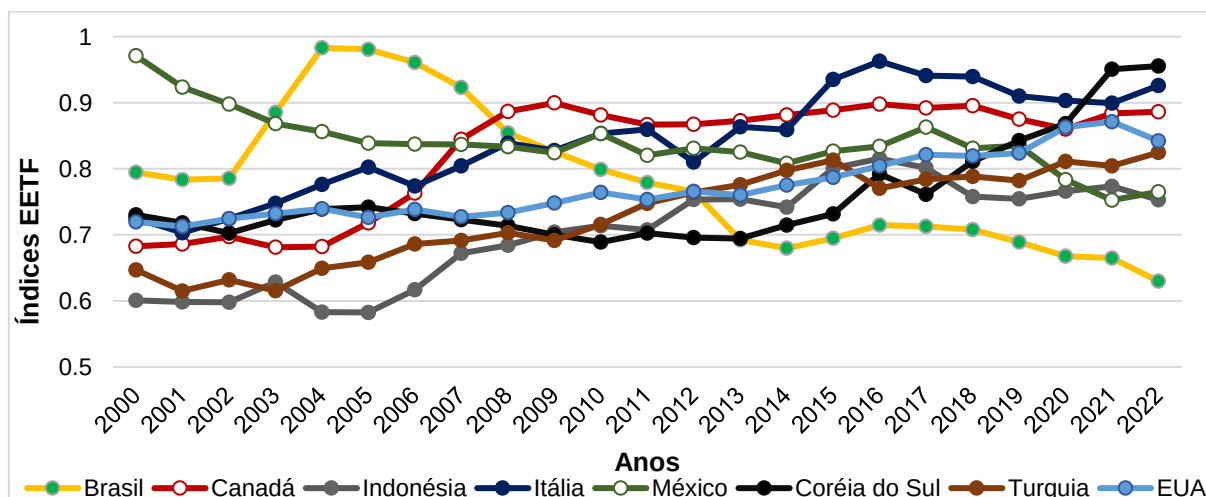
Figura 25 – Índices de EETF médio até 0.7



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Figura 26 pode-se observar os países com valores de EETF médio entre 0,7 e 0,9, ou seja: Brasil, Canadá, Indonésia, Itália, México, Coreia do Sul, Turquia e EUA. Dentre estes países, Brasil e México, tiveram queda entre os valores relativos a 2000 e 2022; nenhum país apresentou resultados oscilantes em torno de um mesmo valor, considerando até 1,0 de variação. Canadá, Indonésia, Itália, Coreia do Sul, Turquia e EUA apresentaram tendência de crescimento em seus resultados.

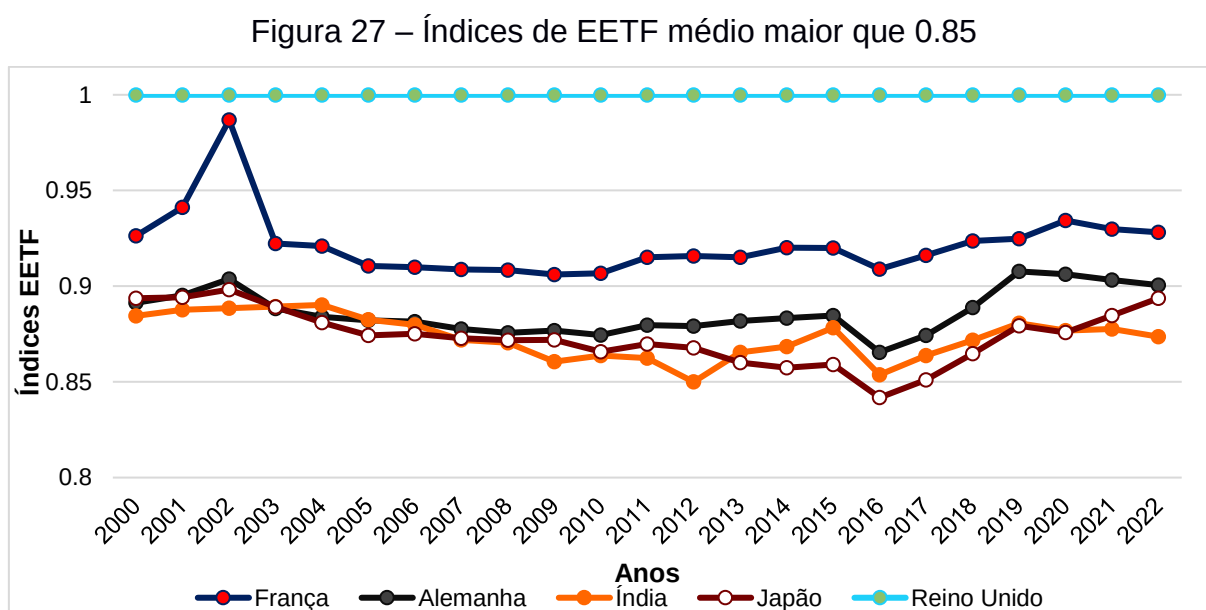
Figura 26 – Índices de EETF médio acima de 0.7 e menor que 0.85



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 27 representa os valores de EETF médio obtidos para França, Alemanha, Índia, Japão e Reino Unido, países com EETF médio entre 0,85 e 1,0, ou seja, os países com melhor eficiência.

O Reino Unido apresentou durante todo o período considerado valor relativo igual a 1,0. Para os demais países, França, Alemanha, Índia e Japão, os valores oscilaram no período considerado, ou seja, não se observa tendência de crescimento ou declínio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que os resultados obtidos retratam a posição comparativa dos países considerados. O EETF de um país em um determinado ano é contrastado com seu próprio EETF em outros anos, além do EETF dos outros países. Assim sendo, os resultados obtidos não devem ser considerados em seus valores absolutos, mas são úteis para o estabelecimento de tendências.

A Tabela 2 apresenta uma classificação para os países membros do G20 dentro do período analisado, evidenciando as informações trazidas pelas Figuras 25, 26 e 27. Assim, nota-se que o Reino Unido foi o país que apresentou melhor índice de eficiência, seguido pela França (2º), Alemanha (3º) e Índia (4º). Por sua vez, China (19º), África do Sul (18º), Argentina (17º) e Arábia Saudita (16º), apresentaram os piores índices. O Brasil ficou posicionado no meio da tabela, ocupando a nona colocação (9º).

Tabela 2 – Classificação EETF do G20 entre os anos de 2000 e 2022

Países	Média	Classificação
Reino Unido	1	1
França	0,922	2
Alemanha	0,886	3
Japão	0,874	4
Índia	0,873	5
Itália	0,843	6
México	0,840	7
Canadá	0,826	8
Brasil	0,782	9
EUA	0,772	10
Coréia do Sul	0,758	11
Turquia	0,729	12
Indonésia	0,703	13
Rússia	0,623	14
Austrália	0,604	15
Arábia Saudita	0,559	16
Argentina	0,484	17
África do Sul	0,464	18
China	0,320	19

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Análise 2

A segunda análise foi desenvolvida seguindo os mesmos procedimentos realizados na primeira análise, adicionando-se, neste caso, as emissões de CO₂. Dessa forma, foram utilizados os mesmos fatores no mesmo período analisado da Análise 1, com a inclusão das emissões de CO₂ como uma saída indesejável. Assim, foram considerados cinco fatores de avaliação, com quatro entradas ($m=4$) e uma saída ($s=1$), sendo:

- Consumo Total de Energia Primária (entrada);
- Força de Trabalho (entrada);
- Capital (entrada);
- Emissões de CO₂: entrada de valores em kt obtidos e definidos como as emissões totais anuais de dióxido de carbono decorrentes da queima de combustíveis fósseis e do uso da terra. Incluem o dióxido de carbono produzido durante o consumo de combustíveis sólidos, líquidos, gasosos e da queima de gás (ANDREW, PETERS, 2024);
- PIB (saída).

Observa-se que também para a Análise 2, como $n=19$, $m=4$ e $s=1$, a relação estabelecida pela equação (20) também é satisfeita.

Optou-se pela utilização de janelas com 3 períodos ($w=3$), de maneira análoga à análise anterior. Desta forma para $w=3$ períodos, $T=23$ anos e $n=19$ DMUs, aplicando-se as equações do item 2.3.2 tem-se:

nº de janelas (z) = 21;

nº de DMUs “diferentes” = 1197;

Δ nº de DMUs = 760.

Conforme previamente justificado, adotou-se a formulação BCC orientada à entrada, com a utilização do cálculo do índice composto. Cabe destacar que foram avaliadas duas abordagens para a incorporação de saídas indesejáveis no modelo: a primeira consistiu na utilização dos dados em valores negativos, enquanto a segunda envolveu a inclusão dos dados em valores positivos tratados como entradas, conforme a metodologia proposta por Dyson et al. (2001). A abordagem de utilizar dados com valores negativos envolve transformar os valores das saídas indesejáveis em números negativos. Assim, o modelo DEA trata essas saídas como algo que precisa ser minimizado automaticamente, sem alterar diretamente a estrutura do modelo. A outra abordagem é tratar a saída indesejável como uma entrada adicional no modelo. Isso faz sentido porque produzir mais dessa saída indesejável “consome” eficiência (como se fosse um custo). Observou-se que, como a DEA é flexível em sua estrutura matemática, ambas as abordagens capturam o impacto negativo das saídas indesejáveis de forma equivalente, resultando em resultados similares. Dessa forma, optou-se por utilizar a abordagem baseada em dados com valores positivos de entrada.

A partir da análise dos resultados, conclui-se que a consideração das emissões de CO₂ como um fator indesejável no processo produtivo não gerou variações significativas em relação à análise inicial. A Tabela 3 apresenta a classificação dos países membros do G20 com base na análise realizada, estabelecendo uma comparação com os dados obtidos na seção Análise 1, permitindo uma avaliação mais aprofundada das implicações metodológicas. Dados complementares referentes a esta análise estão no Apêndice E.

Tabela 3 – Comparação entre as Análises 2 e 1

Países	Análise 2	Análise 1	Variação
Reino Unido	1	1	0,00%
França	0,921	0,922	-0,11%
Alemanha	0,875	0,886	-1,24%
Japão	0,874	0,874	0,00%
Índia	0,871	0,873	-0,23%
Itália	0,840	0,843	-0,47%
México	0,840	0,840	0,00%
Canadá	0,838	0,826	1,45%
Brasil	0,787	0,782	0,64%
EUA	0,771	0,772	-0,13%
Coréia do Sul	0,757	0,758	-0,13%
Turquia	0,729	0,729	0,00%
Indonésia	0,702	0,703	-0,14%
Rússia	0,620	0,623	-0,48%
Austrália	0,603	0,604	-0,17%
Arábia Saudita	0,565	0,559	1,07%
Argentina	0,493	0,484	1,86%
África do Sul	0,473	0,464	1,94%
China	0,317	0,320	-0,94%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos resultados permite concluir que a inclusão das emissões de CO₂ como um fator indesejável no processo produtivo não resultou em variações significativas em relação aos resultados da primeira análise, mantendo a classificação.

4.3 Discussão

Após a apresentação dos resultados obtidos, é imprescindível dar continuidade à discussão e à interpretação desses dados, à luz dos objetivos estabelecidos neste estudo. Nesse contexto, serão analisados os índices de EETF obtidos, com ênfase na comparação dos resultados entre os diferentes países ao longo das janelas temporais. A discussão centrará nos fatores contextuais específicos de cada país, como políticas energéticas, legislações vigentes e crises enfrentadas, os quais podem ter exercido influência direta sobre os resultados. Nesse sentido, será investigada a inter-relação entre esses fatores e os índices de eficiência observados, com o objetivo de compreender de que maneira as características econômicas e energéticas de cada país impactaram os resultados da análise.

Nesta primeira análise, observa-se os países com melhores índices de eficiência, conforme Figura 27 e Tabela 2. São eles: Reino Unido, França, Alemanha, Japão e Índia (Nota-se a representação de dois continentes, Europa e Ásia).

- **Reino Unido**

Em particular o Reino Unido, para o grupo de países e período analisado, apresenta valores de EETF de 1,0 que se mantêm constantes ao longo do período estudado, sendo, portanto, o país mais eficiente e servindo de parâmetro para análise comparativa de todos os outros países. Este resultado justifica-se pelo fato de apresentar valores mínimos para as relações de IE (minimização de 48%), e crescimento econômico (o PIB britânico cresceu em 130% entre 2000 e 2022). Além disso, apresenta valores máximos para capital e também o maior índice de força de trabalho. Logo, os resultados alcançados pelo Reino Unido podem estar mais relacionados à natureza das atividades econômicas, o nível de desenvolvimento, do que à maximização da eficiência do consumo energético, embora, o Reino Unido tenha implementado várias políticas para melhorar a EE e reduzir as emissões de GEE. Esses esforços foram em grande parte impulsionados pelos compromissos britânicos com a redução das emissões de carbono, tanto a nível doméstico quanto internacional.

O Programa de Mudança Climática foi introduzido no ano 2000 para ajudar o Reino Unido a cumprir os compromissos assumidos no Protocolo de Kyoto, visando reduzir as emissões de GEE (UNITED KINGDOM, 1997; DEMERITT, LANGDON, 2004). O programa incluía medidas para melhorar a EE em edifícios, indústria e transporte (UNITED KINGDOM, 1997).

O Plano de Carbono, introduzido em 2011, estabeleceu metas de longo prazo para reduzir as emissões em 80% até 2050 (em comparação com os níveis de 1990) e focou em melhorar a EE em todos os setores, incluindo transportes, residências e indústrias (UNITED KINGDOM, 2011).

Em 2017, a Estratégia de Crescimento Limpo, delineou como o Reino Unido planejava cumprir suas metas de emissões de carbono, com foco em eficiência energética em residências, edifícios comerciais e indústria (UNITED KINGDOM, 2017). Também destacou o papel de tecnologias como contadores inteligentes e aquecimento de baixo carbono.

A Meta de Emissões Líquidas Zero, de 2019, estabeleceu uma meta legal de emissões líquidas zero até 2050. Melhorar a eficiência energética foi identificado como um componente crucial para atingir essa meta, incluindo a descarbonização de edifícios e transporte (UNITED KINGDOM, 2023).

O Reino Unido alcançou avanços significativos na promoção da eficiência energética, destacando-se por legislações pioneiras e metas ambiciosas. Contudo, a implementação de determinados programas enfrentou desafios, e a persistente dependência de combustíveis fósseis limitou o progresso em setores específicos. Dessa forma, os resultados das políticas de eficiência energética podem ser considerados heterogêneos, caracterizados por expressivas conquistas, mas também por retrocessos e oportunidades não aproveitadas.

- **França**

A França tem seu índice de EETF praticamente constante, porém apresentou um pico no início da década de 2000, alcançando 0,98 no ano de 2002. Nota-se que embora seu PIB tenha apresentado um baixo crescimento no começo da década de 2000, e pouca variação da força de trabalho e IE, seu capital diminuiu no período estabilizando em 2003 e desde então mantendo um crescimento. Esse fator, alinhado com algumas medidas significativas relacionadas à EE podem indicar o pico de eficiência no início da década de 2000.

Aprovada em 2001, a França começou a implementar a Diretiva de Eficiência Energética da União Europeia, que exigia que os países membros adotassem ações concretas para melhorar a eficiência energética em setores como construção, transporte e indústria (MTES, 2023). Como parte desta implementação, foram estabelecidos padrões mais rígidos para edifícios e residências, além disso, o governo francês incentivou o uso de energias renováveis e aumentou os esforços para desenvolver uma matriz energética mais diversificada (ODYSSEE-MURE, 2021; BELTRAN, 2017). No ano seguinte, em 2002, foi lançada a Lei de Orientação sobre a Energia, um marco regulatório que estabeleceu as bases para a política energética da França nas próximas décadas (IEA, 2021b; BELTRAN, 2017).

Apesar dos avanços nas políticas energéticas, a França enfrentou dificuldades na implementação de medidas mais robustas para a renovação de edificações antigas e no crescimento mais expressivo de energias renováveis (ODYSSEE-MURE, 2021). A dependência da energia nuclear também limitou os avanços em outras fontes de

energia (LAMNATOU, CRISTOFARI, CHEMISANA, 2024). Assim, embora o início da década de 2000 tenha sinalizado perspectivas promissoras para a consolidação de um caminho mais definido em direção à eficiência energética, persistiram desafios significativos relacionados à adaptação e à execução eficaz dessas políticas.

- **Alemanha**

A Alemanha tem sua relação de PIB e capital com valores que dobraram no período analisado, porém em uma faixa de valores inferior aos apresentados pela França. A força de trabalho tem valores baixos e praticamente constantes e a IE decrescente basicamente para todo o período analisado. Isto resulta em valores de EETF oscilantes de 0,87 e 0,89 até o ano de 2015 quando decai para 0,85, atingindo seu valor mais baixo, e depois se recuperando até igualar seu valor de pico, atingido em 2002, sendo este 0,90. A Alemanha vem se destacando desde a última década como um dos países líderes em EE, com sua iniciativa de transição energética buscando aumentar significativamente o uso de energias renováveis, como a solar e a eólica, enquanto reduz as emissões de carbono (BUNDESREGIERUNG, 2021). No entanto, também enfrentou desafios e críticas, incluindo questões de custos e integração de energias renováveis intermitentes (CASTRO, 2018).

A Lei de Energias Renováveis de 2000 foi um marco ao estabelecer um sistema de tarifas *feed-in* para apoiar o crescimento das energias renováveis, incentivando fortemente a expansão de fontes como a eólica e a solar (BMU, 2000; GOTZ *et al.*, 2011). A ação implementada é considerada um sucesso, resultando em um aumento significativo da capacidade de energias renováveis ao longo das décadas seguintes.

O plano de transição energética da Alemanha, conhecido como *Energiewende*, foi introduzido em 2010 e tinha como objetivo reduzir as emissões de GEE, aumentar o uso de energias renováveis e melhorar a EE (GONÇALVES, 2015; CHEN, 2024). Para tanto, estabelecendo a meta de diminuir o consumo de energia em 50% até 2050 e cortar as emissões de CO₂ em 80% a 95% (Valores em comparação com 1990) (GONÇALVES, 2015).

Embora a Alemanha tenha avançado na promoção de energias renováveis, a transição energética foi dificultada pela contínua dependência do carvão (IEA, 2020). A decisão de eliminar gradualmente a energia nuclear após o desastre de *Fukushima*, em 2011, aumentou temporariamente essa dependência, tornando mais difícil a redução imediata das emissões de carbono (CASTRO, 2018).

A guerra entre Rússia e Ucrânia, em 2022, destacou essa dependência da Alemanha em relação ao gás natural russo para a geração de energia foi vista como uma vulnerabilidade estratégica, gerando um debate sobre a segurança energética no país, forçando a Alemanha a reavaliar sua política energética, incluindo a eficiência no uso de recursos e a diversificação de fontes (PÉREZ, 2023).

Esses marcos refletem o compromisso da Alemanha com a transição energética, evidenciando, contudo, os desafios enfrentados pelo país na complexa tarefa de conciliar o crescimento econômico, a segurança energética e os objetivos de sustentabilidade.

- **Japão**

O Japão tem sua relação de PIB com valores que dobraram no período analisado, porém ainda sim apresentando um valor abaixo dos demais países desse bloco. A força de trabalho apresenta a quarta (4º) menor taxa de crescimento com 8%, a IE apresentou uma melhora de 33% (acima da média de 27,5% dos países analisados), o capital apresentou um crescimento de 67%, porém, em valores brutos, representa o crescimento mais baixo. Isto resulta em índices de EETF oscilantes entre 0,84 e 0,89. Nota-se que o perfil energético trazido pelo índice EETF do Japão é semelhante ao alemão, sendo que as diferenças se amplificam após 2011.

O ano de 2011 é marcado no Japão pelo terremoto de *Tohoku* e o desastre nuclear de *Fukushima*, fazendo com que o governo fechasse grande parte de suas usinas nucleares, levando a uma crise de energia (KOPPENBORG, 2021; AKIYAMA., *et al* 2012). Isso forçou o país a repensar sua política energética, com um enfoque maior na EE e no uso de energias renováveis (KOPPENBORG, 2021; AKIYAMA., *et al* 2012). O Japão acelerou os esforços para reduzir o consumo de energia por meio de iniciativas de conservação e programas de eficiência tanto para a indústria quanto para os consumidores. Assim, embora a IE tenha reduzido nesse ano, esse impacto não foi amenizado nos demais aspectos, sendo provavelmente, catalizador para os anos seguintes.

Em outubro de 2020, o Japão anunciou formalmente seu compromisso de atingir a neutralidade de carbono até 2050, um marco importante para suas políticas energéticas e climáticas (OZAWA, TSANI, KUDOH, 2022). Este objetivo implica uma transformação significativa da matriz energética do país, com um foco crescente na EE como componente-chave para alcançar a meta. Esse compromisso foi reforçado

em 2021, quando o Japão atualizou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (do inglês, *Nationally Determined Contribution* – NDC) no âmbito do Acordo de Paris, elevando sua meta de redução de emissões de GEE para 46% até 2030, em comparação com os níveis de 2013 (OZAWA, TSANI, KUDOH, 2022). Essa nova meta intensificou os esforços para aprimorar a EE em todos os setores, incluindo a indústria, transporte e construção civil.

O Japão alcançou avanços expressivos no campo da eficiência energética, impulsionados por inovações tecnológicas e políticas de incentivo. Contudo, obstáculos como o impacto do desastre de *Fukushima*, a dependência de combustíveis fósseis e a lenta expansão das energias renováveis limitaram o potencial do país em atingir níveis mais elevados de eficiência. Assim, a trajetória do Japão em eficiência energética é caracterizada por progressos notáveis, mas também por desafios estruturais e conjunturais que comprometem sua capacidade de se destacar como líder global nesse âmbito.

- **Índia**

A energia tem um papel central na trajetória de desenvolvimento da Índia, ainda que a Índia iniciou a aplicação de medidas voltadas para a conservação de energia somente na década de 1990, desde então o país deu início a um ambicioso percurso na direção de um futuro mais sustentável (JAIN, RAO, PATWARDHAN, 2018). Desde o ano 2000, a renda per capita da Índia triplicou e a capacidade de geração de energia quadruplicou (IEA, 2023b). Partindo de uma base baixa, os principais indicadores de crescimento econômico e desenvolvimento se aproximaram consideravelmente das médias globais. O robusto programa de EE da Índia tem sido bem-sucedido em reduzir o consumo de energia em todos os setores. Como resultado, a Índia já possui uma IE inferior à média do G20, tanto para a economia como um todo quanto para setores-chave (IEA, 2023b).

Com adições médias de capacidade de cerca de 12 gigawatts (GW) de energia solar e eólica por ano, a Índia tem sido o terceiro maior mercado de energia renovável do mundo nos últimos cinco anos. O país também tem a terceira maior capacidade instalada de renováveis, com cerca de 175 GW, incluindo hidrelétrica e bioenergia (IEA, 2023b).

O Fundo Monetário Internacional (FMI) estima que a Índia será a terceira maior economia mundial até 2027, e o país se tornou o mais populoso do mundo em 2023,

superando a China (IEA, 2023b). Contudo, a força de trabalho tem valores considerados baixos em relação a sua população, valores equivalentes à de Alemanha, Japão e Turquia. Ademais, embora apresentou um capital crescente, apresentou também diversas vezes o menor valor dentre todos os países analisados. Dessa forma, resultando em índices de EETF altos e oscilantes de 0,85 e 0,89. Sendo seu valor mais baixo 0,85 no ano de 2012, ano em que a Índia sofreu dois dos maiores apagões da história, afetando mais de 600 milhões de pessoas em todo o país (LAI *et al.*, 2012).

Promulgada em 2001, a Lei de Conservação de Energia criou um quadro abrangente para promover a eficiência energética no país, estabelecendo a Agência de Eficiência Energética como a principal responsável por promover iniciativas de EE em vários setores (MANU *et al.*, 2011);

O programa de Distribuição de Lâmpadas LED, conhecido como *Ujala Scheme*, iniciado em 2016, distribuiu milhões de lâmpadas LED, reduzindo o consumo de energia no setor residencial. Em 2022, a Índia foi reconhecida por ter um dos maiores programas de eficiência energética em iluminação do mundo (IEA, 2021c).

Embora todo o desenvolvimento das últimas décadas tenha contribuído para o aumento da prosperidade, também resultou em um crescimento nas emissões de GEE, poluição do ar e importação de combustíveis fósseis. Por isso, o governo indiano escolheu uma trajetória ambiciosa de transição energética para atingir emissões líquidas zero até 2070 (IEA, 2023b).

Estendendo a análise para os demais países, observa-se os países com índices médios de eficiência, conforme Tabela 2 e Figura 26. São eles: Brasil, Canadá, Indonésia, Itália, México, Coreia do Sul, Turquia e EUA (Nota-se a representação de três continentes, Europa, Ásia e América). Verifica-se que dentre os países, apenas dois apresentam índices de EETF decrescentes no período analisado, são eles Brasil e México. Dos demais países, percebe-se que Canadá, Itália e EUA tiveram uma grande ascensão. Esses países, por sua relevância e por terem destaque nos seus índices de EETF, serão analisados em maiores detalhes.

- **Brasil**

Conforme noticiado anteriormente, o Brasil apresentou um índice de EETF decrescente, porém apresentou um pico no início da década de 2000, alcançando

0,98 nos anos de 2004 e 2005, sendo o único país a atingir esse valor por mais de um ano, o único país que também atingiu esse valor uma única vez foi a França no ano de 2002, como já abordado. Dessa forma, o Brasil passou de valores oscilantes cerca de 0,8 entre os anos 2000 e 2002, para 0,88 em 2003 e 0,98 em 2004, mantendo o mesmo índice para 2005 e apresentando um grande declínio desde então. A IE apresentou uma estabilidade durante todo o período analisado, e o início da década de 2000 não é exceção, também apresentando uma baixa oscilação. A força de trabalho, capital e PIB apresentaram crescimento constante, especialmente o capital e a força de trabalho, sendo nessa última, o país que apresentou a maior taxa de crescimento com cerca de 38%, junto a Itália. No entanto, como não se constatou a minimização do IE, os resultados alcançados pelo Brasil podem estar mais relacionados à natureza dos setores produtivos, estilos de vida da população e matriz energética.

A crise energética de 2001 foi um dos eventos mais importantes da história recente do Brasil em termos de energia (TOLMASQUIM, 2001; CECHIN, 2017). Provocada por uma combinação de fatores, incluindo uma seca prolongada que reduziu a capacidade das usinas hidrelétricas, dependência excessiva de energia hidrelétrica e falta de investimentos em infraestrutura de geração, a crise levou ao racionamento de eletricidade em várias regiões do país, sendo ocasionadas até o ano de 2002 (TOLMASQUIM, 2001; CECHIN, 2017). Como resposta, o governo brasileiro implementou uma série de medidas emergenciais para reduzir o consumo de energia, incluindo o Plano de Contingência Energética e o Programa de Incentivo à Redução Voluntária do Consumo de Energia Elétrica (TOLMASQUIM, 2001; CECHIN, 2017).

No início do ano de 2003 ocorre a mudança presidencial no país, com o governo Lula (2003-2010), houve um esforço crescente para diversificar a matriz energética brasileira e melhorar a infraestrutura do setor elétrico (PASE, ROCHA, 2010). A reforma do setor, iniciada na década de 1990, continuou a ser implementada, e medidas foram tomadas para incentivar fontes alternativas de energia e aumentar a participação de fontes renováveis, como energia eólica e biomassa, na matriz energética (LEME, 2005).

Em 2013, começou a ser notada uma escassez de chuvas no país, com volumes abaixo da média histórica (MARENGO, ALVES, 2016). Isso reduziu significativamente os níveis dos principais reservatórios, especialmente na região Sudeste, a mais populosa (MARENGO, ALVES, 2016). A situação piorou

drasticamente entre 2014 e 2015, quando os níveis dos reservatórios atingiram recordes históricos de baixa, levando à utilização do chamado “volume morto”, uma reserva de água que normalmente não é utilizada (ANAZAWA, 2018). A seca também afetou a geração de energia nas hidrelétricas, que são responsáveis por uma grande parte da matriz energética brasileira (ANAZAWA, 2018; EPE, 2023). A partir de 2016, com a retomada das chuvas e a adoção de medidas emergenciais para a gestão dos recursos hídricos, a crise começou a ser controlada. No entanto, os efeitos da seca continuaram a ser sentidos por anos (ANAZAWA, 2018).

De forma interessante, os dois principais picos nos índices de EETF podem ser interpretados como respostas diretas a crises energéticas enfrentadas pelo Brasil, que motivaram a adoção de medidas voltadas à otimização do consumo e à diversificação da matriz energética. Embora esses períodos tenham representado grandes desafios, eles também resultaram em impactos positivos na EE, evidenciando que momentos de adversidade podem servir como catalisadores para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes no uso de energia.

- **México**

O México, assim como o Brasil, apresenta um índice de EETF decrescente, porém com um cenário diferente. Seu pico é registrado logo no início do período analisado, atingindo 0,97 em 2000, sendo o segundo (2º) país com melhor eficiência na época, contudo, em contraste com o final da análise, atingindo 0,76, ocupando a décima primeira posição (11º) em 2022. A IE durante o período analisado apresentou estabilidade, sendo o terceiro (3º) país que menos teve melhora, empatado com a Argentina e na frente apenas do Brasil e da Arábia Saudita. A força de trabalho também apresentou baixa oscilação e não apresentou crescimento, e ainda, foi o único país no qual o capital apresentou redução, de 5%. Seu PIB indicou crescimento de cerca de 70% para o período analisado, representando o país com menor crescimento econômico.

Muito provável que devido a um bom índice de IE para o início da década de 2000, com seu PIB em crescimento aliado a um capital decrescente e um nível de trabalho estagnado, dá ilusão aos índices de EETF inicialmente obtidos. Isso, mesmo que aliado há alguns marcos importantes de EE no país, ilustram que os resultados alcançados pelo México estão mais relacionados à natureza das atividades

econômicas e o nível de desenvolvimento do que à maximização da eficiência do consumo energético.

A implementação de Normas Oficiais Mexicanas criou padrões de eficiência para eletrodomésticos e equipamentos industriais foi uma das primeiras e mais duradouras medidas. Desde 2000, o México ampliou seu programa de normas, o que resultou em uma melhoria significativa na eficiência de aparelhos como refrigeradores e ar-condicionado (MCNEIL, CARREÑO, 2015).

Entre 2006 e 2009, o México implementou uma série de programas de EE, como o Programa Luz Sustentável, que substituiu milhões de lâmpadas incandescentes por modelos mais eficientes (IRASTORZA, 2012).

A reforma energética foi outro grande marco, que abriu o setor de energia mexicano para o investimento privado e incentivou a adoção de tecnologias mais eficientes (MCNEIL, CARREÑO, 2015). Embora o foco principal fosse a expansão das energias renováveis e a abertura do mercado de energia, a EE foi integrada nas discussões sobre a modernização da infraestrutura e a necessidade de otimizar o uso da energia em todos os setores (MCNEIL, CARREÑO, 2015).

Apesar dos avanços alcançados, o México ainda enfrenta desafios estruturais significativos que limitam a efetividade de suas políticas de EE. Um dos principais entraves é a disparidade regional na adoção e implementação de tecnologias mais eficientes, o que evidencia a falta de uniformidade nos esforços nacionais. Ademais, a elevada dependência de combustíveis fósseis, em especial do gás natural, representa um obstáculo substancial à construção de uma transição energética mais consistente e sustentável. Embora tenha havido progresso no incremento do uso de fontes renováveis, a matriz energética mexicana ainda demanda investimentos mais robustos em infraestrutura, tanto para reduzir suas emissões de carbono quanto para aprimorar seus índices de eficiência energética.

- **Canadá**

No início dos anos 2000, o Canadá lançou várias iniciativas para combater as mudanças climáticas e promover a EE (NRCAN, 2018; EEC, 2016). O Plano de Ação Climática, ocorrido entre os anos 2000 e 2007, introduziu medidas para melhorar a EE em setores como transporte, construção e indústria, buscando reduzir as emissões de GEE (CANADÁ, 2000). Ainda em 2005, o Canadá atualizou suas regulamentações sobre a EE de eletrodomésticos e outros produtos que consomem energia,

expandindo o escopo das normas para incluir novos produtos e reforçando os padrões existentes (CANADÁ, 2005).

A Estratégia Nacional de Energia Limpa, introduzida em 2010, foi um marco importante para integrar fontes de energia renovável e avançar em questões de EE (BUSH, LEMMEN, 2019). Essa estratégia enfatizou a importância de otimizar o uso de energia e reduziu a dependência de combustíveis fósseis, promovendo o uso de tecnologias mais eficientes.

Entre 2018 e 2022, o Canadá fez investimentos substanciais em programas de *retrofit* para edificações antigas, sistemas de transporte mais eficientes e redes elétricas inteligentes (NRCAN, 2018; NRCAN, 2022).

Em relação aos índices de EETF obtidos na análise, o Canadá apresentou a curva crescente mais ascendente em um curto período de tempo, passando de 0,68 em 2004 para 0,89 em 2009, estabilizando os anos seguintes em torno desse valor. O país apresenta um crescimento de 170% no seu PIB para todo o período analisado, assim como também apresenta crescimento no seu capital e força de trabalho, sendo 200% e 31%, respectivamente. Sua IE, entretanto, teve decréscimo de 31%, saindo de 9,31 em 2000 para 6,44 em 2022. Particularmente, para a janela de tempo anteriormente citada, onde houve uma grande ascensão no índice de EETF, nota-se que essas tendências se fazem presente, com exceção da força do trabalho que teve uma redução durante esse período, contribuindo para os índices obtidos.

O Canadá possui uma infraestrutura energética que pode ser considerada eficiente, e seus índices de eficiência têm melhorado ao longo das duas últimas décadas, impulsionados principalmente por regulamentações rigorosas, programas de *retrofit* e incentivos fiscais (BUSH, LEMMEN, 2019). No entanto, desafios permanecem, especialmente em setores de alta IE, como transporte e indústria pesada (BATAILLE, MELTON, SAWYER, 2015). Para avançar ainda mais em suas metas energéticas e ambientais, o Canadá deverá concentrar esforços na descarbonização completa dos setores economicamente mais intensivos e na ampla eletrificação de suas atividades. Esse avanço pode ser potencializado pelo aproveitamento estratégico de sua considerável capacidade de geração de energia renovável, consolidando o país como um modelo de transição energética sustentável.

- **Itália**

A Itália tem seu índice de EETF crescente, atingindo o pico de 0,96 em 2016. A IE apresentou uma redução de 22% no período analisado, ficando sempre entre os dois países com melhor IE. A força de trabalho apresentou um crescimento de 41%, o capital teve 1400% de crescimento, fazendo que seja o quinto (5º) país que mais desenvolveu nesse quesito, e o PIB também apresentou um crescimento de 488%, o segundo (2º) maior crescimento, atrás apenas da China. Esses fatores, explicam a ascensão do índice de EETF alcançado pelo país, contudo, nota-se que o país poderia estar com uma performance melhor, assim sendo, pode-se atrelar o resultado com fatores externos.

Em 2006, a Itália experimentou uma crise de abastecimento de gás natural, exacerbada por tensões geopolíticas com a Rússia, que era uma das principais fornecedoras de gás para a Itália (KOREN, BUKKVOLL, 2007; DE MAIO, 2016). A interrupção do fornecimento de gás em janeiro de 2006, devido a disputas entre a Rússia e a Ucrânia, destacou a vulnerabilidade do país em relação às suas importações energéticas (KOREN, BUKKVOLL, 2007; DE MAIO, 2016). Isso levou a um aumento na atenção para a diversificação das fontes de energia e a eficiência energética.

A dependência da Itália em relação a combustíveis fósseis, especialmente gás natural e petróleo, é uma preocupação constante (CAFARO, CECI, FARDELLI, 2022; IEA, 2023c). Essas crises energéticas e desafios ressaltaram a vulnerabilidade da Itália em relação ao seu abastecimento energético, impulsionando o país a adotar medidas mais robustas em prol da EE e da diversificação das fontes de energia. Como consequência, as crises atuaram como catalisadores para a formulação e implementação de políticas voltadas à promoção da sustentabilidade e ao fortalecimento da resiliência no setor energético, impulsionando mudanças estruturais e estratégicas para um futuro mais sustentável.

Estendendo a análise para os demais países, observa-se os países com índices baixos de eficiência, conforme Tabela 2 e Figura 25. São eles: Argentina, Austrália, China, Rússia, Arábia Saudita e África do Sul. (Nota-se a representação de cinco continentes, Europa, Ásia, América, África e Oceania). Verifica-se que dentre os países, a China quem apresenta em grande parte os maiores valores, porém, em contrapartida, os menores índices de EETF, além de uma tendencia decrescente. Dos

demais países, percebe-se que Rússia e África do Sul tiveram um crescimento assíduo. Esses países, por sua relevância e terem destaque nos seus índices de EETF, serão analisados em maiores detalhes.

- **China**

A China, apesar de ter os maiores valores, apresenta decréscimo acentuado de IE durante todo o período, de 42% e uma baixa variação na força de trabalho com 7% de crescimento. A relação capital apresenta um crescimento constante, com cerca de 1400% de crescimento, o que a posiciona com o quinto (5º) maior crescimento proporcional, ficando atrás de Argentina, Turquia, África do Sul e Indonésia. Seu PIB, por sua vez, também apresentou um crescimento de 760%, sendo esse o maior aumento observado entre os países analisados.

A EE tornou-se uma prioridade nacional no Décimo Plano Quinquenal (2001-2005), onde o governo chinês começou a impor metas de eficiência, incentivando a modernização industrial e o uso mais eficiente de energia (NREL, 2004; HONG *et al.*, 2015).

No Décimo Primeiro Plano Quinquenal (2006-2010) foi estabelecida a meta de reduzir a IE em 20% até 2010 (FAN, 2006). Para tanto, foi introduzido o Programa de Eficiência Energética Top 1.000, visando aumentar a eficiência das 1.000 maiores empresas industriais, responsáveis por cerca de 30% do consumo total de energia da China (FAN, 2006; YIN, XU, 2022). Ademais, também foi criado o Fundo Especial de Eficiência Energética para apoiar projetos de EE e a implementação de tecnologias de baixo carbono (YIN, XU, 2022).

O Décimo Segundo Plano Quinquenal (2011-2015) introduziu a Meta de Redução de Consumo de Energia, que visava reduzir a IE em mais 16% até 2015. Também estabeleceu o Plano de Ação de Conservação de Energia introduzindo ações para EE nos setores de construção, transporte e indústria pesada.

Durante o Décimo Terceiro Plano Quinquenal (2016-2020) foi proposta a Reforma da Estrutura Energética que promoveu a transição para uma economia de baixo carbono, incentivando energias renováveis e a modernização da matriz energética (FERRAZ, DIEGUES, 2019). A China se comprometeu a reduzir a IE em 15% e a intensidade de carbono em 18% até 2020 (FERRAZ, DIEGUES, 2019). Iniciativa tomada muito devido a pressões internacionais, como o Acordo de Paris firmado.

O Décimo Quarto Plano Quinquenal (2021-2025) é uma importante estratégia para a próxima fase de desenvolvimento econômico e social, e tem como um dos focos principais a sustentabilidade e a EE, alinhado com as metas climáticas de longo prazo do país (POO, 2021). Por exemplo, o país delineou metas mais ambiciosas, incluindo o objetivo de atingir o pico de emissões de CO₂ antes de 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2060.

A expressiva redução da IE observada na China pode ser atribuída a uma combinação de fatores, incluindo o uso mais eficiente do carvão, a substituição parcial do carvão por petróleo, a reestruturação industrial, o aumento dos preços de energia e os substanciais investimentos do governo chinês em pesquisa, com destaque para o desenvolvimento de veículos ecoeficientes. Contudo, a quantificação precisa das contribuições específicas de cada um desses fatores para o índice de EETF permanece um desafio, dada a complexidade das interações entre essas variáveis.

- **Rússia**

A Rússia, juntamente com a China, está frequentemente entre os países com índices mais altos de IE do mundo (ENERDATA, 2024). Isto se deve, entre outros fatores, ao fato de que historicamente os preços de energia na Rússia eram subsidiados pelo governo, o que resultou em pouca preocupação com a eficiência de edifícios e equipamentos (WEC, 2010). Dessa forma, a alta IE foi reconhecida como um desafio significativo no início da década de 2000 (WORLD BANK, 2014). A Rússia consumia cerca de 2,5 vezes mais energia por unidade de PIB do que as economias avançadas, apresentando maior índice dentre o G20, o que levou a discussões sobre políticas que poderiam corrigir essa ineficiência.

Em 2000, o governo russo criou o Ministério da Energia, estabelecendo uma entidade centralizada responsável pela formulação de políticas energéticas e pela implementação de estratégias de EE (CAMACHO, 2016). Isso refletiu uma mudança na forma como o país lidava com seu setor energético, passando a priorizar a modernização e a redução de perdas.

O país adotou seu Plano de Desenvolvimento Energético 2020 em 2003, estabelecendo diretrizes até 2020 para modernizar o setor energético, melhorar a eficiência das instalações e redes elétricas e promover a diversificação da matriz energética (KUZNETSOVA, 2015).

No ano de 2010, a Rússia lançou seu Programa Nacional de Eficiência Energética, com o objetivo de reduzir sua IE em 13,5% até 2020 (em relação aos níveis de 2007) (GOVERNMENT OF RUSSIA, 2013). O programa focou na modernização de infraestruturas energéticas, incluindo redes de distribuição e geração, além de melhorias no setor industrial e em edifícios residenciais (GOVERNMENT OF RUSSIA, 2013).

A estratégia energética da Rússia até 2035 foi lançada em 2020, que continuou o foco na modernização do setor energético e na redução da IE (ALEKSEEV *et al.*, 2019). O plano colocou maior ênfase na EE em áreas rurais e remotas, onde a infraestrutura é mais deficiente. O objetivo também incluiu a redução das perdas no transporte de energia e a promoção de tecnologias mais eficientes em todos os setores (ALEKSEEV *et al.*, 2019).

Apesar desses marcos, a Rússia enfrentou desafios significativos, como a dependência contínua de combustíveis fósseis e a modernização lenta em alguns setores. Contudo, as políticas de EE mostraram um esforço gradual em direção a uma economia mais sustentável e menos intensiva em carbono. Os índices de EETF esboçam esse progresso, partindo de 0,50 em 2000 e atingindo seu pico de 0,72 em 2021. O país apresentou no período de análise um decréscimo de 31% em sua IE, enquanto houve um aumento de sua força de trabalho de 28%, capital de 240% e PIB com 207%. Ainda assim, a Rússia apresenta o maior índice de IE, levando a compreensão que os resultados alcançados podem estar mais relacionados à natureza dos setores produtivo e econômico, por outro lado, revela o potencial para melhorias com uma matriz energética mais sustentável.

Importante destacar que a guerra com a Ucrânia prejudicou significativamente os avanços da Rússia em EE (UNEP, 2022; CASTILHO, 2022). As sanções, a falta de tecnologia estrangeira, a reorientação de políticas e investimentos, e o impacto na infraestrutura e força de trabalho criaram um cenário em que os avanços na modernização do setor energético foram retardados (UNEP, 2022; CASTILHO, 2022). Em vez de priorizar a EE e a sustentabilidade, a Rússia direcionou seus esforços para assegurar a segurança energética interna e reorientar suas exportações para novos mercados. Essa estratégia, embora compreensível do ponto de vista geopolítico, comprometeu as metas de longo prazo relacionadas à EE. Esse redirecionamento de prioridades pode estar associado à queda observada no índice de EETF no ano de 2022.

- **África do Sul**

A África do Sul tem sua relação de IE decrescente, apresentando 29% de decréscimo, contudo apresentando oscilações, principalmente em 2004, 2007, 2014 e 2016. Essas oscilações de IE acabaram se traduzindo para o índice de EETF, onde é possível ver regresso em torno desses anos. Isso provavelmente ocorreu devido a estagnação da força de trabalho, que durante todo o período analisado variou apenas 1%, enquanto o capital cresceu continuamente, atingindo um crescimento de 2500% e o PIB, igualmente, atingindo um crescimento de 207%. Estes resultados indicam que o crescimento do capital não resultou em troca de tecnologia por força de trabalho, mas sim na eficientização dos meios de consumo, mesmo que apresentando certa instabilidade em alguns períodos.

No início da década de 2000, a África do Sul começou a enfrentar desafios significativos em termos de demanda e oferta de energia, o que levou à implementação de várias iniciativas voltadas para a EE (CROMPTON, MATSIKA, 2021; NDLOVU, 2020).

O Plano Integrado de Energia foi estabelecido em 2003, sendo um passo importante para promover um sistema energético seguro, acessível e sustentável, destacando a EE como uma prioridade na estratégia energética do país (CHITONGE, 2017).

Em 2005, o governo sul africano lançou a Estratégia Nacional de Eficiência Energética, visando melhorar a eficiência em todos os setores da economia. Dessa forma, tinha-se como objetivo reduzir o consumo de energia em 12% até 2015, estabelecendo metas claras para a EE (ROSENBERG, WIMKLER, 2011). Esta estratégia foi atualizada em 2008 para definir metas mais ambiciosas de EE e implementar medidas que envolvessem setores-chave, como indústria, comércio e edificações residenciais (SOUTH AFRICAN GOVERNMENT, 2009).

O governo sul africano expandiu os investimentos em energia renovável e EE por meio do Programa de Energia Renovável lançado em 2011. Os principais objetivos era diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (IRENA, 2020). Isso incluiu o Programa de Aquisição de Energia Renovável, que trouxe novos projetos de geração de energia renovável e medidas de EE associadas (IRENA, 2020).

A África do Sul também enfrentou várias crises energéticas significativas entre 2000 e 2022, sendo uma das principais o problema crônico de cortes de energia (load-

shedding) que ocorreu repetidamente ao longo desse período. As primeiras grandes crises energéticas ocorreram em 2007 e 2008, quando a África do Sul começou a enfrentar apagões generalizados, e entre 2014 e 2015, o país voltou a enfrentar sérios problemas energéticos (WENTINK, 2023). Observa-se, portanto, que alcançar um equilíbrio entre a promoção da EE e a superação de barreiras sociais, financeiras e estruturais é essencial para assegurar que a África do Sul progrida em direção a um futuro energético mais sustentável e equitativo.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a EE dos países do G20, aplicando a DEA para identificar países com maior e menor eficiência na utilização de seus recursos energéticos. Dessa forma, com a ajuda do índice de EETF, se mensurou a capacidade dos países em transformar formação bruta de capital, força de trabalho e intensidade energética no processo produtivo, além das trocas entre esses vários fatores.

Como resultado, a Análise 1 mostrou que o Reino Unido apresentou o maior índice de EETF (100%), considerando as variáveis utilizadas, seguido pelos países: França (92,2%), Alemanha (88,6%), Japão (87,4%) e Índia (87%,3). Assim, de acordo com os resultados apresentados, enquanto o Reino Unido é uma referência, devendo ser mais bem examinado, a Itália pode merecer maior atenção no que diz respeito a melhorias, visto que sempre esteve entre os países com melhor IE e apresentou o segundo maior crescimento no PIB (488%).

Os países que se enquadraram nos índices de EETF médio são: Itália (84,3%), México (84%), Canadá (82,6%), Brasil (78,2%), Turquia (72,9%), EUA (77,2%), Coreia do Sul (75,8%) e Indonésia (70,3%). Dentre esse grupo, nenhum país apresentou resultados estagnados ou oscilantes em torno de um mesmo valor (considerando até 1,0 de variação). Os resultados obtidos para o Brasil, devem ser analisados dentro de um contexto. Apesar de fazer uso predominantemente de fontes energéticas renováveis, o Brasil enfrenta atualmente os problemas advindos dos impactos socioambientais relativos à expansão destas fontes e da baixa inclusão de tecnologias energéticas alternativas em sua matriz. Soma-se a isto, a maneira como é conduzida a contenção da devastação florestal: na Amazônia, a redução do desmatamento não é complementada por um projeto inovador de desenvolvimento da região preservada, e na caatinga e no cerrado ocorre a ampliação da devastação. E ainda, os esforços voltados para a modernização da produção e consumo estão muito mais focados no crescimento do PIB do que na sustentabilidade, fazendo com isso que o Brasil se distancie muito dos padrões da inovação tecnológica contemporânea, orientada para a minimização da utilização de materiais e energia e na preservação e regeneração ambiental.

Pode-se citar a China (32%), África do Sul (46,4%), Argentina (48,4%), Arábia Saudita (55,9%), Austrália (60,4%) e Rússia (62,3%), onde foram verificadas as

tendências mais baixas para o índice de EETF. Curiosamente, o bloco que apresentou maior representatividade de regiões, com cinco continentes (Europa, Ásia, América, África e Oceania). A África do Sul, embora estando entre os países com menor EETF, apresentou uma forte tendência de crescimento para este índice (Coreia do Sul, Itália e Canadá também resultaram em valores crescentes expressivos). Dessa maneira, conclui-se que durante o período estudado, esses países desenvolveram ações positivas e efetivas no que diz respeito à minimização do uso de energia, considerando as possíveis trocas entre energia, trabalho e capital, em função do crescimento do PIB. No entanto, muito ainda há para ser feito, em especial para a África do Sul, uma vez que está distante dos índices obtidos pelos países tidos como mais eficientes.

Notou-se que dentre os 19 países avaliados, somente 4 apresentaram tendências decrescentes, foram eles: Brasil, México, Arábia Saudita e China. Aqui se verifica uma situação onde novas ações deveriam ser implantadas e as ações existentes revistas. Uma vez que a exemplo da Itália, comprovadamente, ações que resultem no melhor uso dos recursos energéticos não necessariamente comprometem o crescimento econômico.

A inclusão das emissões de CO₂ como um fator indesejável para o processo produtivo, realizada na Análise 2, não trouxe uma variação significativa nos valores de eficiência obtidos com relação à primeira análise. A leitura que se faz destes resultados é que estando a IE atrelada às emissões de CO₂, a redução do primeiro fator implica na redução do segundo e, portanto, a aplicação da técnica DEA incluindo os dois fatores mostrou-se redundante.

Um dos principais fatores a ser considerado na avaliação das emissões CO₂ é a quantidade total emitida, que varia significativamente conforme a matriz energética de cada país. Nações com ampla disponibilidade de recursos hídricos ou outras fontes de energia renovável, como o Brasil, apresentam uma menor intensidade de carbono em relação às emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis. Por outro lado, países cuja matriz energética é fortemente baseada no carvão, como a China e a Austrália, registram elevados níveis de intensidade de carbono devido às altas emissões associadas a esse combustível. No entanto, a intensidade de carbono de um país não é determinada apenas pela geração de energia. Outros fatores, como o uso da terra, agricultura e desmatamento, também exercem um impacto significativo sobre as emissões totais de CO₂. No caso do Brasil, embora a geração de energia elétrica seja majoritariamente renovável, com destaque para a energia hidrelétrica, o

desmatamento na Amazônia e em outros biomas contribui substancialmente para as emissões nacionais. A conversão de florestas em áreas agrícolas e pastagens libera grandes quantidades de CO₂ armazenado na biomassa e no solo, aumentando a intensidade de carbono do país.

Assim, a análise da intensidade de carbono, e das emissões de CO₂ em um contexto geral, deve considerar tanto as emissões associadas ao consumo de energia quanto aquelas resultantes das mudanças no uso da terra. Essa abordagem mais ampla é essencial para compreender as particularidades de cada país e para formular políticas públicas que visem à redução efetiva das emissões globais, equilibrando crescimento econômico, segurança alimentar e conservação ambiental.

Com os resultados, constatou-se que o cálculo da EETF leva tanto em consideração as tendências de crescimento ou queda para os fatores de entrada considerados, assim como a comparação dos valores destes fatores entre as DMUs. Esses resultados destacam a importância de estratégias integradas de energia que considerem a eficiência no uso de recursos, reforçando o papel crucial da transição energética global para um desenvolvimento mais sustentável.

Desta forma, atinge-se o objetivo do trabalho, mostrando quais países do G20 possuem o maior índice de EETF, que considera uma estrutura total de fatores, propiciando informações sobre países destaques e como o Brasil se encontra nesse cenário.

A principal contribuição deste estudo reside na aplicação da DEA na avaliação comparativa do desempenho energético, fornecendo um panorama abrangente das lacunas e oportunidades de melhoria para os países do G20. Os resultados obtidos podem ser valiosos também para orientar o estabelecimento de políticas energéticas com estratégias adequadas para melhorar a eficiência dos países, considerando o contexto da sustentabilidade.

Por fim, é importante destacar que o índice proposto apresenta limitações, especialmente devido à heterogeneidade dos países comparados. A interpretação dos resultados exige que se levem em conta as particularidades sociais, econômicas e ambientais de cada país.

As disparidades observadas nos índices de EETF entre os países destacam a necessidade de abordar de forma estratégica o aumento da EE. Esse contexto reforça a importância do desenvolvimento e da implementação de políticas energéticas abrangentes, que integrem de maneira equilibrada os pilares fundamentais da

segurança energética, da proteção ambiental e do crescimento econômico sustentável.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

À medida que a pesquisa avança, emergem novas direções para estudos futuros. Recomenda-se que avaliações subsequentes investiguem a influência de políticas energéticas específicas sobre a EE, ampliando o escopo para incluir variáveis adicionais, como investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). A inclusão dessas variáveis poderá oferecer uma análise mais aprofundada e abrangente. Além disso, a realização de análises comparativas focadas exclusivamente em países desenvolvidos ou em desenvolvimento pode proporcionar insights valiosos, identificando as melhores práticas que conciliam, de forma mais equilibrada, os aspectos econômicos, ambientais e sociais.

5.2 Publicações realizadas

O desenvolvimento do trabalho possibilitou a contribuição em duas publicações para avançar o entendimento sobre as tendências da EE. São elas:

- TIBURCIO, L. S. L., SILVA, P. F., MARTINS, A. C. G., PAREDES, H. K. M. **Análise comparativa entre as políticas energéticas alemã e brasileira aplicada ao objetivo de desenvolvimento sustentável 7.** X Congresso Brasileiro de Energia Solar, Rio Grande do Norte, Natal, 2024. doi.org/10.59627/cbens.2024.2440
- TIBURCIO, L. S. L., SILVA, P. F., MARTINS, A. C. G., PAREDES, H. K. M. **Intensidade e Eficiência Energética: Explorando Sinergias para Avanços Sustentáveis.** V Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Virtual, 2024. doi.org/10.29327/27640582.896694

Essas publicações não apenas ampliaram o conhecimento sobre as complexidades que envolvem a sustentabilidade energética, mas também contribuíram para o debate acadêmico e prático sobre como alcançar um futuro energético mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- AKIYAMA, N. et al. The Fukushima Nuclear Accident and Crisis Management: Lessons for Japan-US Alliance Cooperation, The Fukushima Nuclear Accident and Crisis Management, The Saskawa Peace Fundation, 2012. Disponível em: https://www.spf.org/en/_jpus_media/img/investigation/book_fukushima.pdf. Acesso em: 27 set. 2024.
- ALEKSEEV, A. N. et al. A Critical Review of Russia's Energy Strategy in the Period until 2035. *International Journal of Energy Economics and Policy*, v. 9, n. 6, pp.95–102, 2019. doi.org/10.32479/ijep.8263
- ALLCOTT, H; MULLAINATHAN, S. Energy. Behavior and energy policy, *Science*, v. 327, 2010. doi.org/10.1126/science.1180775.
- ALSARHAN, L.M. et al. Circular Carbon Economy (CCE): A Way to Invest CO2 and Protect the Environment, a Review. *Sustainability*. 2021, v.13, n.21, 11625. doi.org/10.3390/su132111625
- ALVES, J. L. et al. Economia Circular e Energias Renováveis: uma análise bibliométrica da literatura internacional. *Interações*, p. 267–297, Volume 2, 2021, 2666-2787. doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100063.
- AMANO, A. Energy prices and CO2 emissions in the 1990s, *Journal of Policy Modeling*, v. 12, n. 3, 1990, p.495-510, 0161-8938. doi.org/10.1016/0161-8938(90)90010-C
- ANAZAWA, T. M. A escassez hídrica na Região Metropolitana de Campinas entre 2013-2015: a perspectiva de um desastre socialmente construído. *Cadernos Metrópole*, v. 20, n. 42, p. 347-369, 2018. doi.org/10.1590/2236-9996.2018-4203
- ANDREW, R. M.; PETERS, G. P. The Global Carbon Project's fossil CO2 emissions dataset (2024v37) [Data set], 2024. doi.org/10.5281/zenodo.13981696
- ARAUJO, P. H. S. L. Elaboração de rankings por meio do uso de técnicas estruturadas: uma aplicação no setor de seguros privados. 2008. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- ASMILD, M. et al. Combining DEA Window Analysis with the Malmquist Index Approach in a Study of the Canadian Banking Industry. *Journal of Productivity Analysis*, v. 21, p. 67–89, 2004.
- AZADEH, A. et al. An integrated DE PCA numerical taxonomy approach for energy efficiency assessment and consumption optimization in energy intensive manufacturing sectors. *Energy Policy*, v. 35, p. 3792–3806, 2007.

BANDARRA, P; VALVEZ, M. T; PEREIRA, A. Solutions for monitoring and analyzing for energy consumption, Energy management systems, 2016, 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), IEEE, 2016.

BARBOSA, F. C.; FUCHIGAMI, H. Y. Análise Envolvória de Dados: Teoria e Aplicações. 1. ed. Goiás: ULBRA, 2018.

BARKI, D. et al. Innovative Skill Development Techniques for Solar Power Plants and Solar PV Job Creation in India. 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, 2020.

BATAILLE, C.; MELTON, N.; SAWYER, D. Pathways to deep decarbonization in Canada, Canadian Electronic Library. Ottawa, Ontario, 2015. Disponível em: <https://cmcghg.com/wp-content/uploads/2015/07/Final-Canada-DDPP-Country-Report-July-14.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

BATISTA, F. D. Metodologia para o uso da análise por envoltória de dados no auxílio à decisão. 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

BELTRAN, A. La France et sa politique de l'énergie (des années 1970 à aujourd'hui). La transition énergétique, CIRAC, 2017, pp.17-25. doi.org/10.4000/books.cirac.1029

BMU. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Act on Granting Priority to Renewable Energy Sources (Renewable Energy Sources Act), 2000. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20160921012408/http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/res-act.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

BOGETOFT, P.; OTTO, L. Benchmark and Frontier Analysis Using DEA and SFA: Package 'Benchmarking', 2024. doi.org/10.32614/CRAN.package.Benchmarking

BOGETOFT, P.; OTTO, L. Benchmarking with DEA, SFA, and R. 2. ed. New York: Springer, 2011, 2214-7934. doi.org/10.1007/978-1-4419-7961-2

BOND, T. C. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v.118, n.11, pp.5380–5552, 2013. doi.org/10.1002/jgrd.50171

BOYD, G. A.; PANG, J. X. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity. Energy Policy, v. 28, p. 289–296, 2000.

BP. Statistical Review of World Energy. 2022. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023.

BRANCO, J. E. H. et al. Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil. Transportes, v.31, n.2, p.e2415, 2023. doi.org/10.58922/transportes.v31i2.2415

BUKARICA, V; TOMSIC, Z. Energy efficiency policy evaluation by moving from techno-economic towards whole society perspective on energy efficiency market, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.70, 2017, P.968-975. doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.002

BUNDESREGIERUNG. Die Bundesregierung. National Sustainable Development Strategy: 2021 Progress Report, 2021. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/sustainability/germany-s-sustainable-development-strategy-354566>. Acesso em: 16 set. 2024.

BUSH, E.; LEMMEN, D.S. Canada's Changing Climate Report. Government of Canada, Ottawa, ON. 2019. Disponível em: https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/2/2020/06/CCCR_FULLREPORT-EN-FINAL.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

CACHOLA, C. d. S. Trends and Prospects for Transport Fuel Consumption in Brazil, *The Latin American Studies Book Series*, 2023, p.193-210,1876-6102. doi.org/10.1007/978-3-031-21033-4_12.

CAFARO, C.; CECI, P.; FARDELLI, A. The Italian Pathway for Energy Transition: From the Coal Phase Out to the Problems Related to Natural Gas, *Atmosphere*, v. 13, n.11, 2022. doi.org/10.3390/atmos13111872

CAMACHO, P. M. S. A Energia na relação União Europeia-Rússia: 2000-2015. Dissertação de Mestrado em Ciência Política e Relações Internacionais. Universidade de Nova Lisboa, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/20182>. Acesso em: 20 out. 2024.

CAMIOTO, F. C; REBELATTO, D. A. N.; ROCHA, R. T. Análise da eficiência energética nos países do BRICS: um estudo envolvendo a Análise por Envoltória de Dados, *Revista Gestão e Produção*, São Carlos, vol.23, n.1, pp.192-203. 2016. doi.org/10.1590/0104-530X1567-13

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. *Estudos Avançados. Sociedade e Ambiente*, vol. 28, n. 82, p. 25-39, 2014. doi.org/10.1590/S0103-40142014000300003

CASTILHO, F. Energia, guerra e transição: a Guerra da Ucrânia e os novos paradigmas do consumo energético. *Conjuntura Global*, v.11, n.3, 2022. doi.org/10.5380/cg.v11i3.86616

CASTRO, M. L. Análise da política energética na Alemanha do século XIX ao XXI, Monografia de Bacharelado em Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/4697/3/LMCastro.pdf>. Acesso em: 20 set. 2024.

CCC. Climate and Clean air Coalition. G20 2016: Energy Efficiency Leading Programme, v. 1, 2016. Disponível em: <https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources//2016-09%20G20%20Energy%20Efficiency%20Leading%20Programme.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

CECHIN, K. G. Os impactos da crise energética de 2001 e seus reflexos em usos alternativos de energia: Uma revisão bibliográfica, Monografia de Gestão Ambiental, Universidade Federal do Pampa, Programa de Graduação em Gestor Ambiental, Rio Grande do Sul, 2017.

CHANG, T. P.; HU, J. L. Total-factor energy productivity growth, technical progress, and efficiency change: an empirical study of China. *Applied Energy*, v. 87, p. 3262-3270, 2010.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, v. 2, p. 429-444, 1978.

CHEN, C. Comparative impacts of energy sources on environmental quality: A five-decade analysis of Germany's Energiewende, *Energy Reports*, v. 11, 2024, p.3550-3561, 2352-4847. doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.027

CHIU, CR.; CHANG, MC.; HU, JL. Energy intensity improvement and energy productivity changes: an analysis of BRICS and G7 countries. *Journal of Productivity Analysis*. V.57, p.297-311, 2022. doi.org/10.1007/s11123-022-00630-7

CLIMATEWATCH. Historical GHG Emissions. 2022. Washington, DC: World Resources Institute. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 17 nov. 2023.

COELLI, T.; RAO, D. S. P.; BATTESE, G. E. An introduction to efficiency and productivity analysis. Kluwer Academic Publishers, v. 10, p. 220-233, 1998.

COOK, W. D.; TONU, K.; ZHU, J. Data envelopment analysis: Prior to choosing a model, *Omega*, v. 44, 2014, p.1-4, 0305-0483. doi.org/10.1016/j.omega.2013.09.004

COOPER, W.W.; SEIFORD, L.M.; TONE, K. (2007). *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Springer Science & Business Media. doi.org/10.1007/978-0-387-45283-8

COSTA, H. G. Modelo para webibliomining: proposta e caso de aplicação, *Revista da FAE*, Curitiba, v. 13, n. 1, p. 115-126, 2010.

COSTA, J. dos S.; ANDRADE, L. M. L. Energy efficiency applied to electricity consumption: A bibliographic review study, *Frontiers in Ecology and Evolution*, v.10, 2021, 0973-0826. doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14085.

CROMPTON, R.; RUWADZANO, M. *Energy in South Africa: Oxford Handbook of the South African Economy*, Oxford Academic, 2021. doi.org/10.1093/oxfordhb/9780192894199.013.14

DAVIDSON, M. R. Managing the decline of coal in a decarbonizing China, *WIREs Climate Change*, e918. doi.org/10.1002/wcc.918

DE MAIO, G. *A Tale of Two Countries: Italy, Germany, and Russian Gas*. Brookings Institution, Washington, D.C. 2016. Disponível em: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/08/fp_20160818_demaio_tale_of_two_countrie.pdf. Acesso em: 10 set. 2024.

DEMERITT, D.; LANGDON, D. The UK Climate Change Programme and communication with local authorities, *Global Environmental Change*, V. 14, n.4, 2004, p.325-336, 0959-3780. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.003.

DINCER, I. Energy and Environmental Impacts: Present and Future Perspectives. *Energy Sources*, v.20 n.5, 1998, p.427–453. doi.org/10.1080/00908319808970070

DYSON, R. G. et al. Pitfalls and protocols in DEA. *European Journal of Operational Research*, v. 132, p. 245-259, 2001.

EEC. Environment and Climate Change Canada. Federal Actions for a Clean Growth Economy: Delivering on the Pan-Canadian Framework on clean Growth and Climate Change. 2016. Disponível em: <https://www.canada.ca/content/dam/themes/environment/documents/weather1/20170119-en.pdf>. Acesso em: 5 set. 2024.

EIA. Energy Information Administration. 2023b. Country Analysis Brief: Brazil. Disponível em: https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Brazil/pdf/brazil-2023.pdf. Acesso em: 01 out. 2023.

EIA. Energy Information Administration. Primary energy consumption [dataset]. *International Energy Data*. 2023. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/data.php>. Acesso em: 20 set. 2023.

ENERDATA. World Energy & Climate Statistics: Yearbook 2024. Disponível em: <https://www.enerdata.net/publications/world-energy-statistics-supply-and-demand.html>. Acesso em: 11 out. 2024.

ENERGY INSTITUTE. Statistical Review of World Energy. 2023. Primary energy from other renewables. Disponível em: Acesso em: 05 out. 2023.

EPA. United States Environmental Protection Agency. 2022. Sources of Greenhouse Gas Emission. Washington, D.C. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>. Acesso em: 15 nov. 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2023, Todas as seções. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>.

FAN, C. C. China's Eleventh Five-Year Plan (2006-2010): From “Getting Rich First” to “Common Prosperity”. *Eurasian Geographic and Economics*, v.47, n.6, 2006, pp. 708-723. Disponível em: <https://geog.ucla.edu/sites/default/files/users/fan/300.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

FERRAZ, G. C. M.; DIEGUES, A. C.; Planejamento Econômico e Política Industrial na China: Dos Planos Quinquenais ao Made in China 2025, IV Encontro Nacional de Economia Industrial e Inovação, v. 6, n.1, 2019, p1102-1120, 2357-7592. doi.org/10.5151/iv-enei-2019-6.1-059

FRIEDLINGSTEIN, P. Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, v. 12, 2020, 3269-3340. doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020

GELLER, H. et al. Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries, *Energy Policy*, v. 34, 2006, p.556-573, 0301-4215. doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.010

GIELEN, D. et al. The role of renewable energy in the global energy transformation, *Energy Strategy Reviews*, V. 24, 2019, p.38-50, 2211-567X. doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066

GOLANY, B.; ROLL, Y. An application procedure for DEA. *Omega Int. J. of Mgmt Sci.*, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

GOLDEMBERG, J. Energia e Sustentabilidade. *Revista de Cultura e Extensão USP*, v.14, p. 33-43, 2015.

GONÇALVES, B. B. A Transição Energética na Alemanha, Monografia em Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, 2015. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/736/3/BBBGon%c3%a7alves.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

GOTZ, B. et al. How to integrate feed-in tariffs in energy system models: The case of Germany, *International Energy Workshop*, 2011. Disponível em: <https://web.stanford.edu/group/emf-research/new-emf.stanford.edu/files/docs/273/Goetz-Paper.pdf>. Acesso em: 21 set. 2024.

GRAMKOW, C.; ANGER-KRAAVI, A. Developing Green: A Case for the Brazilian Manufacturing Industry. *Sustainability*. 2019, v.11, n.23. doi.org/10.3390/su11236783

GUPTA, T. et al. A Robust Approach for Analysis and Visualization of CO2 and Greenhouse Gas Emission and Its Effect. 2023 10th International Conference on Computing for Sustainable Global Development, New Delhi, India, 2023, p.238-243.

HANACEK, K. et al. We are protectors, not protestors: global impacts of extractivism on human–nature bonds. *Sustainable Science*, 2024. doi.org/10.1007/s11625-024-01526-1

HEUBAUM, H. Global energy governance. *International Organization and Global Governance*, Routledge, v. 2, 2018, pp. 681-693. doi.org/10.4324/9781315301914-56

HEYD, T. Climate Change, Individual Responsibilities and Cultural Frameworks, *Human Ecology Review*, v. 17, n. 2, 2010, p.86-95, 1074-4827.

HEYNES, K. E.; DINC, M. Data Envelopment Analysis (DEA). *Encyclopedia of Social Measurement*, v. 1, p. 609-616, 2005.

HONG, T.; LI, C.; YAN, D. Updates to the China Design Standard for Energy Efficiency in Public Buildings, *Energy Technologies Area*, *Energy Policy*, v. 87, n.11, 2015. doi.org/10.1016/j.enpol.2015.09.013

HU, J. L.; KAO, C. H. Efficient energy-saving targets for APEC economies. *Energy Policy*, v. 35, p. 373–382, 2007.

HU, J. L.; WANG, S. C. Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, v. 34, p. 3206-3217, 2006.

HUSAIN, I. et al. Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles, in *Proceedings of the IEEE*, Volume 109, n. 6, p. 1039-1059, 2021. doi: 10.1109/JPROC.2020.3046112.

IEA. International Energy Agency. France 2021: Energy Policy Review. 2021b. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7b3b4b9d-6db3-4dcf-a0a5-a9993d7dd1d6/France2021.pdf>. Acesso em: 25 set. 2024.

IEA. International Energy Agency. Germany 2020 Energy Policy Review. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/germany-2020>. Acesso em: 30 set. 2024.

IEA. International Energy Agency. Greenhouse Gas Emissions from Energy Highlights. 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy-highlights>. Acesso em: 1 nov. 2023.

IEA. International Energy Agency. India Energy Outlook 2021: World Energy Outlook Special Report. 2021c. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1de6d91e-e23f-4e02-b1fb-51fdd6283b22/India_Energy_Outlook_2021.pdf

IEA. International Energy Agency. Italy 2023: Executive Summary. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/italy-2023/executive-summary>. 2023c. Acesso em: 01 set. 2024.

IEA. International Energy Agency. Key world energy statistics. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>. Acesso em: 10 set. 2023.

IEA. International Energy Agency. LiFE lessons from India: The benefits of advancing the Lifestyle for Environment (LiFE) initiative through the G20. 2023b. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9b6305e3-c2d6-470d-b9b4-f85b67c9598f/LiFElessonsfromIndia.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.

IEA. International Energy Agency. World Energy Balances Highlight. 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9cca2bac-f41b-4273-8dba-cfeb4e5b2b7a/WorldEnergyBalancesHighlights2023.xlsx>. Acessado em: 27 out. 2023.

IEA. et al. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report, Todas as seções, 2023. Disponível em: https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2023-full_report.pdf.

IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. SEEG: Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa – 10 anos. São Paulo: IEMA, 2023. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anos-v5.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Changes. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf. Acesso em: 1 set. 2023.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Impacto Ambiental e Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. Texto para Discussão 2638. Brasília: IPEA, 2020. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10531/1/td_2638.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

IRASTORZA, V. Eficiencia Energética en el Sector Doméstico: El caso del “Programa Luz Sustentable”, Revista Digital Universitaria, v.13, n.10, 1067-6079. 2012. Disponível em: <https://www.revista.unam.mx/vol.13/num10/art99/art99.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

JAIN, M; RAO, A. B; PATWARDHAN, A. Energy Efficiency Policies in India: Implications for Climate Change Mitigation. Climate Change Signals and Response. Springer, 2018, pp.289-303. doi.org/10.1007/978-981-13-0280-0_18

JIN, L; DUAN, K; SHI, C; JU, X. The Impact of Technological Progress in the Energy Sector on Carbon Emissions: An Empirical Analysis from China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017. doi.org/10.3390/ijerph14121505

JUBRAN, A. K. Modelo de análise de eficiência na administração pública: estudo aplicado às prefeituras na administração usando a análise envoltória de dados. 2006. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

JÚNIOR, C. V. N. S.; GASPARINI, C. E. Análise da equidade e da eficiência dos estados no contexto do federalismo fiscal brasileiro. Estudos Econômicos, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 803-832, out./dez. 2006. doi.org/10.1590/S0101-41612006000400006

JUNIOR, I. C. L. *et al.* Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil. Revista Uniabeu, v.8, n.18, 2015.

KABEYI, M. J. B.; OLANREWAJU, O. Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. África do Sul, 2296-598X, v. 9, 2022. doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114

KASSAI, S. Utilização da Análise por Envoltória de Dados (DEA) na análise de demonstrações contábeis, Tese de Doutorado em Contabilidade e Controladoria, Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12136/tde-11122002-092458/publico/TeseCompleta.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2024

KHEZRIMOTLAGH, D. How to deal with numbers of decision making units and variables in data envelopment analysis, v.2, 2015. doi.org/10.48550/arXiv.1503.02306

KOPPENBORG, F. Introduction: Japan's Energy Transition 10 Years after the Fukushima Nuclear Accident, *Social Science Japan Journal*, V. 24, Issue 1, 2021, p.3-7. doi.org/10.1093/ssjj/jyaa052

KOREN, K. M.; BUKKVOLL, T. The 2006 Russian-Ukrainian gas crisis: Causes and potential for repetition. Report number 2007/00159. Kjeller: FFI, 2007. Disponível em: <https://ffi-publikasjoner.archive.knowledgegearc.net/bitstream/handle/20.500.12242/1999/07-00159.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

KUZNETSOVA, N. V. Energy Strategy of the Russian Federation. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, v. 6, n. 5, 2015, p.160-168, 2039-9340. doi.org/10.36941/mjss

LAI, L. L. et al. Lessons learned from July 2012 Indian blackout, 9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2012.2173.

LAMNATOU, C.; CRISTOFARI, C.; CHEMISANA, D. Renewable energy sources as a catalyst for energy transition: Technological innovations and an example of the energy transition in France, *Renewable Energy*, v. 221, 2024, 119600, 0960-1481. doi.org/10.1016/j.renene.2023.119600

LE QUERE, C. et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, v.10, pp.647–653, 2020. doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x

LEE, W. S. Benchmarking the energy efficiency of government buildings with data envelopment analysis. *Energy and Buildings*, v. 40, p. 891–895, 2008.

LEME, A. A. Globalização e reformas liberalizantes: Contradições na reestruturação do setor elétrico brasileiro nos anos 1990, *Revista de Sociologia e Política, Ciências Sociais*, n.25, pp.171-192. 2005. doi.org/10.1590/S0104-44782005000200013

LIU, J. et al. A Survey of DEA Applications. *The International Journal of Management Science*, v.41, n.5, 2013, p.893-902. doi.org/10.1016/j.omega.2012.11.004

LIU, N.; ANG, B. W. Factors shaping aggregate energy intensity trend for industry: Energy intensity versus product mix. *Energy Economix*, v.29, p.609-635, 2007.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. *Estudos Avanço*. v. 23, n. 65, p. 121-130, 2009.

MAÇADA, A. C. G.; BEEKER, J. L. Measuring the efficiency of investments in information technology in Brazilian Banks. In: *Second International Conference on Operations and Quantitative Management (ICOQM-II)* Ahmedabad, Anais... India: The Land of Mahatma Gandhi, 1999.

MACEDO, M. A. S.; BENGIO, M. C. Avaliação de eficiência organizacional através de análise envoltória de dados. In: *VIII Congresso Internacional de Custos*, Punta del Leste, 2003.

MANU, S. et al. An initial An Initial Parametric Evaluation of the Impact of the Energy Conservation Building Code of India on Commercial Building Sector, 12th Conference of IBPSA, Proceedings of Building Simulation 2011, Sydney, 2011, pp. 1571-1578. doi.org/10.26868/25222708.2011.1530

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: Seca e desmatamento. *Geosp – Espaço e Tempo*, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2016. doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2015.100879

MARIANO, E. B.; ALMEIDA, M. R.; REBELATTO, D. A. N. Peculiaridades da análise por envoltória de dados. In. XII SIMPEP, Bauru, 2006.

MARTINEZ, M. D.; EBENHACK, W. B.; WAGNER P. T. Energy Efficiency: Concepts and Calculations, v. 1, p.7-26, 2019.

MCNEIL, M. A.; CARREÑO, A. M. Impacts Evaluation of Appliance Energy Efficiency Standards in Mexico since 2000. International Energy Program Evaluation Conference, 2015. Disponível em: <https://international.lbl.gov/publications/impacts-evaluation-appliance-energy>. Acesso em: 10 set. 2024.

MENEGAKI, A. N.; TSANI, S. Critical Issues to Be Answered in the Energy-Growth Nexus (EGN) Research Field. *The Economics and Econometrics of the Energy-Growth Nexus*, Elsevier, 2018, 141-184.

MME. Ministério de Minas e Energia. Dados estatísticos [dataset]. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos/de/ie/importacoes-exportacoes-b.xlsx>. Acesso em: 2 ago. 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Eficiência Energética 2030. Brasília: MME, 2020. Disponível em: Acesso em: 2 ago. 2023.

MOMETE, D. C. Analysis of the Potential of Clean Energy Deployment in the European Union. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2018, v.6, 54811-54822.

MOURA, F.R.; JUNIOR, F. M. R. 2030 Agenda: discussion on Brazilian priorities facing air pollution and climate change challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, v.30, p.8376–8390, 2023. doi.org/10.1007/s11356-022-24601-5

MTES. Ministry for the Ecological and Inclusive Transition. Energy efficiency action plan for France: Pursuant to Articles 4 and 14 of Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services. 2023. Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-05/FR%20-%20Energy%20Efficiency%20Action%20Plan%20EN.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.

NDLOVU, V. C. The role of renewable energy in the South African energy supply mix and economy. 2020. Tese de doutorado, Universidade de Pretoria. Disponível em: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/76026/Ndlovu_Role_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y. Acesso em: 25 set. 2024.

NEJAT, P. et al. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 43, 2015, p.843-862, 1364-0321. doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066.

NRCAN. Natural Resources Canada. Energy Efficiency in Canada. Report to Parliament under the Energy Efficiency Act (2017-2018). 2018. Disponível em: <https://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistics/parliament/2017-2018/pdf/parliament17-18.pdf>. Acesso em: 5 set. 2024.

NRCAN. Natural Resources Canada. Energy Efficiency: An Essential Part of Canada's Net Zero Future. Report to Parliament under the Energy Efficiency Act (2021-2022). 2022. Disponível em: https://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistics/parliament/2021-2022/pdf/2021-2022-NRCan_ReportToParliament-EEAct-EN.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

NRCAN. Natural Resources Canada. Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change: Canada's Plan to Address Climate Change and Grow the Economy. 2016. Disponível em: https://publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En4-294-2016-eng.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. Innovation for Our Energy Future: Renewable Energy in China. 2004. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35787.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

ODYSSEE-MURE. Ministry for the. Recent Energy Demand and Energy Efficiency Trends in France (2000-2019), 2021. Disponível em: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-france.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.

ONUT, S.; SONER, S. Energy efficiency assessment for the Antalya Region hotels in Turkey. *Energy and Buildings*, v. 38, p. 964–971, 2006.

OZAWA, A.; TSANI, T.; KUDOH Y. Japan's pathways to achieve carbon neutrality by 2050 – Scenario analysis using an energy modeling methodology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 169, 2022, 112943, 1364-0321. doi.org/10.1016/j.rser.2022.112943.

PASE, H. L.; ROCHA, H. J. O governo Lula e as políticas públicas do setor elétrico, *Revista Debates, Ciências Sociais*, vol.4, n.2, pp.32-59. 2010. doi.org/10.22456/1982-5269.16382

PEREIRA, S. L. Ecoeconomia tecnológica cooperativa – uma proposta conceitual: ciência e tecnologia da automação como ferramentas de inclusão social e de suporte ao desenvolvimento sustentável. 2009. 169p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

PÉREZ, E. N. Unravelling Energy Relations between Russia and Germany: The impact of Russia's aggression against Ukraine since 2000 on German discourse. Dissertação de Mestrado em Relações Internacionais e Europeias, Universidade de Linköping, Departamento de Gestão e Engenharia, 2023. Disponível em: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-195382>. Acesso em: 30 set. 2024.

POO, M. Innovation and reform: China's 14th Five-Year Plan unfolds, *National Science Review*, v.8, n.1, 2021. doi.org/10.1093/nsr/nwaa294

PROSKURYAKOVA, L.; KOVALEV, A. Measuring energy efficiency: Is energy intensity a good evidence base? *Applied Energy*, v. 138, 2015, p.450-459, 03062619. doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.060.

QI, X.; GUO, B. Determining Common Weights in Data Envelopment Analysis with Shannon's Entropy. 2014, v.16, n.12, 6394-6414. doi.org/10.3390/e16126394

RAMANATHAN, R. A holistic approach to compare energy efficiencies of different transport modes. *Energy Policy*, v. 28, p. 743–747, 2000.

REBELATTO, B. G. Eficiência energética nas universidades: uma contribuição para o objetivo do desenvolvimento sustentável 7, *Dissertação (Mestrado em Engenharia)*, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

RFA. Renewable Fuels Association. Ethanol Industry Outlook, 2023. Todas as seções. Disponível em: <https://d35t1syewk4d42.cloudfront.net/file/2432/2023%20RFA%20Outlook%20FINAL.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

ROGELJ, J. et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C, *Nature*, v. 534, 2016, p.631-639. doi.org/10.1038/nature18307.

ROSEN, M. A. Energy Sustainability with a Focus on Environmental Perspectives, *Frontiers in Ecology and Evolution*, Volume 5, p.217–230, 2021. doi.org/10.1007/s41748-021-00217-6.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Energy, environment and sustainable development, *Applied Energy*, v.64, n.4, 1999, p.427-440, 0306-2619. doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00111-7.

ROSENBERG, A.; WINKLER, H. Policy review and analysis: Energy efficiency strategy for the Republic of South Africa, v. 22, n. 4, 2011, 2413-3051. Disponível em: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-447X2011000400006&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 22 set. 2024.

SANTOS, A.; NOVA, S. P. C. C. Proposta de um modelo estruturado de análise de demonstrações contábeis. *RAE-eletrônica*, v. 4, n. 1, Art. 8, 2005.

SCHURR, S. H. Energy Efficiency and Productive Efficiency: Some Thoughts Based on American Experience. *The Energy Journal*, v.3, n.3, 1982, p.3-14. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/41322143>. Acesso em 20 out. 2023.

SCOPUS. Data base. 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 21 set. 2023.

SELOD, H.; SHILPI, F. Rural-urban migration in developing countries: Lessons from the literature, *Regional Science and Urban Economics*, v. 91, 2021, 0166-0462. doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2021.103713.

SONG, C. Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO₂ for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing, *Catalysis Today*, v. 115, 2006, p.2-32,0920-5861. doi.org/10.1016/j.cattod.2006.02.029.

SORLIN, S. *The Extractivist Paradigm: Arctic Resources and the Planetary Mine. Resource Extraction and Arctic Communities*. Cambridge University Press, 2022, p.3-32. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/725B9C0C6A807657A32F85BBCF944191/9781009100236c1_3-32.pdf/the-extractivist-paradigm.pdf. Acesso em 12 out. 2023

SOUTH AFRICAN GOVERNMENT. National Energy Efficiency Strategy For South Africa: March 2005, Reviewed October 2008. General Notice, 2009. Disponível em: https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201409/32249580.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

SOUZA, G. C. P. Crescimento econômico, desmatamento e emissões de gases de efeito estufa: análises prospectivas para os biomas brasileiros numa perspectiva de sustentabilidade. Tese de Doutorado em Economia Aplicada, Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Ciências Econômicas, Minas Gerais, 2022.

SOUZA, M. G. Z. N. Avaliação da Eficiência Energética usando Análise Envolvória de Dados: Aplicação aos países em desenvolvimento, Tese de Doutorado em Ciências, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-26072013-180526/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

SOUZA, R. A. Análise econômica das emissões de CO₂ na produção marítima de petróleo, Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Pós Graduação Engenharia Ambiental, Recife, 2016.

TOLMASQUIM, M. As origens da crise energética brasileira, *Revista Pontos de Vista, Ambiente & Sociedade*, vol.3, n.6, pp.179-183. 2001. doi.org/10.1590/S1414-753X2000000100012

TULKENS, H.; VANDEM EECKAUT P. Non-parametric efficiency, progress and regress measures for panel data: methodological aspects. *European Journal of Operational Research*, v. 80, p. 474– 499, 1995.

UNEP. United Nations Global Crisis Response Group. Impact of the war in Ukraine on the world economy, v. 1, 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pages/wp-content/uploads/2022/04/UN-GCRG-Brief-1.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

UNFCCC. United Nations Framework Convention. Climate Change, Rio de Janeiro: United Nations, 1992. Disponível em: <http://goo.gl/SQ35Xv>. Acesso em: 2 out. 2023.

UNITED KINGDOM. Net zero government emissions roadmap. 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6569cb331104cf000dfa7352/net-zero-government-emissions-roadmap.pdf>. Acesso em: 1 set. 2024.

UNITED KINGDOM. Second national communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/uknc2%20United%20Kingdom.pdf>. Acesso em: 1 set. 2024.

UNITED KINGDOM. The Carbon Plan: Delivering our low carbon future. 2011. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a795949e5274a2acd18c149/1358-the-carbon-plan.pdf>. Acesso em: 1 set. 2024.

UNITED KINGDOM. The Clean Growth Strategy: Leading the way to a low carbon future. 2017. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5ad5f11ded915d32a3a70c03/clean-growth-strategy-correction>. Acesso em: 1 set. 2024.

VASCONCELLOS, M. A. S.; OLIVEIRA, R. G. Manual de microeconomia. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010. 317p. ISBN 978-85-224-2281-4.

VERHAEGHE, G.; MAUERHOFER, National progress towards supranational climate & energy goals due to policies & their mixes? Insights from Northern & Western Europe, Journal of Environmental Management, v.348, 2023, 03014797. doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119304.

WANG, S. S. et al. CO2 emissions, energy consumption and economic growth in China: A panel data analysis, Energy Policy, v.39, n.9, 2011, p.4870-4875, 0301-4215. doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.032.

WEC. WORLD ENERGY COUNCIL. Energy Efficiency: A Recipe for Success For sustainable energy. 2010. ISBN: 978 0 946121 00 7.

WENTINK, G. J. A disaster of politics: The energy supply crisis in South Africa. Jamba: Journal of Disaster Risk Studies, v. 15, n. 1, 2023. Doi.org/10.4102/jamba.v15i1.1492

WMO. World Meteorological Organization. 2016. Disponível em: <https://wmo.int/topics/climate>. Acesso em: 31 out. 2023.

WORLD BANK. Bank Open Data. World Development Indicators: Population. The World Bank Group, 2023. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2021&locations=BR-CN-US-DE-PL&start=1960>. Acesso em: 8 set. 2023.

WORLD BANK. Energy efficiency in Russia: Untapped reserves (English). Washington, D.C. World Bank Group, 2014. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/750871468307169609/Energy-efficiency-in-Russia-untapped-reserves>. Acesso em: 30 set. 2024.

WORLD BANK. Energy intensity” [dataset] – processed by Our World in Data. World Bank and International Energy Agency, World Development Indicators. 2024d. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-intensity-of-economies>.

WORLD BANK. Força de trabalho total, 2024b. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/SL.TLF.TOTL.IN?name_desc=false. Acesso em: 25 out. 2024.

WORLD BANK. Formação bruta de capital fixo (em valores constantes de 2015, US\$), 2024c. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NE.GDI.FTOT.KN?year=1960>. Acesso em: 25 out. 2024.

WORLD BANK. Produto Interno Bruto, Paridade de Poder de Compra (em dólares internacionais correntes), 2024. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.CD?end=2017&name_desc=false&start=2017. Acesso em: 25 out. 2024.

YEH, Q. The application of data envelopment analysis in conjunction with financial ratios for bank performance evaluation. *J. Opl. Res.* v. 47, p. 980-988, 1996.

YIN, J.; XU, J. Five-Year Plans Formulated in a Scientific Manner. *China's Plan for Economic and Social Development*. Springer, Singapore, 2022, pp.183-208. doi.org/10.1007/978-981-19-5904-2_4

YORK, D.; KUSHLER, M. ACEEE's 3rd National Scorecard on Utility and Public Benefits Energy Efficiency Programs: A National Review and Update of State-Level Activity. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington, DC, 2005.

ZAKARI, A.; ADEDOYN, F.F.; BEKUN, F.V. The effect of energy consumption on the environment in the OECD countries: economic policy uncertainty perspectives, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 52295–52305. doi.org/10.1007/s11356-021-14463-8.

ZHANG, S. et al. 2023. The Impact of International Relations Patterns on China's Energy Security Supply, Demand, and Sustainable Development: An Exploration of Oil Demand and Sustainability Goals. *Sustainability*, v.15. doi.org/10.3390/su151712801

ZHANG, T.; SONG, Y.; YANG, J. 2021. Relationships between urbanization and CO2 emissions in China: An empirical analysis of population migration, v.16, n.8. doi.org/10.1371/journal.pone.0256335

ZHANG, X. P. et al. 2011. Total-factor energy efficiency in developing countries. *Energy Policy*, v. 39, p. 644-650.

ZHANG, Z.; REN X. Causal Relationships between Energy Consumption and Economic Growth, *Energy Procedia*, v. 5, 2011, p.2065-2071,1876-6102. doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.356.

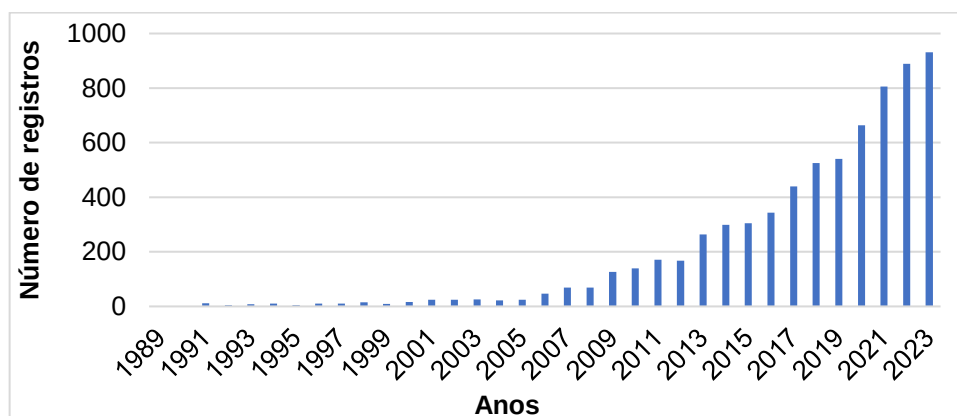
ZHOU, P.; ANG, B. W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance. *Energy Policy*, v. 36, p. 2911-2916, 2008.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European Journal of Operational Research*, v. 189, p. 1–18, 2008.

- **Análise dos artigos**

A Figura 29 foi elaborado para representar os anos de publicação no *Scopus* da 1ª e 2ª combinação de palavras. Foi observado que as publicações a partir do ano de 2005 apresentam uma tendência significativa, sendo que o ano de 2023 retornou o maior número de publicações, correspondendo a 931 publicações.

Figura 29 – Publicações no *Scopus* da 1ª e 2ª combinação de palavras

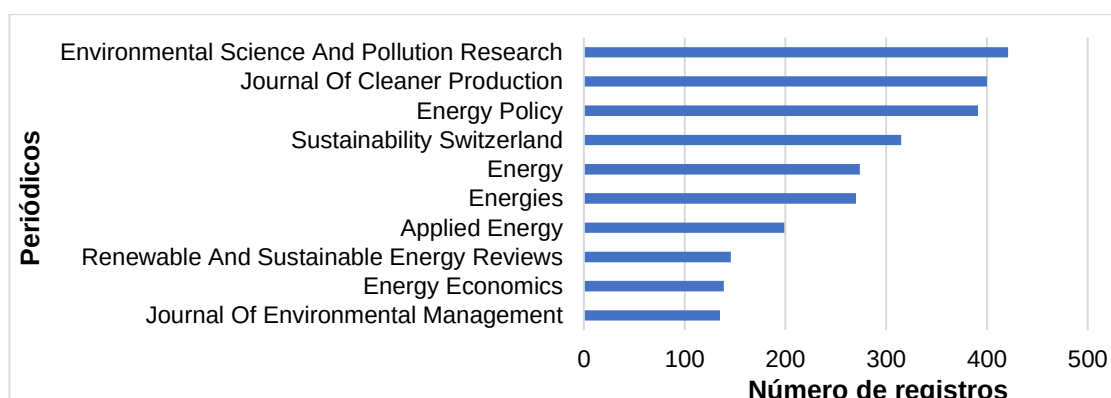


Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

Há um aumento significativo na pesquisa acadêmica sobre os temas relacionados nas últimas duas décadas, refletindo um reconhecimento crescente da importância dessas questões para o desenvolvimento sustentável e o bem-estar global.

A Figura 30 apresenta os periódicos com maiores publicações, listados os 10 mais relevantes. O periódico *Environmental Science and Pollution Research* lidera, com 421 publicações.

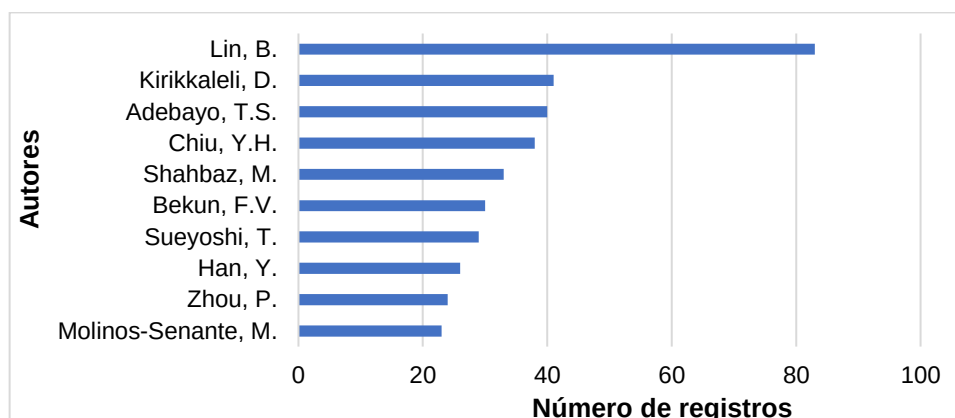
Figura 30 – Periódicos no *Scopus* da 1ª e 2ª combinação de palavras



Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

A Figura 31 apresenta os dez autores com maior número de publicações. O autor Li, B. é aquele com maior número de publicações sobre o tema, são 83. Os autores Kirikkaleli, D.; Adebayo, T. S. e Chiu, Y. H. vêm em seguida, com cerca de 40 publicações cada.

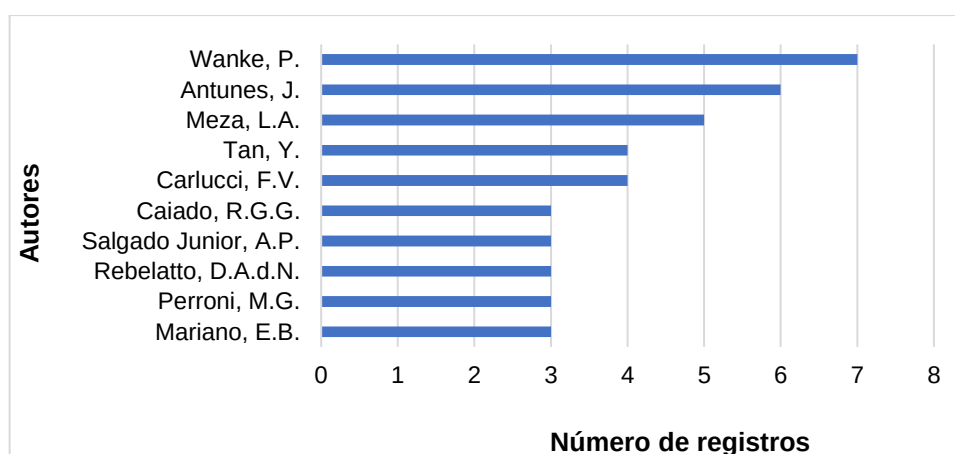
Figura 31 – Os dez autores com maior número de publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras



Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

A Figura 32 traz entre os autores brasileiros, os dez autores com maior número de publicações, no qual Wanze, P.; Meza, L.A. e Carlucci, F. V. se destacaram como os mais relevantes no país.

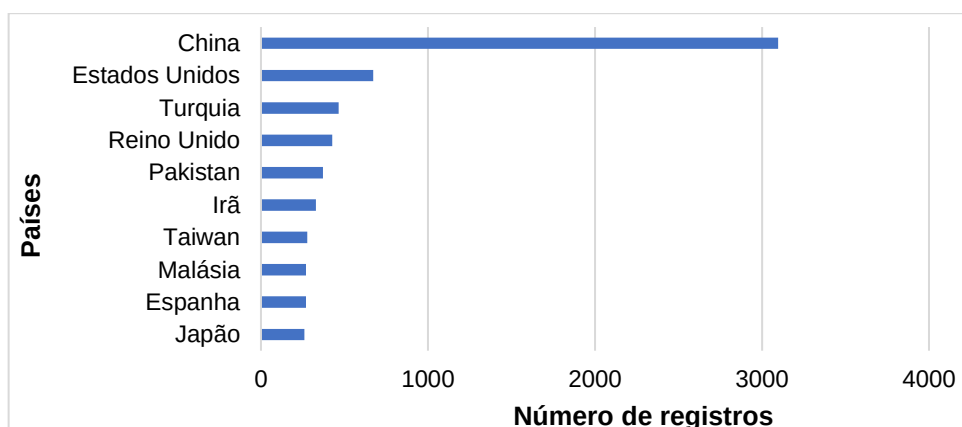
Figura 32 – Os dez autores brasileiros com maior número de publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras



Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

A Figura 33 ressalta os dez países com maior quantidade de publicações, mostrando que a China é o país que, disparadamente, lidera com 3097 publicações acerca do tema. Cabe ressaltar que o Brasil tem 141 resultados nesta pesquisa.

Figura 33 – Os dez países com maior quantidade de publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras

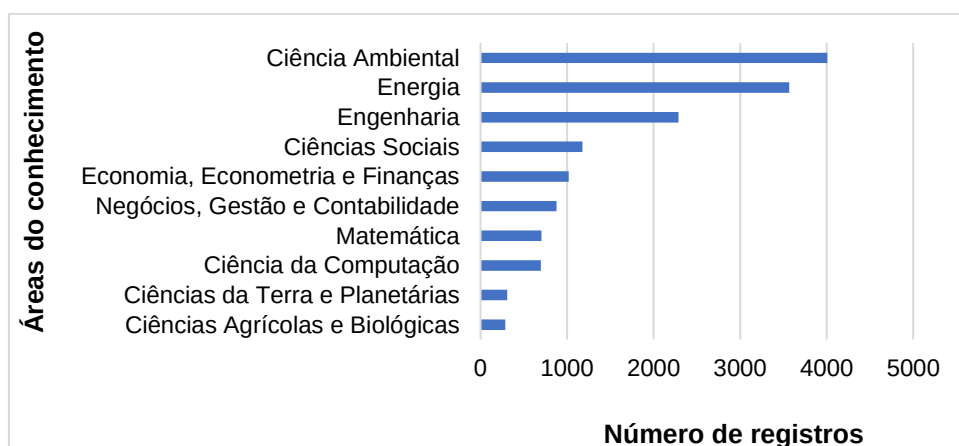


Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

Assim, nota-se a importância da temática para a China, principalmente, e a iniciante e ainda pequena, participação e relevância de estudos brasileiros acerca do tema.

Quando relacionadas às áreas de conhecimento com maiores publicações, as áreas de Ciência Ambiental e Energia lideram com maior quantidade de registros, com 7073 e 6068 publicações, respectivamente, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 – Áreas de conhecimento com maiores publicações da 1ª e 2ª combinação de palavras



Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

Com base no número de documentos sobre o tema, os estudos mais relevantes para a pesquisa foram analisados e resumidos. No Quadro 1, estão representados os dez principais artigos com maior relação sobre o tema proposto, constando os autores, ano de publicação, revista que foi publicada e número de citações.

Quadro 1 – Relação das publicações mais relevantes analisadas

Publicação	Autores	Revista	Ano	Citações
Total-factor energy efficiency of regions in China	Hu, J.L.; Wang, S. C.	Energy Policy	2006	1231
How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO2 emissions?	Balsalobre-Lorente, B.; Shahbaz, M.; Roubaud, D.; Sahbi, F.	Energy Policy	2018	1061
Non-renewable and renewable energy consumption and CO2 emissions in OECD countries: A comparative analysis	Sahar, S.; Ruhul, A. S.	Energy Policy	2014	821
Impact of renewable energy consumption and financial development on CO2 emissions and economic growth in the MENA region: A panel vector autoregressive (PVAR) analysis	Charfeddine, L.; Kahia, M.	Renewable Energy	2019	729
CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries	Pao H. T.; Tsai, C. M.	Energy Policy	2010	694
Economic growth, CO2 emissions and energy consumption: What causes what and where?	Acheampong, A. O.	Energy Economics	2018	539
Efficiency and abatement costs of energy-related CO2 emissions in China: A slacks-based efficiency measure	Choi, Y.; Zhang, N.; Zhou, P.	Applied Energy	2020	510
Consumption-based emission accounting for Chinese cities	Zhifu M.; Yunkun, Z.; Dabo, G.; Yuli, S.; Zhu, L.; Cong, R.; Xiao-Chen, Y.; Yi-Ming, W.	Applied Energy	2016	509
Role of renewable energy and non-renewable energy consumption on EKC	Danish, Zhang, B.; Wang, B.; Wang, Z.	Journal of Cleaner Production	2017	489
Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance	Zhou, P.; Ang, B. W.	Energy Policy	2008	406

Fonte: Dados adaptados de SCOPUS (2024)

APÊNDICE B – As principais ferramentas computacionais do método DEA

Como mencionado anteriormente, nos últimos anos, pacotes de software para DEA foram desenvolvidos devido ao grande interesse e ao grande número de aplicações utilizando a abordagem DEA. Esses softwares incluem principalmente modelos básicos e foram desenvolvidos, em sua maioria, para evitar o esforço de rodar separadamente os PPLs para cada DMU, a fim de obter a avaliação final. O Quadro 2 mostra algumas das principais ferramentas computacionais do método DEA, sendo quase todas rodando no sistema operacional *Windows*. Essa mesma tabela traz as principais características de cada pacote de software.

Quadro 2 – Ferramentas computacionais DEA

Ferramenta	Modelos	Características
DEA Frontier	Modelos CCR e BCC. Orientado a entrada e saída.	Utiliza o Excel Solver e não define limites para o número de DMUs, entradas ou saídas. Software gratuito.
DEA Solver Pro	Modelos CCR e BCC, Supereficiência, Eficiência Alocativa, Índice de Malmquist, Modelos Não Orientados, Variáveis Não Discricionárias, Restrições de Peso	Suporta uma variedade de modelos DEA, incluindo diferentes orientações e retornos de escala. Ideal para análises complexas e personalizadas. Software comercial.
DEAP (Data Envelopment Analysis Program)	Modelos CCR e BCC. Modelos de eficiência alocativa e global. Índice de Malmquist.	Interface do Windows. Calcula índices de Malmquist, mas outros modelos amplamente utilizados (como restrições de pesos) não estão disponíveis. Software gratuito.
EMS (Efficiency Measurement System)	Modelos CCR e BCC. Supereficiência. Modelos com variáveis não discricionárias. Restrições de peso. Free Disposal Hull. Modelos de retorno crescente e decrescente de escala.	Restrições de peso, embora os resultados frequentemente sejam diferentes daqueles obtidos ao executar cada problema de PL individualmente. Entrada de dados apenas via Excel ou ASCII. Este pacote usa o modelo de ponto interior para resolver LPPs. Calcula índices de Malmquist. Software gratuito.
Frontier Analyst	Modelos CCR e BCC.	Boa interface gráfica. Os pesos não estão disponíveis. Entrada de dados por editor ou Excel. Software comercial.
IDEAL (Interactive Data Envelopment Analysis Laboratory)	Modelos CCR e BCC.	Ferramenta visual para problemas tridimensionais. Software gratuito.
MaxDEA X	Modelos CRS, VRS, NIRS e NDRS. Não orientados, orientados a entrada e saída.	Suporte a múltiplos retornos de escala e orientações; possui funcionalidades de análise avançada com opções de relatórios detalhados. Software comercial.
OnFront	Modelos CCR e BCC, Orientado a Entrada e Saída. Índices de produtividade de Malmquist. Forte e fraca descartabilidade.	Capacidade de simulação e produtividade de Malmquist, incluindo a decomposição em eficiência e mudança técnica. Software comercial.

R - Benchmarking	Suporta diferentes suposições (FDH, VSR, DRS, CRS, IRS, ADD) e utiliza diferentes medidas (entrada, saída, gráfico hiperbólico, aditivo, super, direcional).	Ferramenta altamente flexível em R Studio; oferece múltiplas orientações e suposições; ideal para usuários com conhecimento intermediário de programação em R. Software gratuito.
R - FEAR (Frontier Efficiency Analysis with R)	Suporta diferentes suposições (FDH, VSR, DRS, CRS, IRS, ADD) e utilizando diferentes medidas (entrada, saída, gráfico hiperbólico, aditivo, super, direcional).	Similar ao Benchmarking, com funcionalidades específicas para análises econométricas avançadas; oferece uma ampla gama de medidas de eficiência. Software gratuito.
SAGEPE	Modelos CRS e VRS. Orientado a entrada e saída.	Desenvolvido a partir do pacote R benchmarking, com funcionalidades de avaliação de eficiência, folgas, benchmarking e Stepwise. Software gratuito.
SIAD (Sistema Integrado de Administração Acadêmica)	Modelos CCR e BCC orientados a entrada e saída. Fronteira Invertida. Restrições de Peso.	Restrições de peso disponíveis para regiões de garantia e pesos virtuais. Entrada de dados através de editor ou arquivo ASCII. Sem gráficos disponíveis. Software gratuito.
Warwick DEA	Modelos CCR e BCC. Modelos com variáveis exógenas. Restrições de peso. Supereficiência. Variáveis não discricionárias para BCC.	Suporta variáveis exógenas e análise com restrições de peso; entrada de dados em formato ASCII; ideal para análises com necessidade de customização de variáveis. Software comercial.

Fonte: Adaptado de HAYNES, DINC (2005); BARR (2004); MEZA *et al.* (2005)

Embora os mais recentes desenvolvimentos teóricos tenham sido introduzidos nos pacotes de DEA e existem muitas opções disponíveis, frequentemente observamos que os resultados da DEA podem variar de um pacote para outro. Isso acontece mesmo para os modelos básicos. Assim, a possibilidade de programar modelos em DEA em linguagem computacional é interessante, pois oferece ao usuário uma maior flexibilidade na implementação computacional dos modelos, inclusive na investigação de inovação, análise de dados customizada ao estudo de caso e aplicações específicas.

APÊNDICE C – Resultados complementares: Algoritmo R desenvolvido

```

# Carregar pacote
library(Benchmarking)

# Banco de dados
dados <- read.csv("dados.csv")

# Função para análise DEA em janela
analise_dea_janela <- function(dados, janela) {
  resultados <- list()
  anos <- unique(dados$Ano)

  for (inicio in seq(1, length(anos) - janela + 1)) {
    fim <- inicio + janela - 1
    sub_dados <- subset(dados, Ano >= anos[inicio] & Ano <= anos[fim])

    for (ano in anos[inicio:fim]) {
      dados_ano <- subset(sub_dados, Ano == ano)

      # Análise DEA tradicional
      dea_classico <- dea(
        X = as.matrix(dados_ano[, c("Entradas")]),
        Y = as.matrix(dados_ano[, "Saidas"]),
        RTS = "vrs",
        ORIENTATION = "in"
      )
      # Extrair eficiências clássicas
      eficiencia_classica <- dea_classico$eff

      # Análise DEA com fronteira invertida (troca de inputs e outputs)
      dea_invertida <- dea(
        X = as.matrix(dados_ano[, "Saidas"]),
        Y = as.matrix(dados_ano[, c("Entradas")]),
        RTS = "vrs",
        ORIENTATION = "out"
      )
      # Extrair eficiências invertidas
      eficiencia_invertida <- dea_invertida$eff

      # Calcular índice composto
      indice_composto <- (eficiencia_classica + (1 - eficiencia_invertida)) / 2

      # Normalizar índice composto
      l_min <- min(indice_composto)
      l_max <- max(indice_composto)
      indice_normalizado <- (indice_composto - l_min) / (l_max - l_min)

      # Criar data.frame para os resultados
      resultados[[paste("Janela", anos[inicio], "-", anos[fim], "Ano", ano)]] <- data.frame(
        DMU = rownames(dados_ano),
        Eficiencia_Clasica = eficiencia_classica,
        Eficiencia_Invertida = eficiencia_invertida,
        Indice_Composto = indice_composto,
        Indice_Normalizado = indice_normalizado
      )
    }
  }

  return(resultados)
}

# Executar a análise DEA em janelas de 3 anos
resultados_dea <- analise_dea_janela(dados, janela = 3)

```

APÊNDICE D – Resultados complementares: Análise 1

Tabela 4 – Análise 1: EETF médio calculado para aos anos entre 2000 e 2010

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Argentina	0.496	0.452	0.424	0.429	0.439	0.454	0.467	0.484	0.484	0.456	0.497
Austrália	0.582	0.584	0.599	0.597	0.597	0.583	0.574	0.565	0.559	0.610	0.586
Brasil	0.795	0.783	0.786	0.885	0.983	0.981	0.961	0.923	0.854	0.826	0.799
Canadá	0.683	0.686	0.697	0.681	0.682	0.718	0.763	0.845	0.887	0.900	0.881
China	0.321	0.333	0.337	0.326	0.302	0.299	0.308	0.321	0.339	0.347	0.352
França	0.926	0.941	0.987	0.922	0.921	0.911	0.910	0.909	0.908	0.906	0.907
Alemanha	0.891	0.895	0.904	0.888	0.884	0.882	0.882	0.878	0.876	0.877	0.874
Índia	0.885	0.888	0.888	0.889	0.890	0.883	0.880	0.872	0.870	0.861	0.864
Indonésia	0.601	0.598	0.598	0.628	0.583	0.583	0.617	0.672	0.684	0.704	0.714
Itália	0.725	0.703	0.725	0.748	0.776	0.802	0.774	0.804	0.839	0.828	0.853
Japão	0.894	0.894	0.898	0.889	0.881	0.874	0.875	0.873	0.872	0.872	0.866
México	0.971	0.923	0.898	0.868	0.856	0.839	0.837	0.837	0.834	0.824	0.853
Rússia	0.507	0.517	0.541	0.549	0.565	0.575	0.586	0.617	0.623	0.622	0.627
Arábia Saudita	0.688	0.667	0.612	0.641	0.647	0.628	0.611	0.589	0.577	0.550	0.535
África do Sul	0.363	0.382	0.405	0.396	0.380	0.402	0.433	0.426	0.451	0.442	0.466
Coréia do Sul	0.730	0.718	0.703	0.722	0.739	0.742	0.732	0.723	0.714	0.700	0.689
Turquia	0.647	0.615	0.632	0.615	0.649	0.658	0.686	0.691	0.703	0.691	0.716
Reino Unido	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
EUA	0.719	0.713	0.724	0.732	0.740	0.726	0.738	0.728	0.734	0.748	0.764

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 – Análise 1: EETF médio calculado para aos anos entre 2011 e 2022

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	0.519	0.530	0.522	0.510	0.509	0.390	0.487	0.528	0.484	0.499	0.536	0.539
Austrália	0.606	0.620	0.637	0.649	0.635	0.549	0.568	0.606	0.622	0.653	0.632	0.671
Brasil	0.779	0.766	0.693	0.680	0.695	0.715	0.713	0.708	0.689	0.668	0.665	0.630
Canadá	0.867	0.867	0.873	0.882	0.889	0.898	0.892	0.896	0.875	0.860	0.884	0.886
China	0.373	0.350	0.355	0.340	0.358	0.275	0.286	0.292	0.268	0.302	0.294	0.279
França	0.915	0.916	0.915	0.920	0.920	0.909	0.916	0.924	0.925	0.934	0.930	0.928
Alemanha	0.880	0.879	0.882	0.883	0.885	0.865	0.874	0.889	0.908	0.906	0.903	0.901
Índia	0.862	0.850	0.865	0.868	0.878	0.854	0.864	0.872	0.881	0.877	0.878	0.874
Indonésia	0.707	0.754	0.754	0.742	0.801	0.815	0.802	0.758	0.755	0.766	0.774	0.753
Itália	0.860	0.810	0.863	0.859	0.935	0.963	0.941	0.940	0.910	0.903	0.899	0.926
Japão	0.870	0.868	0.860	0.857	0.859	0.842	0.851	0.865	0.879	0.876	0.885	0.894
México	0.820	0.831	0.825	0.808	0.827	0.834	0.863	0.831	0.835	0.783	0.753	0.765
Rússia	0.617	0.624	0.637	0.627	0.658	0.677	0.660	0.651	0.692	0.729	0.729	0.692
Arábia Saudita	0.533	0.539	0.543	0.520	0.518	0.515	0.499	0.500	0.488	0.488	0.493	0.478
África do Sul	0.472	0.498	0.517	0.499	0.483	0.468	0.483	0.506	0.521	0.529	0.583	0.566
Coréia do Sul	0.703	0.696	0.694	0.715	0.732	0.792	0.761	0.811	0.843	0.869	0.950	0.955
Turquia	0.748	0.764	0.776	0.798	0.813	0.771	0.784	0.788	0.782	0.811	0.804	0.825
Reino Unido	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
EUA	0.754	0.77	0.76	0.78	0.79	0.8	0.82	0.82	0.82	0.86	0.87	0.84

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 3 – Resumo dos resultados DEA obtidos na Análise 1

Período	Países	DMU	Eficiência Clássica	Eficiência Invertida	Índice Composto	Índice Normalizado	Nº
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Argentina	1	1	0.892523364	0.553738318	0.496277608	1
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Austrália	2	1	0.756524371	0.621737815	0.582122291	2
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Brasil	3	1	0.419670001	0.790164999	0.794750018	3
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Canadá	4	0.682882849	0.683322344	0.499780253	0.428159265	4
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	China	5	0.321251416	1	0.160625708	0	5
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	França	6	0.926387307	0.214634856	0.855876226	0.877705918	6
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Alemanha	7	1	0.266604247	0.866697876	0.891367507	7
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Índia	8	1	0.277377942	0.861311029	0.884566982	8
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Indonésia	9	0.600982147	1	0.300491073	0.176570395	9
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Itália	10	1	0.95897531	0.520512345	0.454332105	10
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Japão	11	1	0.262961634	0.868519183	0.893666781	11
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	México	12	0.9709879	0.214418905	0.878284498	0.905994818	12
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Rússia	13	0.507202228	1	0.253601114	0.117375049	13
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Arábia Saudita	14	0.687763805	0.412899467	0.637432169	0.601935334	14
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	África do Sul	15	0.36279895	0.824608782	0.269095084	0.13693512	15
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Coréia do Sul	16	1	0.521794561	0.739102719	0.730287405	16
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Turquia	17	1	0.653908009	0.673045996	0.646895338	17
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Reino Unido	18	1	0.094503784	0.952748108	1	18
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	EUA	19	0.719481401	1	0.359740701	0.251368971	19

Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Argentina	419	1	0.690590987	0.654704506	0.53931749	1179
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Austrália	420	1	0.54	0.73	0.670895287	1180
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Brasil	421	0.629806705	0.680010327	0.474898189	0.225108525	1181
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Canadá	422	0.886256219	0.766022363	0.560116928	0.37402705	1182
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	China	423	1	1	0.5	0.26897358	1183
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	França	424	1	0.245568012	0.877215994	0.928153128	1184
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Alemanha	425	1	0.277070674	0.861464663	0.900627903	1185
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Índia	426	1	0.307887427	0.846056286	0.873701985	1186
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Indonésia	427	0.753206471	1	0.376603236	0.533395	1187
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Itália	428	0.926086957	1	0.463043478	0.204392587	1188
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Japão	429	1	0.284924936	0.857537532	0.893765298	1189
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	México	430	0.764904591	0.330473315	0.717215638	0.648554797	1190
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Rússia	431	0.692159332	1	0.346079666	0	1191
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Arábia Saudita	432	0.478306852	0.782130261	0.348088296	0.3510051	1192
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	África do Sul	433	0.566436175	0.504799448	0.530818363	0.322828228	1193
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Coréia do Sul	434	0.955473196	0.659344029	0.648064584	0.52771432	1194
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Turquia	435	0.989324547	0.353442129	0.817941209	0.82457129	1195
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Reino Unido	436	1	0.163339159	0.918330421	1	1196
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	EUA	437	0.842195373	1	0.421097686	0.31092916	1197

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – IE em ktep/milhões de USD (em valores constantes de US\$ 2015)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	3.69	3.59	3.99	3.97	4.04	3.68	3.58	3.44	3.42	3.35	3.26	3.18	3.3	3.31	3.4	3.36	3.41	3.32	3.31	3.35	3.46	3.38	3.29
Austrália	6.18	5.93	5.9	5.79	5.65	5.52	5.58	5.53	5.54	5.44	5.34	5.24	4.99	4.93	4.79	4.68	4.54	4.5	4.4	4.33	4.39	4.28	4.12
Brasil	3.88	3.9	3.89	3.91	3.9	3.88	3.86	3.85	3.86	3.74	3.85	3.75	3.82	3.88	3.98	4.05	4.03	4.05	3.93	3.94	4.01	4.01	3.87
Canadá	9.31	9.04	8.77	8.89	8.77	8.41	8.2	7.67	7.41	7.34	7.11	7.06	6.99	6.97	6.95	6.86	7.09	7.17	7.08	6.97	6.78	6.63	6.44
China	10.89	10.38	10.11	10.48	10.84	10.72	10.41	9.81	9.18	8.95	8.93	8.75	8.41	8.05	7.69	7.21	6.71	6.51	6.39	6.31	6.37	6.3	6.3
França	4.36	4.42	4.38	4.45	4.39	4.34	4.17	4.02	4.03	3.97	4.02	3.85	3.84	3.83	3.65	3.66	3.56	3.47	3.39	3.28	3.2	3.23	2.83
Alemanha	3.99	4.04	3.96	3.98	3.97	3.92	3.88	3.58	3.59	3.55	3.59	3.27	3.29	3.34	3.12	3.09	3.04	2.97	2.86	2.77	2.73	2.74	2.47
Índia	6.42	6.22	6.16	5.84	5.73	5.52	5.39	5.31	5.43	5.5	5.34	5.28	5.29	5.11	5.08	4.82	4.54	4.46	4.4	4.25	4.28	4.21	4.21
Indonésia	5.42	5.34	5.3	5.07	5.14	4.94	4.79	4.48	4.3	4.34	4.26	4.1	3.84	3.5	3.48	3.26	3.18	3.17	3.24	3.19	3.12	3.04	3.04
Itália	2.93	2.88	2.9	3.03	3.01	3.04	2.96	2.91	2.9	2.86	2.88	2.76	2.73	2.68	2.53	2.61	2.55	2.55	2.48	2.44	2.48	2.48	2.3
Japão	4.69	4.59	4.6	4.5	4.55	4.45	4.39	4.29	4.17	4.25	4.29	3.97	3.82	3.77	3.63	3.52	3.47	3.43	3.36	3.28	3.19	3.29	3.15
México	3.6	3.72	3.76	3.97	3.89	4.01	3.9	3.8	3.78	3.9	3.68	3.72	3.68	3.64	3.47	3.3	3.21	3.07	3.06	3.04	3.21	3.26	3.16
Rússia	12.14	11.67	11.1	10.71	10.03	9.49	9.02	8.34	8.11	8.27	8.48	8.39	8.17	7.8	7.76	7.77	7.99	7.99	8.25	8.09	8.15	8.42	8.42
Arábia Saudita	5.16	5.38	6.25	5.63	5.11	5.11	5.36	5.55	5.75	6.35	6.73	6.38	6.27	6.03	6.44	6.32	6.26	6.42	6.05	6.03	6.23	5.95	5.81
África do Sul	9.22	8.65	7.94	8.66	9.01	8.24	7.94	8.19	8.61	8.86	7.99	7.89	7.36	7.13	7.44	6.95	7.16	7.05	6.75	6.72	6.95	6.9	6.57
Coreia do Sul	7.24	7	6.82	6.75	6.59	6.38	6.16	6.05	6.01	6.02	6.14	6.17	6.1	5.92	5.83	5.76	5.8	5.62	5.45	5.3	5.27	5.32	5.11
Turquia	3.27	3.2	3.17	3.18	2.97	2.84	2.94	3.02	2.94	3.08	3.06	2.92	2.92	2.63	2.59	2.65	2.72	2.71	2.59	2.61	2.57	2.49	2.49
Reino Unido	4.07	4.01	3.87	3.82	3.69	3.61	3.46	3.26	3.22	3.16	3.21	2.94	2.97	2.87	2.62	2.58	2.49	2.4	2.33	2.22	2.24	2.23	2.13
EUA	6.72	6.53	6.5	6.33	6.23	6.04	5.82	5.81	5.65	5.52	5.5	5.34	5.13	5.13	5.07	4.89	4.75	4.63	4.63	4.52	4.31	4.21	4.17

Fonte: Dados adaptados de WORLD BANK (2024d)

Tabela 7 – Força de trabalho

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	16581444	16651214	1.6E+07	1.7E+07	1.7E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	2E+07	2E+07	2.1E+07	1.9E+07	2.1E+07	2.2E+07
Austrália	9524764	9694446	9841072	1E+07	1E+07	1E+07	1.1E+07	1.1E+07	1.1E+07	1.1E+07	1.2E+07	1.2E+07	1.2E+07	1.2E+07	1.2E+07	1.3E+07	1.3E+07	1.3E+07	1.3E+07	1.4E+07	1.4E+07	1.4E+07	1.4E+07
Brasil	7.9E+07	8.1E+07	8.4E+07	8.6E+07	8.8E+07	9.1E+07	9.2E+07	9.3E+07	9.4E+07	9.6E+07	9.5E+07	9.5E+07	9.7E+07	9.9E+07	1E+08	1E+08	1E+08	1E+08	1.1E+08	1.1E+08	1E+08	1.1E+08	1.1E+08
Canadá	1.6E+07	1.7E+07	1.7E+07	1.7E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	2E+07	2E+07	2E+07	2E+07	2E+07	2E+07	2.1E+07	2E+07	2.1E+07	2.1E+07
China	7.3E+08	7.4E+08	7.5E+08	7.6E+08	7.6E+08	7.7E+08	7.7E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.7E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.8E+08	7.6E+08	7.8E+08	7.8E+08
França	4E+07	4E+07	4E+07	4E+07	4E+07	4.1E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.2E+07	4.3E+07	4.4E+07	4.4E+07	4.4E+07	4.4E+07	4.4E+07	4.3E+07	4.4E+07
Alemanha	2.8E+07	2.8E+07	2.8E+07	2.9E+07	2.9E+07	2.9E+07	2.9E+07	2.9E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3.1E+07	3.1E+07	3.1E+07	3.1E+07	3.1E+07	3E+07	3.1E+07	3.2E+07
Índia	3E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3E+07	3.1E+07	3.1E+07	3.2E+07	3.2E+07	3.2E+07	3.2E+07	3.2E+07	3.3E+07	3.3E+07	3.3E+07	3.4E+07	3.4E+07	3.4E+07	3.4E+07	3.5E+07	3.5E+07	3.4E+07	3.5E+07
Indonésia	1E+08	1E+08	1E+08	1E+08	1.1E+08	1E+08	1.1E+08	1.1E+08	1.1E+08	1.1E+08	1.2E+08	1.2E+08	1.2E+08	1.2E+08	1.2E+08	1.3E+08	1.3E+08	1.3E+08	1.3E+08	1.4E+08	1.4E+08	1.3E+08	1.4E+08
Itália	3.9E+08	4E+08	4.1E+08	4.1E+08	4.2E+08	4.2E+08	4.3E+08	4.4E+08	4.5E+08	4.6E+08	4.7E+08	4.7E+08	4.8E+08	4.8E+08	4.9E+08	5E+08	5E+08	5.1E+08	5.2E+08	5.2E+08	5.2E+08	5.4E+08	5.5E+08
Japão	2.3E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.5E+07	2.4E+07	2.5E+07	2.4E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.6E+07	2.6E+07	2.6E+07	2.6E+07	2.6E+07	2.6E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07
México	6.8E+07	6.8E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.6E+07	6.6E+07	6.6E+07	6.6E+07	6.6E+07	6.6E+07	6.6E+07	6.7E+07	6.7E+07	6.8E+07	6.9E+07	6.9E+07	6.9E+07	6.9E+07
Rússia	2.3E+07	2.3E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.5E+07	2.6E+07	2.6E+07	2.7E+07	2.7E+07	2.8E+07	2.8E+07	2.8E+07	2.9E+07	2.9E+07	2.9E+07	2.9E+07	2.9E+07
Arábia Saudita	3.8E+07	3.9E+07	3.9E+07	4E+07	4.2E+07	4.3E+07	4.5E+07	4.5E+07	4.6E+07	4.7E+07	4.8E+07	4.9E+07	5E+07	5.1E+07	5.2E+07	5.3E+07	5.4E+07	5.4E+07	5.5E+07	5.7E+07	5.3E+07	5.7E+07	5.9E+07
África do Sul	7.3E+07	7.2E+07	7.3E+07	7.3E+07	7.4E+07	7.4E+07	7.4E+07	7.5E+07	7.6E+07	7.6E+07	7.6E+07	7.6E+07	7.6E+07	7.6E+07	7.6E+07	7.5E+07	7.6E+07	7.5E+07	7.5E+07	7.4E+07	7.4E+07	7.4E+07	7.4E+07
Coréia do Sul	7079451	7333273	7625337	7948017	8227971	8558784	8989951	9448425	9918243	1E+07	1.1E+07	1.2E+07	1.2E+07	1.3E+07	1.3E+07	1.3E+07	1.4E+07	1.4E+07	1.5E+07	1.5E+07	1.6E+07	1.6E+07	1.7E+07
Turquia	2.2E+07	2.2E+07	2.3E+07	2.3E+07	2.2E+07	2.3E+07	2.3E+07	2.3E+07	2.4E+07	2.5E+07	2.6E+07	2.7E+07	2.8E+07	2.9E+07	2.9E+07	3E+07	3.1E+07	3.2E+07	3.3E+07	3.3E+07	3.1E+07	3.3E+07	3.5E+07
Reino Unido	1.5E+08	1.5E+08	1.5E+08	1.5E+08	1.5E+08	1.5E+08	1.5E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.6E+08	1.7E+08	1.7E+08	1.7E+08	1.7E+08	1.7E+08
EUA	1.9E+07	1.9E+07	1.9E+07	2E+07	2E+07	2E+07	2.1E+07	2.1E+07	2.1E+07	2.1E+07	2E+07	2.1E+07	2.1E+07	2.2E+07	2.2E+07	2.3E+07	2.3E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.4E+07	2.3E+07	2.4E+07	2.4E+07

Fonte: Dados adaptados de WORLD BANK (2024b)

Tabela 8 – Capital Bruto (em valores constantes de US\$ 2015)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	4.60E+10	3.81E+10	3.74E+10	5.69E+10	7.71E+10	1.01E+11	1.31E+11	1.75E+11	2.19E+11	1.94E+11	2.77E+11	3.76E+11	4.18E+11	5.45E+11	7.32E+11	9.27E+11	1.17E+12	1.62E+12	2.25E+12	3.06E+12	3.89E+12	8.17E+12	1.47E+13
Austrália	1.72E+11	1.64E+11	1.84E+11	2.09E+11	2.30E+11	2.50E+11	2.78E+11	2.98E+11	3.33E+11	3.48E+11	3.53E+11	3.69E+11	4.11E+11	4.28E+11	4.30E+11	4.26E+11	4.20E+11	4.22E+11	4.49E+11	4.54E+11	4.49E+11	4.69E+11	5.37E+11
Brasil	2.19E+11	2.42E+11	2.67E+11	2.85E+11	3.39E+11	3.70E+11	4.15E+11	4.90E+11	6.03E+11	6.37E+11	7.98E+11	9.02E+11	9.97E+11	1.11E+12	1.15E+12	1.07E+12	9.73E+11	9.59E+11	1.06E+12	1.14E+12	1.26E+12	1.61E+12	1.79E+12
Canadá	2.17E+11	2.31E+11	2.38E+11	2.51E+11	2.79E+11	3.10E+11	3.42E+11	3.68E+11	3.89E+11	3.51E+11	3.91E+11	4.17E+11	4.48E+11	4.60E+11	4.87E+11	4.75E+11	4.61E+11	4.86E+11	5.07E+11	5.22E+11	5.15E+11	6.09E+11	6.55E+11
China	3.27E+12	3.71E+12	4.27E+12	5.26E+12	6.40E+12	7.39E+12	8.50E+12	1.02E+13	1.25E+13	1.53E+13	1.81E+13	2.14E+13	2.38E+13	2.64E+13	2.82E+13	2.90E+13	3.10E+13	3.48E+13	3.94E+13	4.22E+13	4.31E+13	4.82E+13	5.05E+13
França	4.88E+11	4.73E+11	4.42E+11	4.32E+11	4.32E+11	4.37E+11	4.72E+11	5.01E+11	5.17E+11	4.71E+11	5.01E+11	5.49E+11	5.58E+11	5.60E+11	5.87E+11	6.06E+11	6.36E+11	6.67E+11	7.09E+11	7.41E+11	7.33E+11	7.70E+11	8.56E+11
Alemanha	3.18E+11	3.31E+11	3.33E+11	3.43E+11	3.64E+11	3.85E+11	4.15E+11	4.50E+11	4.70E+11	4.27E+11	4.41E+11	4.62E+11	4.69E+11	4.67E+11	4.69E+11	4.73E+11	4.87E+11	5.17E+11	5.41E+11	5.72E+11	5.39E+11	6.12E+11	6.65E+11
Índia	1.96E+11	2.03E+11	2.11E+11	2.20E+11	2.31E+11	2.46E+11	2.62E+11	2.80E+11	2.81E+11	2.50E+11	2.58E+11	2.61E+11	2.70E+11	2.84E+11	3.09E+11	3.33E+11	3.57E+11	3.80E+11	3.87E+11	4.06E+11	3.67E+11	4.04E+11	4.59E+11
Indonésia	2.76E+14	3.24E+14	3.54E+14	3.93E+14	5.15E+14	6.56E+14	8.06E+14	9.86E+14	1.37E+15	1.74E+15	2.13E+15	2.45E+15	2.82E+15	3.05E+15	3.44E+15	3.78E+15	4.04E+15	4.37E+15	4.79E+15	5.12E+15	4.90E+15	5.23E+15	5.70E+15
Itália	5.57E+12	6.93E+12	7.06E+12	7.91E+12	9.78E+12	1.19E+13	1.43E+13	1.75E+13	1.91E+13	2.16E+13	2.54E+13	3.00E+13	3.32E+13	3.52E+13	3.75E+13	3.96E+13	4.34E+13	4.82E+13	5.57E+13	5.72E+13	5.43E+13	6.98E+13	8.29E+13
Japão	2.57E+11	2.70E+11	2.88E+11	2.91E+11	3.04E+11	3.18E+11	3.35E+11	3.50E+11	3.48E+11	3.17E+11	3.23E+11	3.25E+11	2.97E+11	2.77E+11	2.72E+11	2.80E+11	2.91E+11	3.04E+11	3.16E+11	3.23E+11	2.99E+11	3.72E+11	4.25E+11
México	1.53E+14	1.47E+14	1.38E+14	1.35E+14	1.34E+14	1.38E+14	1.39E+14	1.37E+14	1.34E+14	1.17E+14	1.14E+14	1.16E+14	1.19E+14	1.25E+14	1.30E+14	1.34E+14	1.35E+14	1.38E+14	1.41E+14	1.43E+14	1.38E+14	1.41E+14	1.45E+14
Rússia	2.07E+14	2.17E+14	2.38E+14	2.62E+14	2.82E+14	2.92E+14	3.07E+14	3.29E+14	3.58E+14	3.72E+14	4.00E+14	4.19E+14	4.26E+14	4.37E+14	4.53E+14	4.81E+14	5.17E+14	5.78E+14	5.77E+14	5.79E+14	6.07E+14	6.58E+14	6.95E+14
Arábia Saudita	1.49E+12	1.46E+12	1.52E+12	1.66E+12	1.92E+12	2.07E+12	2.41E+12	2.69E+12	3.05E+12	2.90E+12	3.15E+12	3.58E+12	3.92E+12	3.73E+12	3.93E+12	4.45E+12	4.93E+12	5.23E+12	5.57E+12	5.44E+12	4.84E+12	5.65E+12	6.59E+12
África do Sul	1.23E+12	1.69E+12	1.94E+12	2.43E+12	3.13E+12	3.84E+12	4.98E+12	6.98E+12	9.20E+12	8.54E+12	1.00E+13	1.28E+13	1.47E+13	1.60E+13	1.69E+13	1.71E+13	1.87E+13	2.02E+13	2.15E+13	2.29E+13	2.32E+13	2.61E+13	3.17E+13
Coreia do Sul	1.23E+11	1.26E+11	1.28E+11	1.48E+11	1.86E+11	2.38E+11	2.89E+11	3.69E+11	4.44E+11	4.14E+11	4.84E+11	5.69E+11	6.15E+11	6.63E+11	7.17E+11	7.37E+11	6.40E+11	6.42E+11	6.58E+11	7.04E+11	6.64E+11	7.97E+11	1.02E+12
Turquia	3.81E+10	4.44E+10	7.05E+10	9.76E+10	1.47E+11	1.80E+11	2.27E+11	2.48E+11	2.67E+11	2.24E+11	2.88E+11	3.90E+11	4.28E+11	5.17E+11	5.91E+11	6.95E+11	7.65E+11	9.36E+11	1.12E+12	1.12E+12	1.39E+12	2.04E+12	4.38E+12
Reino Unido	2.37E+12	2.39E+12	2.35E+12	2.48E+12	2.70E+12	2.99E+12	3.18E+12	3.23E+12	3.14E+12	2.72E+12	2.76E+12	2.92E+12	3.17E+12	3.33E+12	3.60E+12	3.78E+12	3.89E+12	4.12E+12	4.40E+12	4.60E+12	4.60E+12	5.03E+12	5.48E+12
EUA	1.52E+11	1.67E+11	1.91E+11	2.18E+11	2.51E+11	2.92E+11	3.57E+11	4.46E+11	5.64E+11	5.45E+11	5.37E+11	5.93E+11	6.40E+11	7.19E+11	7.57E+11	7.96E+11	8.30E+11	8.33E+11	8.54E+11	8.70E+11	7.69E+11	8.19E+11	9.42E+11

Fonte: Dados adaptados de WORLD BANK (2024c)

Tabela 9 – Produto Interno Bruto com Paridade de Poder de Compra (PIB PPP) (em valores constantes de US\$ 2015)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	4.28E+11	4.18E+11	3.79E+11	4.20E+11	4.70E+11	5.28E+11	5.88E+11	6.58E+11	6.98E+11	6.61E+11	7.37E+11	7.97E+11	8.19E+11	8.49E+11	8.38E+11	8.65E+11	8.83E+11	1.04E+12	1.09E+12	1.06E+12	1.01E+12	1.20E+12	1.34E+12
Austrália	5.05E+11	5.33E+11	5.66E+11	5.94E+11	6.33E+11	6.67E+11	7.13E+11	7.63E+11	7.98E+11	8.74E+11	8.67E+11	9.39E+11	9.75E+11	1.06E+12	1.10E+12	1.10E+12	1.14E+12	1.19E+12	1.25E+12	1.34E+12	1.39E+12	1.47E+12	1.70E+12
Brasil	1.58E+12	1.64E+12	1.72E+12	1.77E+12	1.92E+12	2.05E+12	2.19E+12	2.39E+12	2.56E+12	2.57E+12	2.80E+12	2.97E+12	2.99E+12	3.12E+12	3.17E+12	2.99E+12	2.91E+12	2.98E+12	3.19E+12	3.33E+12	3.36E+12	3.79E+12	4.18E+12
Canadá	9.01E+11	9.38E+11	9.71E+11	1.02E+12	1.08E+12	1.17E+12	1.24E+12	1.30E+12	1.34E+12	1.31E+12	1.36E+12	1.43E+12	1.47E+12	1.55E+12	1.62E+12	1.59E+12	1.68E+12	1.77E+12	1.85E+12	1.90E+12	1.85E+12	2.13E+12	2.42E+12
China	3.68E+12	4.08E+12	4.52E+12	5.08E+12	5.74E+12	6.59E+12	7.66E+12	8.99E+12	1.00E+13	1.11E+13	1.24E+13	1.38E+13	1.52E+13	1.64E+13	1.74E+13	1.82E+13	1.93E+13	2.06E+13	2.25E+13	2.43E+13	2.52E+13	2.88E+13	3.18E+13
França	2.24E+12	2.34E+12	2.41E+12	2.47E+12	2.59E+12	2.62E+12	2.81E+12	2.99E+12	3.10E+12	3.02E+12	3.18E+12	3.42E+12	3.49E+12	3.63E+12	3.81E+12	3.89E+12	4.17E+12	4.39E+12	4.58E+12	4.84E+12	4.82E+12	5.15E+12	5.58E+12
Alemanha	1.59E+12	1.69E+12	1.76E+12	1.75E+12	1.82E+12	1.93E+12	2.07E+12	2.18E+12	2.26E+12	2.24E+12	2.33E+12	2.45E+12	2.47E+12	2.61E+12	2.66E+12	2.72E+12	2.86E+12	2.98E+12	3.13E+12	3.45E+12	3.34E+12	3.65E+12	3.91E+12
Índia	1.56E+12	1.65E+12	1.73E+12	1.81E+12	1.92E+12	1.98E+12	2.11E+12	2.18E+12	2.27E+12	2.18E+12	2.29E+12	2.35E+12	2.44E+12	2.56E+12	2.67E+12	2.77E+12	2.89E+12	3.04E+12	3.13E+12	3.34E+12	3.22E+12	3.54E+12	3.85E+12
Indonésia	1.00E+12	1.06E+12	1.13E+12	1.20E+12	1.30E+12	1.42E+12	1.54E+12	1.68E+12	1.82E+12	1.91E+12	2.06E+12	2.23E+12	2.41E+12	2.52E+12	2.61E+12	2.63E+12	2.72E+12	2.86E+12	3.07E+12	3.27E+12	3.22E+12	3.53E+12	3.98E+12
Itália	2.21E+12	2.37E+12	2.50E+12	2.75E+12	3.05E+12	3.39E+12	3.78E+12	4.18E+12	4.39E+12	4.76E+12	5.23E+12	5.62E+12	6.16E+12	6.50E+12	6.81E+12	7.20E+12	7.80E+12	8.35E+12	9.23E+12	9.93E+12	9.77E+12	1.14E+13	1.30E+13
Japão	1.54E+12	1.60E+12	1.64E+12	1.67E+12	1.70E+12	1.75E+12	1.89E+12	2.00E+12	2.09E+12	2.04E+12	2.08E+12	2.17E+12	2.17E+12	2.19E+12	2.20E+12	2.24E+12	2.42E+12	2.52E+12	2.60E+12	2.78E+12	2.63E+12	2.95E+12	3.30E+12
México	3.46E+12	3.55E+12	3.65E+12	3.75E+12	3.94E+12	4.11E+12	4.30E+12	4.48E+12	4.52E+12	4.30E+12	4.53E+12	4.63E+12	4.80E+12	5.02E+12	5.03E+12	5.20E+12	5.16E+12	5.26E+12	5.34E+12	5.40E+12	5.36E+12	5.60E+12	5.90E+12
Rússia	8.71E+11	9.34E+11	1.02E+12	1.06E+12	1.14E+12	1.21E+12	1.30E+12	1.41E+12	1.47E+12	1.45E+12	1.57E+12	1.63E+12	1.68E+12	1.73E+12	1.79E+12	1.93E+12	2.03E+12	2.10E+12	2.22E+12	2.27E+12	2.34E+12	2.51E+12	2.67E+12
Arábia Saudita	1.15E+12	1.18E+12	1.19E+12	1.24E+12	1.32E+12	1.40E+12	1.56E+12	1.64E+12	1.73E+12	1.70E+12	1.81E+12	1.99E+12	2.10E+12	2.15E+12	2.25E+12	2.31E+12	2.46E+12	2.53E+12	2.61E+12	2.64E+12	2.45E+12	2.68E+12	3.04E+12
África do Sul	1.00E+12	1.07E+12	1.17E+12	1.34E+12	1.47E+12	1.70E+12	2.13E+12	2.38E+12	2.88E+12	2.77E+12	2.93E+12	3.26E+12	3.48E+12	3.74E+12	3.76E+12	3.53E+12	3.54E+12	3.81E+12	4.23E+12	4.58E+12	4.65E+12	5.73E+12	6.01E+12
Coreia do Sul	8.22E+11	8.31E+11	8.20E+11	9.30E+11	1.03E+12	1.12E+12	1.19E+12	1.24E+12	1.35E+12	1.33E+12	1.41E+12	1.60E+12	1.68E+12	1.68E+12	1.73E+12	1.55E+12	1.49E+12	1.59E+12	1.71E+12	1.69E+12	1.43E+12	1.72E+12	1.98E+12
Turquia	6.09E+11	5.96E+11	6.12E+11	6.41E+11	7.36E+11	8.15E+11	9.45E+11	1.04E+12	1.14E+12	1.11E+12	1.27E+12	1.45E+12	1.55E+12	1.70E+12	1.86E+12	2.02E+12	2.12E+12	2.26E+12	2.30E+12	2.35E+12	2.39E+12	2.66E+12	3.26E+12
Reino Unido	1.03E+13	1.06E+13	1.09E+13	1.15E+13	1.22E+13	1.30E+13	1.38E+13	1.45E+13	1.48E+13	1.45E+13	1.50E+13	1.56E+13	1.63E+13	1.69E+13	1.76E+13	1.83E+13	1.88E+13	1.96E+13	2.07E+13	2.15E+13	2.13E+13	2.36E+13	2.57E+13
EUA	3.82E+11	4.01E+11	4.22E+11	4.43E+11	4.76E+11	5.17E+11	5.62E+11	6.09E+11	6.40E+11	6.34E+11	6.61E+11	6.97E+11	6.98E+11	7.31E+11	7.43E+11	7.60E+11	7.74E+11	7.92E+11	7.82E+11	7.96E+11	7.68E+11	8.42E+11	9.18E+11

Fonte: Dados adaptados de WORLD BANK (2024)

APÊNDICE E – Resultados complementares: Análise 2

Tabela 10 – Análise 2: EETF médio calculado para aos anos entre 2000 e 2010

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Argentina	0.496	0.452	0.424	0.429	0.439	0.454	0.467	0.484	0.484	0.456	0.497
Austrália	0.582	0.584	0.599	0.597	0.597	0.583	0.574	0.565	0.559	0.610	0.586
Brasil	0.795	0.783	0.786	0.769	0.983	0.981	0.961	0.923	0.854	0.826	0.799
Canadá	0.683	0.687	0.698	0.682	0.682	0.718	0.765	0.850	0.895	0.913	0.929
China	0.321	0.333	0.337	0.326	0.302	0.299	0.308	0.321	0.339	0.347	0.352
França	0.955	0.975	0.928	0.922	0.921	0.911	0.910	0.909	0.908	0.906	0.907
Alemanha	0.891	0.895	0.904	0.888	0.884	0.882	0.882	0.878	0.876	0.877	0.874
Índia	0.885	0.888	0.888	0.889	0.890	0.883	0.880	0.872	0.870	0.861	0.864
Indonésia	0.601	0.598	0.598	0.628	0.583	0.583	0.617	0.672	0.684	0.704	0.714
Itália	0.454	0.431	0.424	0.429	0.439	0.988	0.439	0.436	0.430	0.430	0.429
Japão	0.894	0.894	0.898	0.889	0.881	0.874	0.875	0.873	0.872	0.872	0.866
México	0.971	0.923	0.898	0.868	0.856	0.840	0.837	0.837	0.834	0.825	0.853
Rússia	0.507	0.517	0.541	0.549	0.565	0.575	0.586	0.617	0.623	0.622	0.627
Arábia Saudita	0.695	0.673	0.638	0.661	0.648	0.629	0.612	0.596	0.584	0.556	0.539
África do Sul	0.363	0.382	0.405	0.398	0.381	0.403	0.435	0.438	0.463	0.456	0.478
Coréia do Sul	0.730	0.718	0.703	0.722	0.739	0.742	0.732	0.723	0.714	0.700	0.689
Turquia	0.647	0.615	0.632	0.615	0.649	0.658	0.686	0.691	0.703	0.691	0.716
Reino Unido	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
EUA	0.719	0.713	0.724	0.732	0.740	0.726	0.738	0.728	0.734	0.748	0.764

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 – Análise 2: EETF médio calculado para aos anos entre 2011 e 2022

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	0.519	0.530	0.522	0.510	0.509	0.380	0.487	0.528	0.484	0.499	0.536	0.539
Austrália	0.606	0.620	0.637	0.649	0.635	0.549	0.568	0.606	0.622	0.653	0.632	0.671
Brasil	0.779	0.766	0.693	0.680	0.697	0.733	0.753	0.756	0.728	0.707	0.698	0.668
Canadá	0.909	0.912	0.910	0.907	0.901	0.914	0.912	0.915	0.876	0.862	0.884	0.886
China	0.333	0.350	0.355	0.340	0.358	0.275	0.286	0.292	0.268	0.302	0.284	0.269
França	0.915	0.916	0.915	0.920	0.920	0.909	0.916	0.924	0.928	0.934	0.930	0.928
Alemanha	0.880	0.879	0.882	0.883	0.885	0.865	0.874	0.889	0.908	0.906	0.903	0.901
Índia	0.862	0.850	0.865	0.868	0.878	0.854	0.864	0.872	0.881	0.877	0.878	0.874
Indonésia	0.707	0.754	0.754	0.742	0.801	0.815	0.802	0.758	0.755	0.766	0.774	0.753
Itália	0.437	0.432	0.430	0.579	0.428	0.275	0.286	0.292	0.972	0.975	0.925	0.926
Japão	0.870	0.868	0.860	0.857	0.859	0.842	0.851	0.865	0.879	0.876	0.885	0.894
México	0.823	0.834	0.832	0.814	0.827	0.834	0.863	0.831	0.835	0.783	0.753	0.770
Rússia	0.617	0.624	0.637	0.627	0.658	0.677	0.660	0.651	0.692	0.729	0.729	0.692
Arábia Saudita	0.543	0.546	0.548	0.526	0.522	0.520	0.505	0.500	0.488	0.488	0.493	0.478
África do Sul	0.491	0.516	0.532	0.510	0.500	0.488	0.499	0.521	0.529	0.531	0.583	0.566
Coréia do Sul	0.703	0.696	0.694	0.698	0.732	0.792	0.761	0.811	0.843	0.869	0.950	0.955
Turquia	0.748	0.764	0.776	0.798	0.813	0.771	0.784	0.788	0.782	0.811	0.804	0.825
Reino Unido	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
EUA	0.754	0.766	0.761	0.775	0.787	0.805	0.821	0.819	0.824	0.863	0.871	0.842

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 4 – Resumo dos resultados DEA obtidos na Análise 2

Período	Países	DMU	Eficiência Clássica	Eficiência Invertida	Índice Composto	Índice Normalizado	Nº
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Argentina	1	1	0.892523364	0.553738318	0.496277608	1
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Austrália	2	1	0.756524371	0.621737815	0.582122291	2
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Brasil	3	1	0.419670001	0.790164999	0.794750018	3
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Canadá	4	0.682882849	0.683322344	0.499780253	0.428159265	4
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	China	5	0.321251416	1	0.160625708	0	5
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	França	6	0.95507445	0.214634856	0.870219797	0.895813689	6
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Alemanha	7	1	0.266604247	0.866697876	0.891367507	7
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Índia	8	1	0.277377942	0.861311029	0.884566982	8
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Indonésia	9	0.600982147	1	0.300491073	0.176570395	9
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Itália	10	1	0.95897531	0.520512345	0.454332105	10
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Japão	11	1	0.262961634	0.868519183	0.893666781	11
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	México	12	0.9709879	0.214418905	0.878284498	0.905994818	12
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Rússia	13	0.507202228	1	0.253601114	0.117375049	13
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Arábia Saudita	14	0.694751011	0.412899467	0.640925772	0.606345767	14
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	África do Sul	15	0.36279895	0.824608782	0.269095084	0.13693512	15
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Coréia do Sul	16	1	0.521794561	0.739102719	0.730287405	16
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Turquia	17	1	0.653908009	0.673045996	0.646895338	17
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	Reino Unido	18	1	0.094503784	0.952748108	1	18
Janela 2000 - 2002 Ano 2000	EUA	19	0.719481401	1	0.359740701	0.251368971	19

Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Argentina	419	1	0.690590987	0.654704506	0.53931749	1179
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Austrália	420	1	0.54	0.73	0.670895287	1180
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Brasil	421	0.667886123	0.680010327	0.493937898	0.258380143	1181
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Canadá	422	0.886256219	0.766022363	0.560116928	0.37402705	1182
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	China	423	1	1	0.5	0.26897358	1183
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	França	424	1	0.245568012	0.877215994	0.928153128	1184
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Alemanha	425	1	0.277070674	0.861464663	0.900627903	1185
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Índia	426	1	0.307887427	0.846056286	0.873701985	1186
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Indonésia	427	0.753206471	1	0.376603236	0.0533395	1187
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Itália	428	0.926086957	1	0.463043478	0.204392587	1188
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Japão	429	1	0.284924936	0.857537532	0.893765298	1189
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	México	430	0.770358014	0.330473315	0.71994235	0.653319686	1190
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Rússia	431	0.692159332	1	0.346079666	0	1191
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Arábia Saudita	432	0.478306852	0.782130261	0.348088296	0.003510051	1192
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	África do Sul	433	0.566436175	0.504799448	0.530818363	0.322828228	1193
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Coréia do Sul	434	0.955473196	0.659344029	0.648064584	0.52771432	1194
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Turquia	435	1	0.353442129	0.823278936	0.833898891	1195
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	Reino Unido	436	1	0.163339159	0.918330421	1	1196
Janela 2020 - 2022 Ano 2022	EUA	437	0.842195373	1	0.421097686	0.131092916	1197

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Emissões totais anuais de CO₂ incluindo mudanças no uso da terra (medidas em toneladas)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Argentina	-1.4E+08	-1E+08	-1.2E+08	-1.3E+08	-1.6E+08	-1.6E+08	-1.7E+08	-1.7E+08	-1.9E+08	-1.8E+08	-1.9E+08	-1.9E+08	-2E+08	-1.9E+08	-1.9E+08	-1.9E+08	-1.9E+08	-1.9E+08	-1.8E+08	-1.8E+08	-1.7E+08	-1.9E+08	-2E+08
Austrália	-3.5E+08	-4E+08	-3.6E+08	-3.7E+08	-3.8E+08	-3.9E+08	-3.9E+08	-4E+08	-4E+08	-4.1E+08	-4.1E+08	-4E+08	-4E+08	-4E+08	-3.9E+08	-4E+08	-4.1E+08	-4.1E+08	-4.2E+08	-4.2E+08	-4E+08	-3.9E+08	-3.8E+08
Brasil	-3.4E+08	-3E+08	-3.5E+08	-3.4E+08	-3.6E+08	-3.6E+08	-3.7E+08	-3.9E+08	-4.1E+08	-3.9E+08	-4.4E+08	-4.6E+08	-5E+08	-5.3E+08	-5.6E+08	-5.3E+08	-4.9E+08	-5E+08	-4.8E+08	-4.7E+08	-4.5E+08	-5E+08	-4.8E+08
Canadá	-5.7E+08	-6E+08	-5.6E+08	-5.8E+08	-5.8E+08	-5.7E+08	-5.7E+08	-5.9E+08	-5.8E+08	-5.4E+08	-5.5E+08	-5.6E+08	-6E+08	-5.7E+08	-5.7E+08	-5.7E+08	-5.6E+08	-5.7E+08	-5.8E+08	-5.8E+08	-5.3E+08	-5.4E+08	-5.5E+08
China	-3.6E+09	-4E+09	-4.1E+09	-4.8E+09	-5.2E+09	-5.9E+09	-6.5E+09	-7E+09	-7.5E+09	-7.9E+09	-8.6E+09	-9.5E+09	-1E+10	-1E+10	-1E+10	-9.9E+09	-9.8E+09	-1E+10	-1E+10	-1.1E+10	-1.1E+10	-1.1E+10	-1.1E+10
França	-4.1E+08	-4E+08	-4.1E+08	-4.1E+08	-4.1E+08	-4.2E+08	-4.1E+08	-4E+08	-3.9E+08	-3.7E+08	-3.8E+08	-3.5E+08	-4E+08	-3.6E+08	-3.3E+08	-3.3E+08	-3.3E+08	-3.4E+08	-3.2E+08	-3.2E+08	-2.8E+08	-3.1E+08	-2.9E+08
Alemanha	-9E+08	-9E+08	-9E+08	-8.9E+08	-8.8E+08	-8.7E+08	-8.9E+08	-8.5E+08	-8.6E+08	-7.9E+08	-8.3E+08	-8E+08	-8E+08	-8.3E+08	-7.9E+08	-8E+08	-8E+08	-7.8E+08	-7.6E+08	-7.1E+08	-6.5E+08	-6.8E+08	-6.7E+08
Índia	-9.9E+08	-1E+09	-1E+09	-1.1E+09	-1.1E+09	-1.2E+09	-1.3E+09	-1.4E+09	-1.5E+09	-1.6E+09	-1.7E+09	-1.8E+09	-2E+09	-2E+09	-2.1E+09	-2.2E+09	-2.4E+09	-2.4E+09	-2.6E+09	-2.6E+09	-2.4E+09	-2.7E+09	-2.8E+09
Indonésia	-2.8E+08	-3E+08	-3.1E+08	-3.4E+08	-3.4E+08	-3.5E+08	-3.5E+08	-3.9E+08	-3.7E+08	-4E+08	-4.5E+08	-5E+08	-5E+08	-4.9E+08	-4.9E+08	-5.4E+08	-5.4E+08	-5.6E+08	-5.9E+08	-6.5E+08	-6.1E+08	-6.2E+08	-7.4E+08
Itália	-4.7E+08	-5E+08	-4.8E+08	-5E+08	-5E+08	-5E+08	-5E+08	-4.9E+08	-4.8E+08	-4.2E+08	-4.4E+08	-4.2E+08	-4E+08	-3.7E+08	-3.5E+08	-3.6E+08	-3.6E+08	-3.5E+08	-3.5E+08	-3.4E+08	-3E+08	-3.4E+08	-3.4E+08
Japão	-1.3E+09	-1E+09	-1.3E+09	-1.3E+09	-1.3E+09	-1.3E+09	-1.3E+09	-1.3E+09	-1.2E+09	-1.2E+09	-1.2E+09	-1.3E+09	-1E+09	-1.3E+09	-1.3E+09	-1.2E+09	-1.2E+09	-1.2E+09	-1.1E+09	-1.1E+09	-1E+09	-1.1E+09	-1E+09
México	-3.9E+08	-4E+08	-4.1E+08	-4.4E+08	-4.4E+08	-4.6E+08	-4.7E+08	-4.7E+08	-4.7E+08	-4.6E+08	-4.6E+08	-4.8E+08	-5E+08	-5E+08	-4.8E+08	-4.8E+08	-4.8E+08	-4.6E+08	-4.7E+08	-4.7E+08	-4.3E+08	-4.5E+08	-4.7E+08
Rússia	-1.5E+09	-2E+09	-1.5E+09	-1.5E+09	-1.5E+09	-1.6E+09	-1.6E+09	-1.6E+09	-1.7E+09	-1.5E+09	-1.6E+09	-1.7E+09	-2E+09	-1.6E+09	-1.6E+09	-1.6E+09	-1.6E+09	-1.7E+09	-1.7E+09	-1.7E+09	-1.6E+09	-1.7E+09	-1.8E+09
Arábia Saudita	-3.1E+08	-3E+08	-3.5E+08	-3.5E+08	-4.1E+08	-4.1E+08	-4.5E+08	-4.2E+08	-4.7E+08	-5E+08	-5.6E+08	-5.4E+08	-6E+08	-5.8E+08	-5.9E+08	-6.2E+08	-6.4E+08	-6.1E+08	-6.4E+08	-6.6E+08	-6.2E+08	-7E+08	-7.2E+08
África do Sul	-3.8E+08	-4E+08	-3.6E+08	-4E+08	-4.5E+08	-4.2E+08	-4.5E+08	-4.7E+08	-4.9E+08	-4.7E+08	-4.6E+08	-4.7E+08	-5E+08	-4.6E+08	-4.7E+08	-4.5E+08	-4.6E+08	-4.4E+08	-4.3E+08	-4.6E+08	-4.3E+08	-4.3E+08	-4.1E+08
Coreia do Sul	-4.4E+08	-5E+08	-4.8E+08	-4.9E+08	-4.9E+08	-5E+08	-5E+08	-5.2E+08	-5.3E+08	-5.4E+08	-5.9E+08	-6.2E+08	-6E+08	-6.3E+08	-6.3E+08	-6.3E+08	-6.4E+08	-6.5E+08	-6.7E+08	-6.5E+08	-6E+08	-6.2E+08	-6E+08
Turquia	-2.3E+08	-2E+08	-2.2E+08	-2.4E+08	-2.4E+08	-2.6E+08	-2.8E+08	-3.1E+08	-3.1E+08	-3.2E+08	-3.2E+08	-3.4E+08	-4E+08	-3.5E+08	-3.6E+08	-3.8E+08	-4.1E+08	-4.3E+08	-4.2E+08	-4E+08	-4.1E+08	-4.5E+08	-4.4E+08
Reino Unido	-5.7E+08	-6E+08	-5.6E+08	-5.7E+08	-5.7E+08	-5.7E+08	-5.7E+08	-5.6E+08	-5.4E+08	-4.9E+08	-5.1E+08	-4.7E+08	-5E+08	-4.8E+08	-4.4E+08	-4.2E+08	-4E+08	-3.9E+08	-3.8E+08	-3.6E+08	-3.3E+08	-3.4E+08	-3.1E+08
EUA	-6E+09	-6E+09	-5.9E+09	-6E+09	-6.1E+09	-6.1E+09	-6.1E+09	-6.1E+09	-5.9E+09	-5.5E+09	-5.7E+09	-5.5E+09	-5E+09	-5.5E+09	-5.5E+09	-5.4E+09	-5.3E+09	-5.2E+09	-5.4E+09	-5.3E+09	-4.7E+09	-5E+09	-5.1E+09

Fonte: Dados adaptados de ANDREW, PETERS (2024)