

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Álan Eduardo Rosa Rezende Braga

FLUXOS DE CARBONO INCORPORADOS AO COMÉRCIO
INTERNACIONAL
Uma Análise Internacional Comparada dos Países do BRICS e do G7

BRASÍLIA
2025

ÁLAN EDUARDO ROSA REZENDE BRAGA

**FLUXOS DE CARBONO INCORPORADOS AO COMÉRCIO
INTERNACIONAL**

Uma Análise Internacional Comparada dos Países do BRICS e do G7

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Sustentável.

Área de Concentração: Política e Gestão da Sustentabilidade

Orientador: Professor Dr. Alexandre Strapasson

Brasília

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RR789f Rosa Rezende Braga, Álan Eduardo
FLUXOS DE CARBONO INCORPORADOS AO COMÉRCIO INTERNACIONAL:
Uma Análise Internacional Comparada dos Países do BRICS e do
G7 / Álan Eduardo Rosa Rezende Braga; orientador Alexandre
Betinardi Strapasson. Brasília, 2025.
88 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico em Desenvolvimento
Sustentável) Universidade de Brasília, 2025.

1. Mudança do Clima. 2. Comércio Internacional. 3.
Carbono Incorporado ao Comércio. 4. Geopolítica do Clima. I.
Betinardi Strapasson, Alexandre , orient. II. Título.

ÁLAN EDUARDO ROSA REZENDE BRAGA

FLUXOS DE CARBONO INCORPORADOS AO COMÉRCIO INTERNACIONAL:

uma Análise Internacional Comparada dos Países do BRICS e do G7

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, como requisito para o curso de Mestrado em Desenvolvimento Sustentável.

Aprovada em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Betinardi Strapasson

Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS) da Universidade de Brasília (UnB)
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Diego Pereira Lindoso

Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS) da Universidade de Brasília (UnB)
Membro Titular Interno

Prof. Dr. Denilson Ferreira

Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC)
Membro Titular Externo

Dra. Marta Maria Röhe Salomon

Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS) da Universidade de Brasília (UnB)
Membro Suplente

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Vanessa Christina e minha avó, Alzimira Rosa, por todo o suporte e apoio no período do mestrado, sem vocês não teria sido possível trilhar esse caminho. Sou eternamente grato por todos os puxões de orelha, apoios, conversas e conselhos. Agradeço aos meus bisavós, Manuel Ângelo e Alzira Rosa, vocês foram a minha base, sem vocês, eu nunca seria o ser humano que sou.

Em especial, agradeço à minha namorada por quase 6 anos, Jordana Gomes, por tudo que fez e faz por mim, sua presença é inestimável, você faz os momentos mais difíceis parecerem simples. Agradeço aos meus amigos, que estão comigo desde o colégio, amizade que perdura há mais de 13 anos. Em especial, agradeço ao Frito, por todas as ajudas com a língua portuguesa e todos os apoios; ao Luiz Felipe, meu grande parceiro de vida, um irmão de outra mãe; ao Rafael Levi e ao Gabriel Sisson em nome de todos os amigos.

Agradeço aos meus amigos da faculdade, tão essenciais em toda minha caminhada, Vitinho e Afonso, sem vocês a graduação e o mestrado teriam sido um caminho mais árduo. Agradeço a minha parceira de mestrado, minha amiga que levo para vida, Paloma Amorim, por toda ajuda durante esses dois anos e por ser sempre um ombro amigo.

Agradeço ao meu avô, José Rezende e minha avó, Maria Idalcy, por todo apoio que me deram durante esse período. Agradeço ao meu Pai, Marco Aurélio e todos meus familiares. Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro durante a pesquisa, ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, e aos professores, por toda formação de excelência. Agradeço ao Estado brasileiro pelo provimento de uma educação pública, gratuita e de qualidade. Em especial, agradeço ao Professor Doutor Alexandre Strapasson, meu orientador, mestre e amigo, por todas as conversas, pela paciência e pelos conselhos riquíssimos passados.

Resumo

Em um contexto de aquecimento global acelerado, crise climática global e cada vez mais interdependência econômica entre os países via comércio internacional, este trabalho busca discutir as razões das diferenças no comportamento das emissões incorporadas ao comércio entre países do Norte e do Sul global. Para isso, a pesquisa utiliza um recorte geopolítico das principais economias dos países do BRICS em contraponto com às principais economias dos países do G7. Ao vislumbrar que os países do BRICS se comportaram como exportadores de emissões, enquanto os países do G7 se comportaram como importadores de emissões, durante o recorte temporal analisado (1990-2020), a pesquisa emprega a técnica econométrica dados em painel, com uma regressão de efeitos fixos, para entender os condicionantes dessas diferenças. A partir da obtenção de um painel de indicadores socioeconômicos e a realização de duas regressões, obteve-se correlações significativas entre as emissões incorporadas e os dados de consumo de energia renovável, de emissões de carbono associada à indústria e da balança comercial dos países analisados. Além disso, com base nos resultados obtidos, a pesquisa traz recomendações e reflexões para uma efetiva mitigação das emissões associadas ao comércio internacional, dentro de um contexto de responsabilidades comuns, porém diferenciadas entre países na problemática das mudanças climáticas e na busca por respostas para a crise global.

Palavras-chave: Comércio internacional; BRICS; G7; Dados em Painel; Mudanças Climáticas; Balança Comercial de Carbono.

Abstract

In a context of accelerated global warming, a global climate crisis and increasing economic interdependence between countries via international trade, this paper seeks to discuss the reasons for the differences in the behavior of emissions embodied in trade between countries in the global North and South. To do this, the research uses a geopolitical cross-section of the main economies of the BRICS countries in contrast to the main economies of the G7 countries. As the BRICS countries behaved as exporters of emissions, while the G7 countries behaved as importers of emissions, during the time period analyzed (1990-2020), the research uses the econometric technique of panel data, with a fixed effects regression, to understand the factors of these differences. By obtaining a panel of socio-economic indicators and carrying out two regressions, significant correlations were obtained between net embodied emissions and data on renewable energy consumption, carbon emissions associated with industry and the trade balance of the countries analyzed. In addition, based on the results obtained, the research provides recommendations and reflections for effective mitigation of emissions associated with international trade, within a context of common but differentiated responsibilities between countries in the problem of climate change and in the search for answers to the global crisis.

Key Words: International Trade; BRICS; G7; Panel Data; Climate Change; Carbon Trade Balance

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

EEBT	Emissions Embodied in Bilateral Trade
G7	Grupo dos 7
GEE	Gases de Efeito Estufa
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MRIO	Multi Regional Input-Output
NDB	Novo Banco de Desenvolvimento
NIB	Nova Indústria Brasil
OECD	The Observatory of Economic Complexity
OMC	Organização Mundial do Comércio
PIB	Produto Interno Bruto
SAF	Combustível de Aviação Sustentável
UE	União Europeia
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de Transferências de emissões via comércio internacional de 1990 a 2021	29
Figura 2 - Total de transferências de emissões via comércio internacional, países do G7 e do BRICS	30
Figura 3 - Total de transferências de emissões via comércio internacional, países do G7, BRICS, Renda Alta e Renda Média Alta	31
Figura 4 - G7 e BRICS dados de transferências de emissão via comércio sobrepostos ano a ano (1990-2020)	33
Figura 5 - Consumo Final (%) de energia oriunda de fontes renováveis nas maiores economias do BRICS	43
Figura 6- Brasil, Índia e China evolução das exportações	45
Figura 7 - Emissões Associadas ao Processo Industrial nas maiores economias do BRICS	48
Figura 8 - Consumo Final de energia de fontes renováveis nas maiores economias do G7	55
Figura 9 - Alemanha, Estados e Japão evolução das importações	57
Figura 10 - Alemanha, Estados e Japão evolução das emissões associadas ao processo industrial	58
Figura 11 - Saldo comercial em relação ao PIB dos países analisados	64

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 - Recorte escolhido pela pesquisa	38
Quadro 2 - Principais produtos da balança comercial brasileira (2004, pico como importador líquido de carbono)	51
Quadro 3 - Principais remetentes das importações brasileiras (2004 x 2011)	53
Tabela 1 - Regressão com efeitos fixos, usando-se o método de dados em painel	61
Tabela 2 - Regressão com efeitos fixos, sem a variável populacional, usando-se o método de dados em painel	66

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1 Questões de Pesquisa	15
1.2 Objetivos	15
1.3 Justificativa	16
1.4 Hipótese	17
1.5 Estrutura da Pesquisa	18
2. Contexto da Pesquisa	20
2.1 Fundamentação teórica e bases conceituais	20
2.2 Balança Global de Carbono Incorporado ao Comércio	27
3. Metodologia	35
3.1 Equação do Modelo	39
3.2 Limitações da Pesquisa	39
4. Resultados e Discussão	42
4.1 Perfil dos Países	42
4.1.1 BRICS	42
4.1.2 G7	54
4.1.3. Balanço entre BRICS e G7	59
4.2 Resultados Econométricos	61
4.3 Considerações sobre a mitigação de emissões no comércio internacional	67
5. Conclusões	72
Referências	76

1. Introdução

O aquecimento global é uma das principais ameaças existenciais para a vida humana e um dos principais desafios do Século XXI. Desde a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, em inglês) na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Eco-92), as discussões climáticas passaram a ganhar mais importância na agenda internacional. A partir do reconhecimento das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) como o principal agente causador do aquecimento global, os países buscam soluções para a redução de suas emissões de CO₂ e para o enfrentamento das mudanças climáticas. Em 2000, após anos de discussões, 46 países aprovaram a Carta da Terra, que reconheceu o modelo econômico predominante como predatório, auxiliando na destruição ambiental, na redução de recursos ambientais e na perda da biodiversidade (Unesco, 2012). Desde então, tem-se uma intensificação do aumento de temperatura global, oriunda da ação antropogênica pós revolução industrial. O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) evidencia isso, em 2022, a temperatura da Terra foi 1,15 °C acima dos níveis pré-industriais, apenas 0,35 °C abaixo do teto estipulado pelo Acordo de Paris.

Relatório mais recente do Programa Copernicus da Comissão Europeia indica que esse aumento de temperatura já alcançou 1,60 °C em 2024 (Copernicus, 2025). A elevação da temperatura global já se manifesta no aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (inundações, ondas de calor, secas prolongadas) em diversas regiões do planeta (Diffenbaugh et al., 2017). Dentro desse contexto, a pesquisa pretende investigar as relações entre as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) e a globalização econômica. Essa globalização, a partir dos fluxos de capitais, bens de capitais, produtos e serviços, interconecta cada vez mais regiões globais que pouco se comunicavam até a queda do muro de Berlim.

Na comunidade científica, é consenso global que para o enfrentamento do aquecimento global e dos impactos das mudanças climáticas é necessária uma profunda redução nas emissões de GEE (IPCC, 2023). Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (Irena, 2023), 80% da população mundial vive em países importadores líquidos de energia. Além disso, de acordo com o *Global Carbon Budget* (2023), em 2022, os combustíveis fósseis foram responsáveis por aproximadamente 37,2 bilhões de toneladas de

CO₂e, representando mais de 75% das emissões globais de gases de efeito estufa (Banco Mundial, 2023).

Sobre o contexto da crescente globalização, em que a pesquisa está inserida, é notório que as distâncias se encurtaram e as conexões econômicas cresceram. Após a queda do muro de Berlim e as alterações geopolíticas (com o fim do “bloco socialista”), o mundo se tornou mais interdependente economicamente e as cadeias globais de produção foram reconfiguradas, tendo o comércio internacional um peso bem maior que há 30 anos. Segundo dados do Banco Mundial (2023), em 1990 o comércio internacional representava 38% do PIB Global. Após 30 anos, o comércio representa mais da metade do PIB Global, 52% em 2020.

Segundo estudo da Livraria do Congresso Americano (1989), as duas superpotências do mundo bipolar, Estados Unidos e União Soviética, no auge de sua relação comercial, obtiveram um volume comercial bilateral de US\$ 4,5 bilhões de dólares — 1% do total de todo comércio dos Estados Unidos. Atualmente, é notório que os principais competidores da geopolítica mundial são Estados Unidos e China, o volume comercial dos dois países em 2023 foi de impressionantes US\$ 575 bilhões de dólares (Census, 2023). Esse exemplo evidencia a crescente importância do comércio mundial, ao ponto das duas principais superpotências da atualidade, que se declaram como rivais, não conseguirem fugir da interdependência econômica advinda, em partes, da intensificação do comércio mundial e da crescente globalização da produção e dos padrões de consumo.

A partir desse cenário, não faz sentido pensar no problema da mudança do clima a partir de uma perspectiva centrada apenas dentro dos países, afinal, o problema é sistêmico e o modo de vida, bem como o sistema econômico, se tornam cada vez mais interligados e interdependentes. Com isso, soluções simples em um sistema complexo tendem a não produzir os efeitos esperados e urgentes no contexto atual. Pensar no problema das emissões, de forma complexa e multifacetada, ajudará na delimitação de responsabilidades e soluções sob o prisma da interdependência sistêmica do planeta Terra, do ponto de vista físico e econômico.

Ao utilizar os dados do *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022), verifica-se que o quantitativo das emissões incorporadas ao comércio internacional é de uma ordem de grandeza considerável e percebe-se que, a depender do país e do ano, essas

emissões representam entre 5% e 15% das emissões totais. A partir de um contexto de crise climática e crescente interdependência econômica, faz-se necessário, portanto, pensar em estratégias de ¹mitigação desse tipo de emissão. Ademais, estudos indicam que essas emissões cresceram na ordem de 3,4% ao ano entre 1990-2008, chegando ao patamar de 7.8 GtCO₂ em 2008 (Peters *et al.*, 2011). Contudo, em virtude da complexidade do tema e da importância do Comércio Internacional, bem como da emergência das mudanças climáticas, faz-se necessário, sob um olhar brasileiro, estudos mais aprofundados sobre a divisão de responsabilidades dessas emissões, além das causas das distorções.

A partir da crise climática emergente, grandes emissores começaram a investir em novas tecnologias energéticas e alguns conseguiram reduzir suas emissões, como a maioria dos países da União Europeia. No entanto, é perceptível que nas diferentes perspectivas de contabilização das emissões de GEE pode-se observar um comportamento diferente. As reduções das emissões em grupos de países, como a União Europeia, deram-se via Contabilidade Territorial, não sendo ajustadas em relação às emissões advindas de exportação e importação (comércio internacional) e das cadeias de produção globais (importações de produtos intermediários). Logo, a produção interna voltada para o consumo em outro país, na contabilidade tradicional, tem as emissões contabilizadas no país produtor e não no consumidor.

Ao analisar o cenário de emissões a partir da contabilidade baseada no consumo, que leva em conta o comércio internacional, algumas regiões globais, as mais desenvolvidas do ponto de vista de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e renda, na verdade aumentaram suas emissões, tendo uma “pegada” de carbono maior. De acordo com Peters *et al.* (2011), para a estabilização e redução das emissões globais é necessário olhar para as emissões por essa lógica, porque o comércio e os fluxos de investimentos têm tornado a economia global cada vez mais interconectada.

Nesse sentido, produção e consumo estão cada vez mais conectados, de forma que a não observação desses *links* pode levar para uma análise imprecisa sobre o cenário global de carbono. Os autores concluem que grande parte dos países desenvolvidos são importadores

¹No Glossário da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre o Clima, mitigação é conceituada da seguinte forma: “Esforços para reduzir emissões e aumentar os sumidouros de carbono” (UNFCCC, [s.d.]).

líquidos de emissões, enquanto os países emergentes, via de regra, atuam como exportadores (Peters *et al.*, 2011).

Dado todo esse cenário, essa pesquisa busca discutir os dados de emissões incorporados ao comércio, de forma a contribuir com explicações sobre o comportamento contrastante entre países de alta renda (importadores líquidos de emissões), como os países do G7 e países de renda média alta (exportadores líquidos de emissões), como os países do BRICS.

1.1 Questões de Pesquisa

Com base no cenário apresentado, faz-se necessário entender o que motivou os comportamentos distintos nas curvas de emissões incorporadas ao comércio entre os países de renda alta e renda média alta (segundo a classificação do Banco Mundial). Com isso, esta pesquisa apresenta duas questões centrais. A primeira delas seria: *Quais os principais fatores, econômicos, ambientais e comerciais, que influenciam a diferença de comportamento das emissões incorporadas ao comércio nos principais países do BRICS e do G7?*

Em seguida, a partir da identificação dos principais fatores determinantes das curvas de emissões nos países selecionados, sob a perspectiva do carbono e das mudanças climáticas, uma segunda questão é apresentada: *De que maneira tais fatores condicionantes evidenciam as desigualdades observadas nos países do BRICS e do G7?*

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é analisar as principais variáveis que têm causado mudanças significativas nas curvas de emissões associadas ao comércio internacional entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento, com ênfase nas maiores economias do BRICS (China, Índia e Brasil) e do G7 (Estados Unidos, Japão e Alemanha), e eventuais discrepâncias na geopolítica do clima.

Com base no objetivo geral, são objetivos específicos da pesquisa:

- Analisar os fluxos de carbono no comércio internacional;
- Compreender as variações das emissões incorporadas ao comércio internacional nos países analisados;

- Discutir políticas de mitigação com base nos resultados empíricos, voltadas à redução das emissões incorporadas ao comércio internacional.

1.3 Justificativa

Como a aceleração do processo de globalização já mencionado, as cadeias globais de produção se distribuíram, de forma que até produtos “simples” são processados e elaborados em diferentes espaços geográficos. O desafio das mudanças climáticas, aliado a essa transformação crescente na economia global, enseja a necessidade de se pensar nas emissões incorporadas ao comércio internacional, afinal, todos os países dependem em certo grau do comércio, ao mesmo tempo em que o desafio das mudanças climáticas é comum e seus resultados prejudicam a todos no longo prazo. Cabe destacar que o objetivo desta pesquisa não é comparar dois países, mas sim fazer uma macroanálise de grupos de países de alto impacto econômico e político, observando-se mais a ordem de grandeza das emissões líquidas associadas ao comércio, do que o detalhamento por produtos. Para isso, foram utilizados os dados líquidos, o balanço de emissões incorporadas ao comércio e um recorte representativo de dois grandes grupos de países: os de renda média alta e os de renda alta, segundo classificação do Banco Mundial.

Nesse sentido, esta pesquisa visa contribuir para o estado da arte da literatura a respeito das emissões incorporadas ao comércio internacional e da contabilidade baseada no consumo. Além disso, este trabalho busca contribuir para o preenchimento da lacuna do conhecimento referente a uma maior compreensão das razões pelas quais existe um comportamento com características, que sugerem uma disparidade geopolítica e econômica, entre as emissões incorporadas ao comércio nos países de renda alta e renda média alta.

Compreender as dinâmicas que influenciam esses dados ajudará na construção de uma discussão a respeito da justiça climática e das responsabilidades diferenciadas, de forma a contribuir também, com recomendações de políticas públicas para alternativas de mitigação das emissões incorporadas ao comércio, desafio que será cada vez mais crescente em um mundo cada vez mais interconectado.

Investigar os determinantes dos comportamentos das emissões associadas ao comércio em países chave, pode ser fundamental para a melhoria das estratégias de mitigação,

bem como pode subsidiar negociações para o enfrentamento do problema de forma coordenada, ressaltando a divisão de responsabilidades.

1.4 Hipótese

A hipótese proposta, neste trabalho, para responder à pergunta da pesquisa é que: *“as diferenças entre os países em termos de matriz energética, desenvolvimento econômico e estrutura produtiva contribuem para desequilíbrios nos fluxos de carbono incorporados ao comércio, o que reforça a necessidade de uma divisão diferenciada das responsabilidades climáticas entre os países”*.

Como fundamentação da hipótese, destaca-se os comportamentos contrastantes os países do BRICS e do G7, no tocante aos dados líquidos de emissões incorporadas ao comércio, no período de 1990 até 2020. Ao mesmo tempo, destaca-se, por exemplo, o expressivo crescimento econômico chinês ocorrido nas últimas quatro décadas. Esse crescimento, assentado em fontes fósseis, transformou o cenário internacional e tornou a China no maior emissor de GEE do mundo. Outros países emergentes, como a Índia, também apresentaram um comportamento similar, embora em menor escala, qual seja: uma industrialização acelerada e o aumento da participação do comércio internacional em suas economias. Com isso, pretende-se investigar se a industrialização, intensiva em carbono, foi um fator para o desequilíbrio da balança comercial de carbono entre os países analisados. É possível que um aumento nas emissões do setor industrial esteja associado com um maior superávit de carbono, em relação aos dados líquidos das emissões incorporadas ao comércio internacional (Banco Mundial, 2023).

É possível que países com maiores emissões associadas à indústria também tendem a apresentar mais emissões líquidas associadas ao comércio. A confirmação dessa correlação pode sugerir uma transferência de responsabilidade climática dos países consumidores para os países produtores, principalmente devido ao deslocamento de plantas industriais, que buscaram nas últimas décadas menores regulações e mão de obra mais barata, conforme observado por Sadik-Zada e Ferrari (2020) e Copeland e Taylor (2004).

Nota-se que, por exemplo, que no caso da Áustria, as emissões oriundas de setores industriais, intensivos em energia e carbono, foram responsáveis por um quarto de suas

emissões importadas (Steininger *et al.*, 2018). Esse comportamento traz indício de partida para o entendimento dos ocasionantes do cenário analisado. É provável que o crescimento na participação de energias renováveis nos países contribua na redução das emissões líquidas associadas ao comércio internacional nos países. Steininger *et al.* (2018) também trazem, em seu trabalho, que o setor de eletricidade contribuiu com 30% das emissões importadas pela Áustria no período analisado.

Além disso, Franzen e Mader (2018) observaram que o crescimento da eficiência energética de um país relaciona-se a uma tendência de um maior comportamento importador de emissões nos países, embora essa aparente correlação não necessariamente expresse uma inferência causal. Ademais, é importante entender se o aumento do PIB *per capita*, variável amplamente utilizada para medir o nível de renda dos países, exerce influência sobre o cenário das emissões incorporadas ao comércio internacional. Destaca-se que o aumento de renda exerce pressões sobre a demanda energética, com a utilização de equipamentos para conforto térmico (ar-condicionado, aquecimento), bem como na utilização de eletrodomésticos elétricos e entre outros bens de consumo.

1.5 Estrutura da Pesquisa

O presente trabalho está estruturado na Introdução (Capítulo 1), que contém as perguntas de pesquisa, os objetivos da pesquisa, a justificativa para a realização do trabalho e a hipótese que busca responder as questões norteadoras. O Capítulo 2, intitulado: “Contexto da Pesquisa”, tem o objetivo de oferecer ao leitor um breve aprofundamento das questões postas na Introdução, bem como discutir a literatura e as questões atuais sobre os dados das emissões associadas ao comércio. Dessa forma, a primeira subseção deste capítulo trata da literatura técnico-científica, com a qual o trabalho embasa-se e dialoga. As demais subseções apresentam um panorama global sobre os dados das emissões incorporadas ao comércio internacional, bem como algumas peculiaridades dos países analisados pela pesquisa: Brasil, Índia, China, Estados Unidos, Alemanha e Japão.

No Capítulo 3, chamado Metodologia, busca-se apresentar a técnica econométrica utilizada, dados em painel com efeitos fixos, bem como as principais vantagens e limitações da metodologia utilizada. Também é apresentada a equação do modelo construído, que busca

auxiliar na explicação das emissões líquidas associadas ao comércio internacional nos países alvo, em um recorte temporal de 30 anos.

A pesquisa segue adiante, com o Capítulo 4, Resultados e Discussão, no qual são apresentados os resultados estatísticos da aplicação metodológica, assim como uma discussão sobre a relação entre as correlações identificadas e as responsabilidades dos países. Nesse capítulo, também são apresentadas recomendações de políticas que poderiam mitigar a problemática das emissões ligadas ao comércio. Já no Capítulo 5, Conclusão, faz-se um balanço geral da pesquisa e de seus principais resultados, à luz da hipótese e objetivos inicialmente propostos. Apresenta-se também algumas sugestões de pesquisas futuras que possam dar continuidade e evoluir a partir dos resultados obtidos. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas ao longo da pesquisa.

2. Contexto da Pesquisa

2.1 Fundamentação teórica e bases conceituais

A análise e discussão de emissões no comércio internacional requer o uso de alguns conceitos-chave, que são utilizados ao longo da pesquisa. É importante, por exemplo, conceituar e diferenciar as contabilidades de emissões: territoriais e baseadas no consumo, respectivamente. Além disso, faz-se necessário adentrar à discussão a respeito das responsabilidades comuns, porém diferenciadas e das emissões históricas dos países.

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), criada em 1992, dispõe, em seu Artigo 3º, que os países devem proteger o sistema climático, considerando as próximas gerações, com os países “desenvolvidos” desempenhando um papel de liderança na mitigação e adaptação dos efeitos das mudanças climáticas. O conceito de “responsabilidades comuns, porém diferenciadas” surge a partir da capacidade (técnica, financeira) dos países desenvolvidos em enfrentar as mudanças climáticas, além de sua contribuição histórica significativamente maior nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), em comparação com os países ditos “em desenvolvimento”, entre eles o Brasil.

O conceito de responsabilidades comuns, porém diferenciadas dialoga diretamente com o cálculo de emissões cumulativas ao longo do tempo, como disposto no próprio documento fundador da Convenção (UNFCCC, 1992). Segundo dados da Comissão Europeia (2024), a China é o maior emissor anual de GEE no mundo; contudo, apesar de ser o país que mais emite atualmente, não significa que seja o país com a maior parcela de responsabilidade histórica pelas mudanças climáticas. Ao observar os dados do *Global Carbon Budget* (2023), verifica-se que até 2022, o mundo possuía, de emissões cumulativas, aproximadamente 1,77 trilhões de toneladas de CO_{2e} — dados que excluem emissões advindas de mudança do uso do solo. Desse total, aproximadamente 43.3% são emissões dos países do G7, por outro lado, os países do BRICS representam aproximadamente 27% do total, mesmo contando com populações consideravelmente maiores.

Ao se observar a Contabilidade Baseada no Consumo, os cenários ajustados pelo comércio internacional amplificam ainda mais as distorções históricas, sob a luz do princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas. Os dados mostram que os países

“desenvolvidos” mantiveram um padrão de consumo intensivo em emissões, mesmo reduzindo as emissões via contabilidade territorial.

No entanto, antes de entrar propriamente na análise de tais distorções, para a continuidade da discussão em que a pesquisa pretende se encaixar, é necessário conceituar as contabilidades de emissões já citadas: “Contabilidade Territorial” e “Contabilidade Baseada no Consumo”. A contabilidade de emissões utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), entidade científica criada em 1988, é a contabilidade territorial:

Os inventários nacionais incluem as emissões e remoções de gases de efeito estufa que ocorrem no território nacional e nas áreas offshore sobre as quais o país tem jurisdição (...) Por exemplo, as emissões do uso de combustível no transporte rodoviário são incluídas nas emissões do país onde o combustível é vendido e não onde o veículo é conduzido, já que as estatísticas de venda de combustível estão amplamente disponíveis e geralmente são muito mais precisas (IPCC, 2006, p. 6 - tradução livre).

Com isso, pode-se perceber algumas limitações dessa abordagem. Grandes produtores industriais, energo-intensivos e carbono-intensivos, têm elevada parcela de responsabilidade na problemática global, entretanto, caso não existisse demanda internacional para seus produtos, eles não seriam ofertados em tal magnitude no mercado global. Portanto, para uma maior delimitação de responsabilidades, é fundamental observar o cenário de emissões também por outra métrica: a Contabilidade Baseada no Consumo, onde as relações de oferta e demanda são levadas em conta.

Para descrever melhor a abordagem da Contabilidade Baseada no Consumo, pode-se recorrer ao texto de Barrett *et al.* (2013), que descreve a perspectiva “*Consumption-based*” como: os inventários que são ajustados a partir das exportações e importações, ou seja, as emissões finais se dariam a partir das emissões advindas da produção subtraídas do balanço entre exportações e importações do país. Essa perspectiva traz uma reflexão, afinal, a produção de oferta é induzida pela demanda crescente do consumo. Além disso, não é excluído o fator da produção interna, sendo apenas realizado um ajuste do inventário de emissões, a partir da balança comercial do país.

A partir disso, o *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022) produz dados de emissões por países, ajustados ao considerar o comércio internacional, utilizando a metodologia *Multi Regional Input Output* (MRIO) — amplamente utilizada também em

diversos trabalhos nesse campo científico (Peters, 2008; Peters et al., 2011). Os inventários baseados na perspectiva do consumo e na metodologia MRIO, que é a base de dados utilizada nesta pesquisa, alocam as importações dos produtos e serviços ao consumidor final. Com isso, é possível mensurar a quantidade consumida em um país, que é oriunda de outros e as respectivas emissões incorporadas, o que confere uma outra perspectiva sobre as emissões globais (Peters, 2008).

Segundo Peters (2008), o MRIO calcula as emissões incorporadas ao comércio, a partir das estatísticas monetárias do comércio internacional. O método busca estimar as emissões necessárias, em uma região, para produzir aquele fluxo comercial. A diferença do MRIO para outros métodos, como o “*Emissions Embodied in Bilateral Trade*” (EEBT), é que o MRIO classifica também os fluxos de bens intermediários, produtos que são importados para a elaboração de outros. Para o cálculo do MRIO são utilizadas matrizes de oferta e demanda global, disponibilizadas em bases como o ²EORA (banco de dados da cadeia de suprimentos globais). Nas matrizes, são representadas as interações entre diferentes países, estipulando assim os fluxos comerciais monetários, que são utilizados para estimar as emissões, a partir de fatores de emissões calculados de cada país, de forma setorial.

Seguindo com a pesquisa de Peters *et al.* (2011) e utilizando-se a base de dados do já mencionado relatório *Global Carbon Budget*, observa-se que, pela perspectiva das emissões baseadas no consumo, algumas regiões mais desenvolvidas do mundo reduziram suas emissões territoriais (sem considerar a cadeia de produção global e o comércio internacional). Entretanto, essas mesmas regiões aumentaram consideravelmente as emissões na perspectiva do consumo, considerando-se as cadeias de produção globais e o balanço de emissões incorporadas ao comércio internacional.

Logo, de forma direta, reduzir as emissões pela perspectiva territorial e aumentar pela perspectiva de consumo não indica um modelo de descarbonização necessária para enfrentar a crise. O problema é global e pouco importa emitir Gases do Efeito Estufa (GEE) no Brasil ou do outro lado do mundo, pois os efeitos do aumento da concentração de GEE na atmosfera são globais e a mitigação deve ser coordenada.

² Disponível em: <https://worldmrio.com/>

Podem surgir alguns questionamentos sobre as incertezas da contabilidade de emissões sob a perspectiva do consumo. Para isso, utilizou-se o trabalho de Schulte *et al.* (2024), que visa esclarecer as incertezas dessa abordagem. Segundo os autores, devido a uma falta de uma mensuração de incertezas, por estudos baseados no MRIO serem recentes, os formuladores de políticas ainda têm preferência pela abordagem de contabilidade de emissões territoriais, que a caracterizam como mais robustas.

Entretanto, Schulte *et al.* (2024) reconhecem a importância da abordagem baseada no Consumo em virtude da globalização econômica, bem como para atender ao objetivo de delimitar responsabilidades ambientais. Ademais, atestam que o coeficiente médio de variação para a contabilidade de emissões no nível país é relativamente baixo, com aumento para pequenas economias com alta presença de aviação internacional e navegação, bem como para as emissões em nível setorial. Logo, para países com economias maiores, a contabilidade baseada no consumo possui baixo grau de incerteza, em contraste com países ilhas, como Malta, por exemplo. Considerando os achados de ausência de diferenças significativas nas incertezas entre as abordagens de contabilidade territorial e baseada no consumo (Schulte *et al.*, 2024), mostra-se factível utilizar os dados disponíveis de emissões de GEE incorporadas ao comércio de forma consistente, em termos médios aproximados, principalmente para os objetivos propostos nesta pesquisa.

Dois autores que também escrevem nesse campo do conhecimento, Jakob e Marschinski (2013), afirmam que a perspectiva baseada no consumo é interessante para fins informativos e para o subsídio na criação das políticas de mitigação. Entretanto, os autores criticam o estabelecimento de uma relação causa-efeito entre o aumento das emissões em “países exportadores líquidos” e o aumento das emissões em “países importadores líquidos”. Nesse prisma, os autores entendem que um cenário de “não comércio” entre países poderia gerar mais emissões do que o atual cenário de dinamismo das cadeias comerciais e produtivas. Além disso, ao tratarem sobre o desequilíbrio entre as transferências de emissões, via comércio, de países emergentes e desenvolvidos, os autores atribuem a causas multifatoriais, como: desarranjos comerciais e o grau de uso de energias renováveis dentro da produção de cada país.

Um cenário de não-comércio entre países, um hipotético “isolacionismo absoluto”, seria prejudicial para o mundo economicamente e ambientalmente, pois nem todos os países possuem valências naturais, infraestrutura e tecnologias necessárias para atender sua própria demanda. Apesar disso, as problematizações em torno das emissões associadas ao comércio são necessárias, não para desestimular o comércio e sim para delimitar responsabilidades e buscar soluções coordenadas entre os atores.

Ao dialogar com as causas desse desequilíbrio na balança de carbono sob a contabilidade do consumo, faz-se necessário visitar o trabalho de Grubb *et al.* (2022), que discorre que o “balanço de transferências de carbono” é motivado por fatores como: a balança comercial dos países, a composição de sua matriz energética e o seu grau de especialização nas cadeias globais de produção.

A partir de Jakob e Marschinski (2013) e Grubb *et al.* (2022), é possível verificar que o comércio por si só não caracteriza uma relação causa-efeito entre o aumento das emissões em países de renda média e a redução de emissões nos países de renda alta. No entanto, não se pode ignorar o fluxo existente entre países, pois a existência dele indica a ocorrência de um desequilíbrio nas variáveis que exercem maior influência nesse tipo de emissões: balança comercial, composição de matriz energética, grau de especialização econômica. Além disso, há aspectos sócio-históricos e de desigualdades globais que não podem ser ignorados.

Outras importantes literaturas para a compreensão das possíveis causas desse desequilíbrio apresentado são Steininger *et al.* (2018) e Franzen e Mader (2018). O trabalho de Steininger *et al.* (2018) consiste em um estudo de caso sobre as emissões, sob a contabilidade do consumo, na Áustria. Os autores verificam um gap de 40 milhões de toneladas de CO_{2e} entre as emissões do país, sob diferentes contabilidades, aumentando consideravelmente a pegada de carbono, quando ajustado o inventário sob as lentes do consumo e do comércio internacional. Além disso, os autores buscaram as principais fontes e destinos dessas emissões, com achados que trazem indícios para essa pesquisa. Verificaram que as famílias foram os principais indutores de emissões na contabilidade baseada no consumo, seguidas por investimentos privados e demanda governamental. Ademais, 62% das emissões necessárias para atender a demanda austríaca foram emitidas fora das fronteiras nacionais, com 34% se dando fora dos países da União Europeia, que, segundo os referidos

autores, seriam majoritariamente da China, Rússia e Estados Unidos. Ao verificar os principais setores, que essas emissões importadas se originam, os autores chegam aos seguintes resultados: 30% são oriundas do setor da eletricidade e 25% do setor da indústria energo-intensiva (Steininger *et al.*, 2018).

Ao analisar o trabalho de Franzen e Mader (2018), que utiliza a mesma metodologia de efeitos fixos que esta pesquisa, mas para outro recorte de países, percebe-se que seus resultados indicam que o crescimento da eficiência energética está associado a um comportamento de “importador” de emissões do respectivo país. Seus resultados também indicam que um maior volume de comércio leva ao crescimento das emissões, do ponto de vista da contabilidade baseada no consumo.

Outra importante contribuição é de Kim e Tromp (2021) que, ao analisarem as emissões incorporadas no comércio bilateral entre China e Brasil, verificaram que os principais setores responsáveis pelas emissões exportadas, da China para o Brasil, eram o de eletricidade e materiais básicos — químicos e produtos químicos, outros produtos minerais não-metálicos e setores de metais básicos. Além disso, os autores constataram que, entre 2010 e 2014, uma melhoria na intensidade energética na China (consumo de energia por unidade de PIB) foi determinante para limitar o aumento do carbono incorporado ao comércio bilateral.

Continuando a revisão de literaturas a respeito de aspectos causais das emissões de CO₂, pode-se visitar o artigo de Wang *et al.* (2017). A partir da utilização da metodologia dados em painel, Wang investiga os links entre variáveis selecionadas (urbanização, crescimento econômico e consumo energético) e as emissões de CO₂ (com dados oriundos de contabilidade territorial). Em seus resultados, o consumo de energia e a urbanização tiveram menor contribuição no aumento das emissões, quando posto em contraposição o crescimento econômico para os países de renda alta. Por outro lado, para os países de renda média, a maior contribuição para o aumento de emissões é a do consumo energético, em comparação com crescimento econômico e urbanização (Wang *et al.*, 2017). Apesar da importante contribuição, mostra-se relevante verificar essas diferenças a partir de uma perspectiva da contabilidade baseada no consumo, afinal, como já discorrido nesta pesquisa: os cenários de emissões em cada país podem mudar consideravelmente ao adicionar as variáveis importação e exportação na contabilidade dos inventários de emissões.

Vale destacar algumas literaturas sobre a transferência de indústrias para países com menores regulações ambientais; afinal, um dos *drivers* do desequilíbrio apresentado poderia, ao menos parcialmente, ser proveniente desse deslocamento. Sadik-Zada e Ferrari (2020) testaram, quantitativamente, a “hipótese de paraíso de poluição” para países da OCDE entre 1995 e 2011. Os autores encontraram relações estatísticas entre o aumento da rigidez de regulações ambientais e o aumento das emissões incorporadas às importações dos países da OCDE. Os autores demonstram que as atividades econômicas, intensivas em energia e poluição, podem tanto ser não desejáveis economicamente para países ricos, ao mesmo tempo que são alvo dos países de menor renda.

Ao também discorrerem sobre a “hipótese de paraíso de poluição”, Copeland e Taylor (2004) afirmam a existência de evidências de relações entre o endurecimento de regulações ambientais e o deslocamento de indústrias. No entanto, os autores argumentam que há poucas evidências de que o fator regulatório seja dominante na decisão de migração de plantas industriais, sendo apenas um, dentre vários fatores que embasam esse tipo de decisão. Logo, de forma direta, os autores observaram que a regulação ambiental do país possui efeito na decisão de instalação de fábricas intensivas em poluição, todavia, não sendo esse efeito preponderante para a decisão, questões econômicas e de disponibilidades de recursos naturais seriam também fatores relevantes para explicar o deslocamento desse tipo de indústria.

Retornando ao texto de Barrett *et al.* (2013), os autores defendem a contabilidade baseada no consumo como interessante para complementar a contabilidade territorial, de forma a auxiliar no subsídio de políticas públicas de mitigação. Ademais, são apresentadas as diferenças nas emissões entre as contabilidades “territoriais” e de “consumo” para o caso do Reino Unido. Entre 1990 e 2009, o Reino Unido reduziu em 27% as emissões territoriais, enquanto sob a contabilidade baseada no consumo, as emissões cresceram cerca de 20%. Mais uma vez, observa-se que os cenários de um país podem mudar de forma abrupta, dependendo de qual contabilidade está sendo utilizada para mensurar as emissões.

Apesar de Barrett *et al.* (2013) não abordar a questão das responsabilidades das emissões, este é um ponto fundamental para a superação dos desafios climáticos e para uma transição energética justa. Munksgaard e Pedersen (2001) já discutiam há mais de 20 anos, em sua análise sobre o perfil das emissões da Dinamarca — sob o ponto de vista das emissões

incorporadas ao comércio —, a seguinte questão: “Quem é o responsável em emitir o carbono, o consumidor ou o produtor?” (Munksgaard e Pedersen, 2001, p. 333). A pesquisa dos autores mostrou, já em 2001, que a Dinamarca possuía uma quantidade relevante de carbono associada ao comércio internacional. Ademais, os autores afirmam que o conceito de uma “balança comercial de carbono” poderia auxiliar nas negociações climáticas entre países.

A partir dos casos aqui descritos, bem como dos dados analisados e testados estatisticamente em capítulos subsequentes desta pesquisa, um dos pontos do trabalho será justamente a discussão sobre responsabilidades, a partir dos diagnósticos obtidos. Todavia, a pesquisa não busca, de forma dogmática, apontar o consumidor como sendo mais ou menos responsável, de forma vaga, haja vista a alta complexidade envolvida no comércio internacional, mas sim perseguir as causas desse desequilíbrio posto, de modo a auxiliar o encontro de alternativas para efetivamente mitigação das emissões de GEE, contribuindo inclusive para uma análise mais ponderada sobre os cenários de emissões territoriais.

A partir da revisão de literatura realizada, é possível constatar uma lacuna na literatura que a pesquisa pretende contribuir para o preenchimento: entender o que motiva as diferenças nos dados dos fluxos de emissões via comércio internacional entre os grandes países de renda média alta e de renda alta.

2.2 Balança Global de Carbono Incorporado ao Comércio

Ao se analisar os dados de transferências de emissões via comércio internacional (2022), é perceptível a existência de um padrão. Após categorizar os países, utilizando a nomenclatura de classificação do Banco Mundial para renda, pode-se observar que os países de renda média alta são os grandes “exportadores de emissões”, enquanto os países de renda alta são os grandes “importadores de emissões” globais. A classificação do Banco Mundial utilizada classifica os países conforme sua renda *per capita* em dólares americanos. São considerados países de Baixa Renda os com renda *per capita* menor que US\$ 1.135,00; Renda Média Baixa, os países com renda entre US\$ 1.136,00 e US\$ 4.465,00; Renda Média Alta, os países entre US\$ 4.466,00 e US\$ 13.845,00; e Renda Alta, os países com renda *per capita* acima de US\$ 13.845,00. A classificação disposta na pesquisa levou em conta a presença dos países nas faixas de renda na maioria dos anos analisados, por exemplo, a Índia

em 1990 possuía renda per capita de um país renda baixa, mas na maioria dos anos analisados, o país se encaixou como um país de renda média baixa.

Países de renda baixa e renda média baixa, provavelmente devido à reduzida presença em volume nas cadeias de comércio globais, não representam impactos significativos nos balanços de emissões. Logo, os maiores responsáveis pelas emissões associadas ao comércio são os países com economias robustas. Destaca-se que, a contabilidade centrada em uma perspectiva de consumo segue uma lógica comercial, ou seja, o balanço negativo líquido (déficit) significa que o país, na prática, “importou” carbono, enquanto um balanço positivo líquido (superávit) significa que o país atuou como um “exportador”.

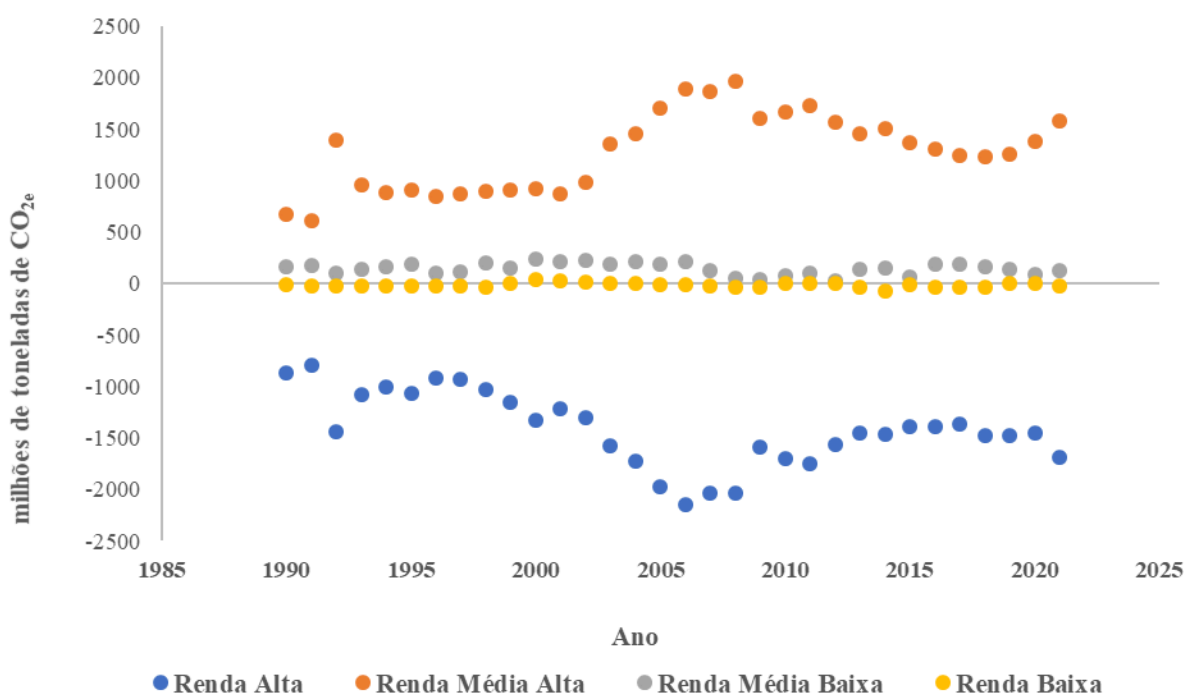
Com base em dados do Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022), os países classificados como “*high income*”, segundo os dados disponíveis, possuíam um balanço negativo líquido de 800 milhões de toneladas de CO_{2e} em 1990, tendo seu pico em 2006, com cerca de 2,1 bilhões de toneladas de CO_{2e} em seu balanço de carbono. Após o pico, esse valor foi reduzido para cerca de 1,4 bilhão de toneladas de CO_{2e} mantendo-se relativamente estável entre 2012 e 2021. Ao observar de forma mais atenta esse grupo de 44 países, percebe-se que os maiores contribuidores para o balanço negativo de carbono foram: Estados Unidos, Japão, Alemanha, Reino Unido, Itália e França.

Ao mesmo tempo, também segundo dados do Global Carbon Budget, o oposto ocorreu nos países de renda média alta que em 1990 detinham um balanço positivo de carbono (“exportavam”), ao olhar para o comércio internacional, de cerca de 670 milhões de toneladas de CO_{2e}. O pico, para esse grupo de países, foi atingido em 2008 com cerca de 1,9 bilhão de toneladas de CO_{2e}, com posterior redução e estabilização na casa dos 1,4 bilhão de toneladas, com variações ano a ano entre 2012 e 2021. Dentro desse grupo de 37 países, os que mais contribuíram para os dados de “exportação” de emissões foram: China, Rússia e África do Sul.

A Figura 1 evidencia os dados discorridos e percebe-se, graficamente, que os países de renda baixa e de renda média baixa não possuem grande impacto nas emissões via comércio internacional, provavelmente devido à baixa inserção nas cadeias globais de valor. Enquanto os países de alta renda e de renda média alta destacam-se como grandes

“importadores líquidos” e “exportadores líquidos” de emissões, respectivamente. Observa-se, portanto, um aparente espelhamento entre importadores e exportadores, seguindo a relação entre países “desenvolvidos” e “em desenvolvimento”, que será objeto de análise estatística apresentada em seções subsequentes desta pesquisa.

Figura 1 - Total de Transferências de emissões via comércio internacional de 1990 a 2021

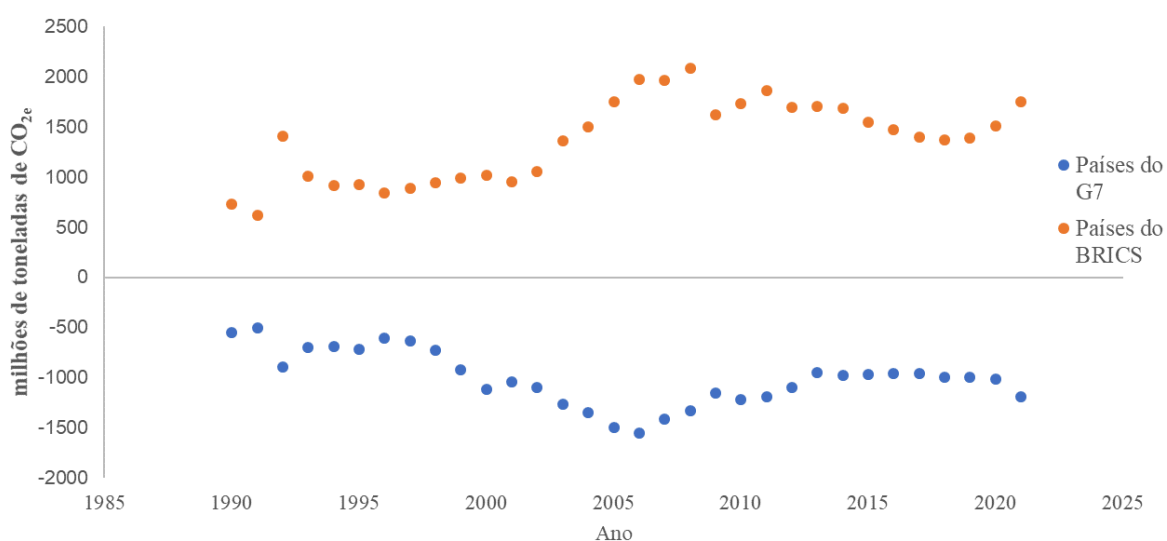


Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados do *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Para uma maior delimitação, de forma a trabalhar com um escopo menos heterogêneo de países, foram analisados também os dados dos países do G7, que representam os maiores emissores e as maiores economias dentro dos países de renda alta, segundo classificação do banco mundial. Esse grupo de países foi contrastado com os integrantes do BRICS, que, embora apresentem maior heterogeneidade — a Índia, por exemplo, é classificada pelo Banco Mundial como um país de renda média baixa —, destacam-se como representativos, tanto em termos de emissões quanto de economia, dentro do amplo conjunto de países fora do grande grupo de países de “alta renda” (*high income*).

Ao visualizar os dados desse recorte geopolítico, BRICS e G7, obtém-se a Figura 2, na qual é visualmente perceptível visualmente uma distribuição similar à Figura 1, que contempla uma maior gama de países (81 países), com uma crescente entre 1990 e a 2006 e posterior regresso nos números absolutos e estabilização em um patamar consideravelmente alto de emissões.

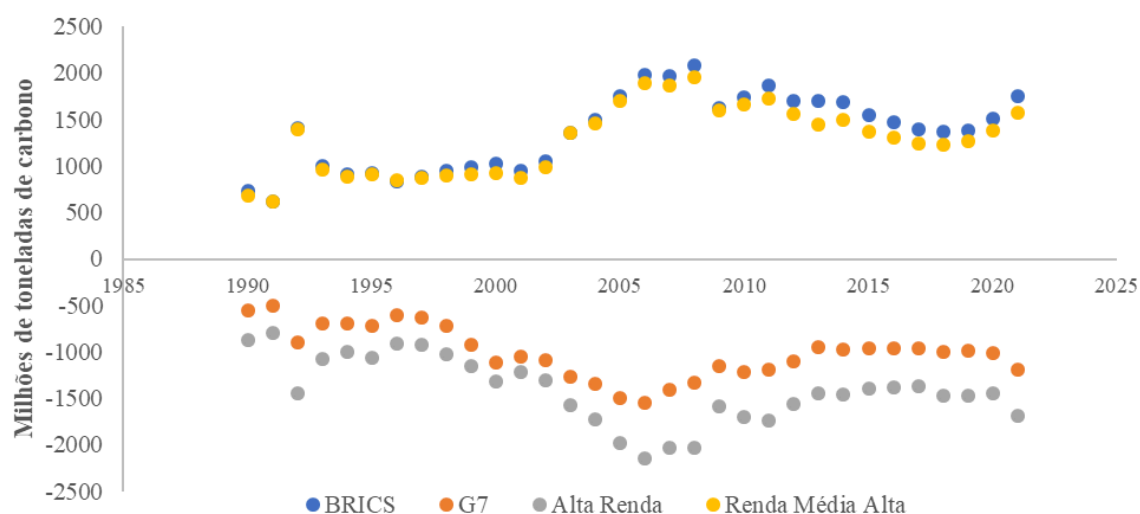
Figura 2 - Total de transferências de emissões via comércio internacional, países do G7 e do BRICS



Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados do *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Para uma melhor visualização de ambos os gráficos, a Figura 3 mostra que os grupos de países do BRICS e G7 representam o maior peso das respectivas curvas apresentadas para países em desenvolvimento e desenvolvidos. Isso sugere, portanto, que seriam parâmetros razoáveis para uma macroanálise a partir de países mais representativos. A título de observação, os BRICS representam até mais emissões associadas ao comércio que todo o grupo de países de renda média alta, em virtude da Índia, na classificação do Banco Mundial, não figurar entre esses países e sim ser classificada como um país de “renda média baixa”. No contexto do gráfico geral, a Índia representa, sozinha, metade das emissões associadas ao comércio do grupo de países classificados como “Renda média baixa”, de acordo com os dados disponíveis (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Figura 3 - Total de transferências de emissões via comércio internacional, países do G7, BRICS, Renda Alta e Renda Média Alta



Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados do *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Ao mesmo tempo em que se tem esse cenário com os dados da perspectiva baseada no consumo, ao visitar os dados oriundos da contabilidade territorial de emissões, fornecidos pelo Banco Mundial (2023), percebe-se uma tendência diferente da visualizada. É verificável que de 1990 até 2021, existe uma redução de emissões nos principais países denotados como “importadores de emissões”, países de alta renda. Os Estados Unidos, por exemplo, passaram de um quantitativo total de emissões de 4,8 GtCO₂e em 1990, com um pico em 2000 de 5,7 GtCO₂e, chegando em 2020 com 4,3 GtCO₂e emitidos. Já a União Europeia, que possui em quase a sua totalidade, países de renda alta, além de ter em sua composição algumas das 10 maiores economias do mundo, como Alemanha, Reino Unido, França e Itália, emitia 3,5 GtCO₂e em 1990, passando para 2,4 GtCO₂e em 2020, uma redução significativa.

Dito isso, sob a contabilidade territorial é perceptível que alguns países desenvolvidos obtiveram avanços em reduzir os gases do efeito estufa. De acordo com Le Quéré *et al.* (2019), ao analisar os principais *drivers* para a redução de emissões em um grupo de 18 países, dentre eles Estados Unidos, Alemanha, Itália, França, Reino Unido (importantes membros do G7), foi constatado que o fator que mais contribuiu para a redução das emissões foi a redução do percentual do uso de energia advindas de fontes fósseis, seguida da redução

na demanda de energia. Portanto, os perfis da matriz energética primária e da demanda final de energia são aspectos centrais à compreensão dessas dinâmicas. Le Quéré *et al.* (2019) e Jakob e Marschinski (2013) também afirmam que as emissões incorporadas ao comércio internacional em si não seriam um fator preponderante, mas provavelmente um reflexo desses outros comportamentos. No entanto, essas discrepâncias de emissões no comércio internacional podem ensejar outras questões de fundo, em termos geopolíticos, como a disparidade socioeconômica em termos históricos.

Grubb *et al.* (2022) ilustram essas dinâmicas de forma didática: em um cenário em que dois países comercializam o mesmo produto entre si, se um dos países possui a matriz energética menos carbono intensiva, essa interação geraria emissões líquidas associadas ao comércio internacional. Produzir no país com a matriz menos intensiva geraria menos emissões do que no parceiro comercial. Nesse contexto, o país com menor intensidade de carbono apresentaria emissões associadas ao comércio negativas (“importações”), enquanto o país com maior intensidade de carbono teria emissões positivas (“exportações”).

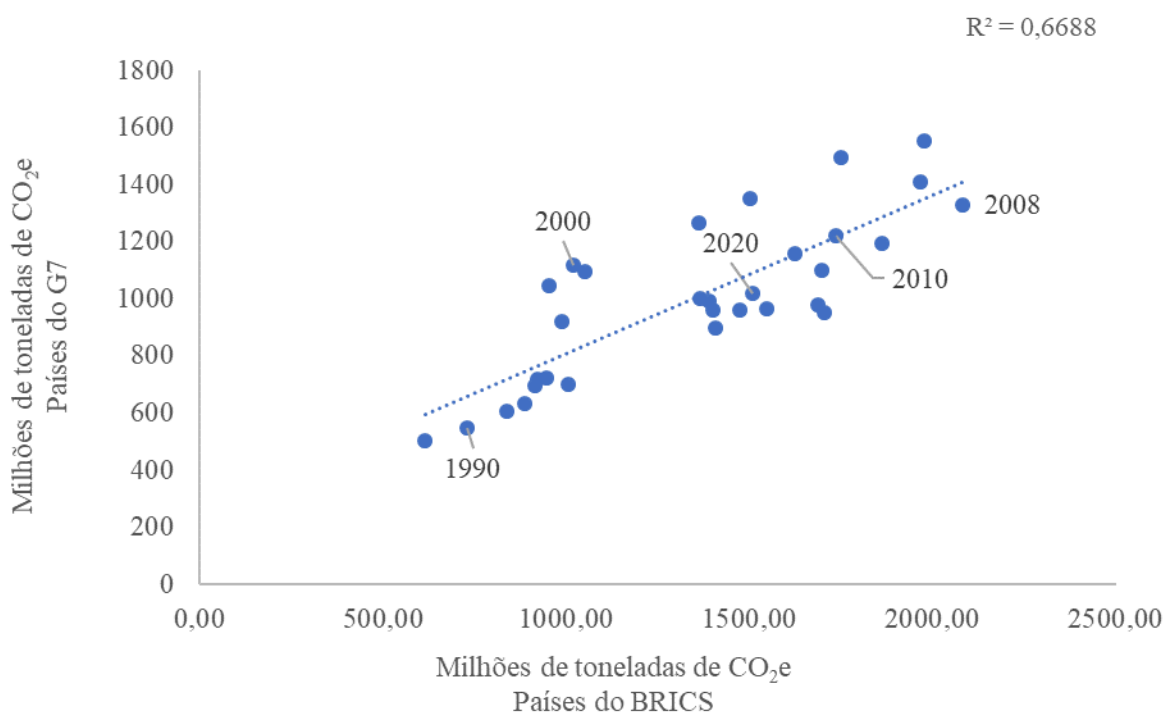
Diante desse cenário, é crucial reconhecer que a redução das emissões em alguns países está intimamente ligada à diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Além disso, é importante considerar o fluxo de transferência de emissões de países de renda média para nações de alta renda, bem como a necessidade de investimentos substanciais para viabilizar uma transição energética global, estimados em cerca de 150 trilhões de dólares até 2050 (Irena, 2023). Portanto, torna-se fundamental compreender os principais “*drivers*” que determinam essas emissões a partir da perspectiva do consumo.

Além da fundamental importância das fontes de energia para a intensidade de carbono de uma economia, outro fator de necessária visualização é o volume comercializado entre países. A tendência, assim como demonstrado por Franzen e Mader (2018), é de que países com um elevado volume comercial tendem a possuir maior grau de emissões associadas ao comércio. Outro fator, que provavelmente exerce uma influência nesses dados, como demonstrado no estudo sobre a Áustria (Steininger *et al.*, 2018), são as indústrias energo-intensivas. Como já citado, essas indústrias foram responsáveis por 25% de todo o carbono importado pela Áustria, no período analisado pelos autores. Logo, é possível que o comportamento demonstrado nos gráficos acima (Figuras 1 e 2) sofram a influência de uma

diferença de localização das indústrias pesadas e intensivas em carbono e energia, a qual pode, a princípio, estar associada a outros aspectos de fundo, tais como alta disponibilidade de recursos naturais em alguns países em desenvolvimento, assim como a disponibilidade de mão de obra a custos mais baixos e, eventualmente, menor regulação e controle de impactos socioambientais (Sadik-Zada e Ferrari, 2020 e Copeland e Taylor, 2004).

Dessa forma, ao entender os fatores motivantes dos dados de emissões que levam em conta as conexões globais, via comércio, é possível delimitar melhor as responsabilidades climáticas, afinal, os países de alta renda, do G7 e da União Europeia, que conseguiram reduzir suas emissões territoriais, são países com capacidade de investimento e representam 44% do PIB mundial (Banco Mundial, 2021). Ao contrastar os fluxos de carbono entre os países do BRICS e do G7, com os dados do BRICS em módulo, percebe-se que as curvas apresentam algum grau de correlação (Figura 4), significativa estatisticamente, em nível de 1%.

Figura 4 - G7 e BRICS dados de transferências de emissão via comércio sobrepostos ano a ano (1990-2020)



Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados do *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Apesar da literatura analisada nesta pesquisa não sugerir a existência de uma transferência direta de emissões no comércio internacional, em uma espécie de relação “causa-efeito”, é possível que os mesmos fatores estejam influenciando, de algum modo, essas curvas contrastantes nos países selecionados. Afinal, os comportamentos são, em geral, inversamente proporcionais e guardam algum nível de similaridade, que será testada estatisticamente nas seções subsequentes.

Esses determinantes podem ensejar questões mais complexas, como as relações históricas existentes entre países “desenvolvidos” e países “em desenvolvimento”. As relações de carbono, via comércio internacional, podem estar replicando injustiças históricas entre países do Norte Global e Sul Global, o que remonta novamente à necessidade de se pensar e discutir mais criticamente a transição energética, com a mudança de um modelo baseado em fósseis, de uma forma justa e inclusiva.

3. Metodologia

Para atingir os objetivos da pesquisa, além de uma revisão na literatura técnico-científica e em base de dados globais, foi utilizada a técnica econométrica chamada “Dados em Paineis”, que permite a combinação de dados em dimensão espacial e em dimensão temporal. Como o objetivo da pesquisa é verificar e explicar os fatores determinantes dos diferentes comportamentos das curvas de emissões incorporadas ao comércio, a metodologia possibilita esse tipo de análise estatística, principalmente por os dados estarem espaçados temporal e geograficamente.

Segundo Mesquita *et al.* (2020), a combinação de informações temporais e espaciais é importante para resultados com maior grau de confiança. Os autores também afirmam que os painéis facilitam a detecção de relações causais entre duas variáveis, auxiliando no estudo das alterações de uma variável, exatamente o que se propõe nesta pesquisa: estudar os motivantes das diferenças nas curvas de emissões associadas ao comércio. Hsiao (2005) afirma que os dados em painel observam melhor a complexidade do comportamento quando comparado com uma análise de apenas uma série temporal, afinal, os dados em painel possuem, via de regra, mais graus de liberdade e menor multicolinearidade que uma análise feita para apenas um período do tempo. Adicionado a isso, a metodologia pode contribuir para observar efeitos anteriores e posteriores de algum evento.

Para fins de operacionalização dos resultados, foi utilizado o modelo de regressão de “efeitos fixos”, após a elaboração de um painel com os dados líquidos de emissões associadas ao comércio, dados socioeconômicos e energéticos dos países alvo. A estimação de efeitos fixos visa remover qualquer efeito não observado constante ao longo do tempo. Em outras palavras, a técnica controla as características individuais que não variam com o passar dos anos, mas que podem influenciar as diferenças entre os países (Wooldridge, 2006). De forma mais direta, os efeitos fixos controlam as características dos indivíduos constantes no tempo, características essas que exercem influência nas diferenças das médias entre os indivíduos, por exemplo, a geografia chinesa possibilita uma grande disponibilidade de recursos de carvão, diferentemente da brasileira, essas diferenças estruturais, ainda que não estejam diretamente nos dados, são controladas com o uso da metodologia.

Assim como no artigo de Wang *et al.* (2017), a pesquisa utiliza variáveis de comparação extraídas de uma base de dados socioeconômicos, a do Banco Mundial (2024) e do relatório “*Energy Institute Statistical Review of World Energy*” (2024). A pesquisa é estruturada de forma similar, mas uma das diferenças está na utilização dos dados das emissões incorporadas ao comércio como variável a ser investigada e não os oriundos da contabilidade territorial — que, como já visto, levam a cenários bem diferentes. Ademais, também foram utilizadas variáveis diferentes das de Wang e colegas, que utilizaram crescimento econômico, urbanização e consumo energético, para explicar as diferenças nos fluxos de emissões entre os países escolhidos pela pesquisa. Para a operacionalização da análise estatística foi utilizado o *software* “*R Studio*”, que é gratuito e muito utilizado para análises estatísticas e gráficas. Esse *software* possibilitou a realização dos testes, bem como a elaboração de gráficos de forma eficiente, além de ser uma das principais ferramentas para análises estatísticas dentro das ciências sociais.

Os dados referentes às transferências de emissões foram retirados do relatório *Global Carbon Budget* (Friedlingstein *et al.*, 2022), que contém os dados globais de transferências de emissões no comércio internacional desde a década de 1990 até o ano de 2021. O relatório utiliza a metodologia *Multi-region input-output* (MRIO), que embasa a grande maioria dos estudos sobre carbono incorporado ao comércio e é a mais recomendada para estudos globais, segundo Peter *et al.* (2012).

Para a construção de um modelo explicativo para as emissões incorporadas ao comércio internacional foram coletados indicadores sociais, econômicos, energéticos e demográficos, a partir das bases citadas acima. Após a construção do painel e a realização de testes estatísticos, foi possível obter um modelo com seis variáveis:

- **“Carbon_embodied”**: a variável dependente, em milhões de toneladas de CO₂e, que representa os valores líquidos das emissões incorporadas ao comércio internacional, com um recorte temporal de 1990 até 2020, com dados por país, oriunda da base de dados do relatório do *Global Carbon Budget*.
- **“CleanEnergy_Final_Consumption”**: uma das variáveis independentes/explicativas, apresentada em porcentagem de energia final consumida por um país, que vem de fontes renováveis de energia. Também

utiliza o mesmo recorte temporal de 1990 até 2020, com dados por país, oriundo da base de dados do Banco Mundial.

- **“Gdp_pcp_growth”**: uma das variáveis independentes/explicativas, que é o crescimento de renda *per capita* nos países, com dados de 1990 até 2020, também da base de dados do Banco Mundial.
- **“Net_Trade_GDP”**: uma das variáveis independentes/explicativas, obtida pela razão entre a balança comercial líquida em relação ao PIB dos países, com dados de 1990 até 2020, extraída da base de dados do Banco Mundial.
- **“Carbon_Industry”**: uma das variáveis independentes/explicativas, que representa as emissões associadas ao processo industrial nos países, em milhões de toneladas de carbono, com dados de 1990 até 2020, coletada da base de dados do Banco Mundial.
- **“Population_Growth”**: uma das variáveis independentes/explicativas, que representa o crescimento da população dos países, com dados de 1990 até 2020, oriunda da base de dados do Banco Mundial.

Destaca-se que, dada a ampla gama de países existentes, o recorte da pesquisa é geopolítico, de forma a agrupar os dados dos três países mais populosos e de maior economia integrantes do “G7”, grupo representativo dos países “desenvolvidos”, além de atores-chave na política e economia mundial, estão entre os maiores emissores de CO₂. Além disso, a pesquisa também se debruça nos três países mais populosos e de maior economia dos BRICS, por serem um grupo de países que contempla algumas das economias mais importantes dentre os países “emergentes”. Os países do BRICS também são relevantes na configuração global de emissores de gases do efeito estufa. A China, por exemplo, é atualmente o maior emissor de gases de efeito estufa (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Com um recorte de seis países, que representam parcela significativa da economia, população, emissões e comércio de blocos como BRICS e G7, é possível obter um panorama de macrotendências internacionais, afinal, esses países também são representativos no total de emissões de seus respectivos grupos citados, assim das categorias de renda média alta e renda alta, a partir da classificação do Banco Mundial. Logo, um grupo de apenas seis países permite, sob alguns aspectos, fomentar uma discussão global, principalmente na temática da pesquisa, que une comércio e o contexto global de emissões. Os três maiores países do G7 em

população e de maior economia — Estados Unidos, Japão e Alemanha — são responsáveis por 63,3% das emissões incorporadas a todo o Bloco, representando também 77,5% do PIB do G7. Já os três maiores países do BRICS em população e economia — China, Índia e Brasil — são responsáveis por 64% das emissões incorporadas ao comércio atribuídas a todo o BRICS e representam 90% do PIB do bloco, conforme consolidado no Quadro 1.

Quadro 1 - Recorte escolhido pela pesquisa

Três maiores economias do G7 (Estados Unidos, Japão e Alemanha)	representam 63,6% das emissões associadas a todo o bloco.
	representam 77,5% do PIB do bloco.
	representam 69,8% da população do bloco.
Três maiores economias do BRICS (China, Índia e Brasil)	representam 64% das emissões associadas ao comércio de todo o bloco.
	representam 90% do PIB do bloco.
	representam 93,7% da população do bloco.

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

Outra razão para o recorte selecionado é a falta de dados comparáveis de todos os países classificados, segundo o padrão de renda do Banco Mundial. Logo, não seria prudente analisar os países de renda média alta e os países de renda alta por completo, sem que os dados de todos os países pertencentes desses grupos estivessem suficientemente disponíveis. Por isso, foi feita a escolha do uso de países representativos para explicar os comportamentos dos grandes grupos. Outra ponderação importante é que esses países, se tratando de comércio internacional, representam parcela substancial, além de concentrarem mais de 40% da população mundial, sendo assim enormes mercados consumidores.

3.1 Equação do Modelo

A Equação 1 representa o modelo econométrico:

$$\begin{aligned} carbon_embodied_{it} = & \alpha + \beta 1 CleanEnergy_Final_Consumption_{it} \\ & + \beta 2 gdp_pcp_{it} + \beta 3 Net_Trade_GDP_{it} + \beta 4 Carbon_industry_{it} + \\ & \beta 5 population_growth_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (Eq. 1)$$

A equação acima pode ser destrinchada como a variável dependente, “*carbon_embodied*”, que representa os valores líquidos de emissões associadas ao comércio para cada país analisado. O intercepto “ α ”, que é o termo de efeito fixo específico para cada país. O intercepto é responsável pelo efeito fixo da equação, controlando características estruturais e constantes no tempo de cada país.

As variáveis independentes são marcadas como “ β ” e representam os indicadores coletados com o objetivo de explicar o comportamento da variável dependente. São eles: a porcentagem de consumo final de energia renovável de cada país; o PIB per capita dos países; a razão entre a balança comercial e o PIB dos países; as emissões oriundas do processo industrial; o crescimento populacional e a porcentagem de energia oriunda de fósseis na energia primária dos países. Por fim, a equação conta com o termo de erro “ ε ”, que capta as variações não explicadas, pelas variáveis escolhidas, do carbono associado ao comércio. Os termos “*it*” presentes em cada variável representam, respectivamente, as duas dimensões: espacial (país) e temporal (anos).

3.2 Limitações da Pesquisa

A pesquisa possui algumas limitações, como o número de países analisados. Apesar dos três maiores países do BRICS e do G7 representarem grande parte da economia e comércio internacional, para o melhor entendimento do cenário global, o ideal seria a ampliação do escopo da pesquisa, com uma análise de todos os países do G7, em contraste com todos os países do BRICS. No entanto, essa ampliação levaria a incertezas adicionais, associadas às bases de dados e dinâmicas de comércio.

Apesar do modelo econométrico obtido ter apresentado um alto poder explicativo (R^2 acima de 0,7 e F-estatística globalmente significativa), é fundamental reconhecer certas limitações metodológicas. A partir de análise dos resíduos da regressão, percebe-se um comportamento não linear de algumas variáveis explicativas, em relação às emissões incorporadas ao comércio internacional, o que enseja a possibilidade de o modelo não capturar de forma integral a complexidade das relações existentes entre todas as variáveis independentes, com a variável explicada. Há por exemplo, dinâmicas relativas à variação de estoques de mercadorias, assim como incertezas relacionadas à pegada de carbono de cada tipo de produto comercializado. Essas características ensejam a necessidade de um maior conservadorismo ao interpretar os coeficientes da regressão. Os gráficos de dispersão podem ser encontrados no Apêndice da pesquisa e ilustram essas relações.

Nota-se que a validade da inferência do modelo deve ser interpretada com cautela e maiores refinamentos podem ser realizados em estudos futuros, como a “correção por erros robustos”, de forma a ampliar a robustez das significâncias e dos coeficientes apresentados no modelo. Além disso, outras técnicas como o tratamento de *outliers*, em caso de futuros trabalhos, com amostras maiores, poderiam ser utilizadas para o maior refinamento dos resultados.

Quanto ao modelo econométrico, apesar do desenho de painel empregado controlar por efeitos não observáveis específicos a cada país e por tendências temporais, persistem riscos de endogeneidade e de variáveis omitidas, afinal, o modelo ainda apresenta dificuldade em explicar cerca de 30% das variações das emissões incorporadas ao comércio internacional. Por fim, a extrapolação dos resultados para outros contextos geográficos ou períodos futuros deve ser feita com cuidado, uma vez que relações econômicas e tecnológicas evoluem rapidamente, especialmente em setores energéticos sujeitos a políticas e regulações, com vistas a alcançar a descarbonização.

Outra limitação da pesquisa diz respeito a análise de dados líquidos. Apesar de o trabalho se basear na evolução desses dados líquidos ao longo de 30 anos, o que evidencia uma tendência, seria ideal analisar os dados brutos referentes às “exportações” e “importações” dos dados de cada país, todavia, em virtude da disponibilidade de dados agregados, optou-se pelo uso dos dados líquidos. Outro ponto de incerteza a ser levantado são

as questões aduaneiras de blocos econômicos de livre mercado, como o Mercado Europeu. Em um mercado de livre comércio podem surgir algumas questões em relação a contabilização de emissões, a depender se a importação foi registrada no país de chegada ou no país que de fato consumiu o produto.

O aumento da eficiência energética, que é algo positivo para mitigação das mudanças climáticas, pode levar o país a um “cenário negativo” ao comporta-se como “importador”, entretanto, destaca-se que a contabilidade baseada no consumo tem caráter complementar, conforme discutido pela literatura citada. Em casos que países aumentam as exportações de carbono e importações, em proporções parecidas, a análise de dados líquidos também fica prejudicada. Estudos futuros podem, eventualmente, analisar em maior detalhe esses aspectos, por meio de análise específica dos componentes da balança de carbono, de modo separado, para cada país analisado.

Além disso, os dados agregados de exportação e importação trazem uma complexidade de fundo, associada às dinâmicas de fabricação de cada produto que compõe a balança comercial. Por exemplo, um país pode exportar café processado e importar grãos de café, ou importar cacau e exportar chocolate, incluindo outras matérias-primas em sua fabricação, e assim por diante. Portanto, a atribuição de responsabilidades em termos de mudança do clima, também deve levar em conta tais aspectos e incertezas envolvidas.

4. Resultados e Discussão

4.1 Perfil dos Países

As próximas seções apresentam uma análise detalhada dos blocos examinados, considerando comércio, emissões, energia e outros indicadores socioeconômicos, ao longo do período analisado pela pesquisa, entre 1990 e 2020.

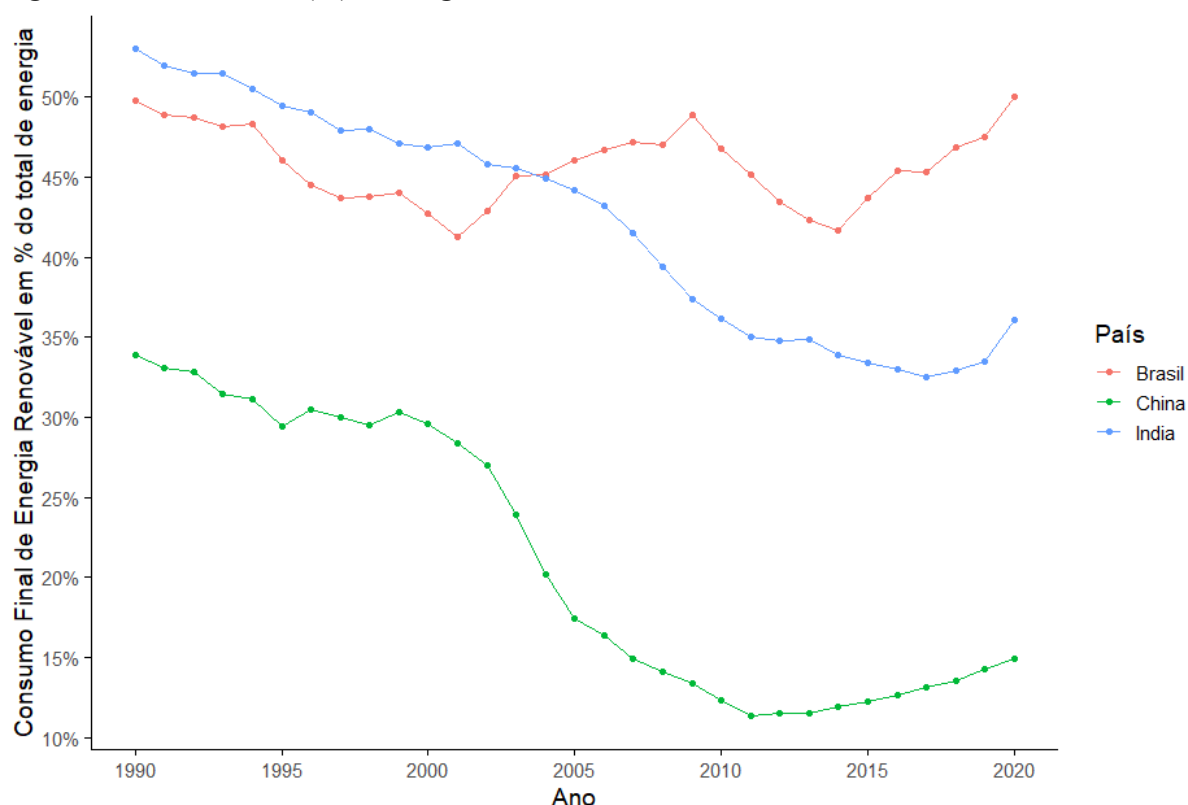
4.1.1 BRICS

O grupo de países do BRICS, inicialmente BRIC: Brasil, Rússia, Índia e China, sem a África do Sul como integrante, teve sua primeira cúpula em 2009 na Rússia. Em 2011, na cúpula de Sanya (China), a África do Sul passou a integrar o grupo, com a sigla tornando-se BRICS. O grupo não é um bloco econômico formal, mas sim um arranjo de países relevantes do Sul Global, que tem como principal objetivo alterar o sistema de governança global, bem como reformar os organismos de financiamento de Bretton Woods (FMI e Banco Mundial). O diálogo entre países se dá, de forma central, em temas como: economia, política internacional, segurança, cultura, mudanças climáticas e entre outros. Destaca-se que o BRICS vem se institucionalizando ao longo do tempo, com a criação do Novo Banco de Desenvolvimento (NDB), o popular “Banco do BRICS”, em 2014. Atualmente, o grupo aceitou a inclusão de mais países, como a Indonésia e o Irã (Brasil, 2023; Brics Policy Center, 2018).

Ao utilizar os dados coletados para a montagem de painéis, percebe-se algumas tendências nas últimas décadas, no consumo final dos países, em porcentagem, do consumo de energias oriundas de fontes renováveis. ³Com base em dados do Banco Mundial (2024), consolidados na Figura 5, o Brasil passou de 49,8% em 1990, para 42,7% em 2000, chegando a 50% em 2020. Já a China, consumia, a partir de fontes renováveis, 33,9% do total de sua energia em 1990; esse número caiu para 29,6% em 2000; caindo ainda mais para 12,3% em 2010; chegando a 14,9% em 2020. A Índia comportou-se de forma similar à China, em 1990, seu consumo final de energia, oriunda de fontes renováveis, era de 53%. Esse valor reduziu-se para 46,9% em 2000; com uma nova redução para 36,2% em 2010; chegando a 36,1% em 2020.

³ Nota-se que o dado coletado diz respeito ao consumo final de energia, diferentemente da oferta de energia, que o Brasil somente alcançou os 50% em 2024, conforme o relatório síntese do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), disponível aqui: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>

Figura 5 - Consumo Final (%) de energia oriunda de fontes renováveis nas maiores economias do BRICS



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

Percebe-se, com exceção do Brasil, que se manteve praticamente no mesmo patamar de proporção de renováveis no consumo final, China e Índia tiveram reduções abruptas do seu consumo final de energia oriunda de fontes renováveis, com ligeiro aumento em períodos mais recentes. É provável que esse cenário foi ocasionado pelo acelerado crescimento de fontes fósseis nos dois países, principalmente no consumo de carvão mineral e na industrialização da economia — China e Índia são os dois maiores consumidores de carvão no mundo (IEA, 2020).

Assim como sugerem Kim e Tromp (2021), é possível que esse fator energético tenha sido um dos determinantes do comportamento contrastante da balança comercial de carbono entre o Sul e o Norte global, com países do BRICS comportando-se como exportadores líquidos de carbono e os do G7 como importadores líquidos.

Além disso, a China é o país de maior intensidade energética (U.S Energy Administration, 2023), entre os países alvo da pesquisa. A Índia tem níveis similares de intensidade energética a Japão, Alemanha e Brasil, enquanto os EUA é o 2º mais intenso, porém, com uma queda acentuada nos últimos 30 anos. Ao analisar os dados de consumo energético per capita (disponíveis em Apêndice), percebe-se o aceleração do consumo energético nos países do BRICS e uma desaceleração nos países do G7. Dado esse cenário, com a China sendo consideravelmente mais energo-intensiva, ao mesmo tempo que a participação de renováveis caiu drasticamente na China e na Índia, há indícios de que essa redução no consumo final de energia proveniente de renováveis seja um dos motivadores para um saldo líquido positivo de carbono nas três principais economias do BRICS. No caso do Brasil, é preciso considerar a alta participação de emissões de GEE advindas do desmatamento e de atividades do setor agropecuário.

Outra tendência de importante destaque é o crescimento populacional. Os países alvo da pesquisa estão entre as 10 maiores populações do mundo, o que pressiona a demanda por energia, crescimento econômico e uso de recursos naturais, como minerais e combustíveis fósseis. Ao analisar os países selecionados, os três países do BRICS apresentaram um forte crescimento absoluto populacional. Segundo dados do Banco Mundial (2024), o Brasil passou de 157 milhões de habitantes, em 1990, para 213 milhões em 2020. A Índia foi de 870 milhões de habitantes (1990) para aproximadamente 1,4 bilhão de habitantes em 2020. Já a China com um crescimento menor, mas também expressivo, passando de 1,1 bilhão de habitantes em 1990 para 1,41 bilhão em 2020.

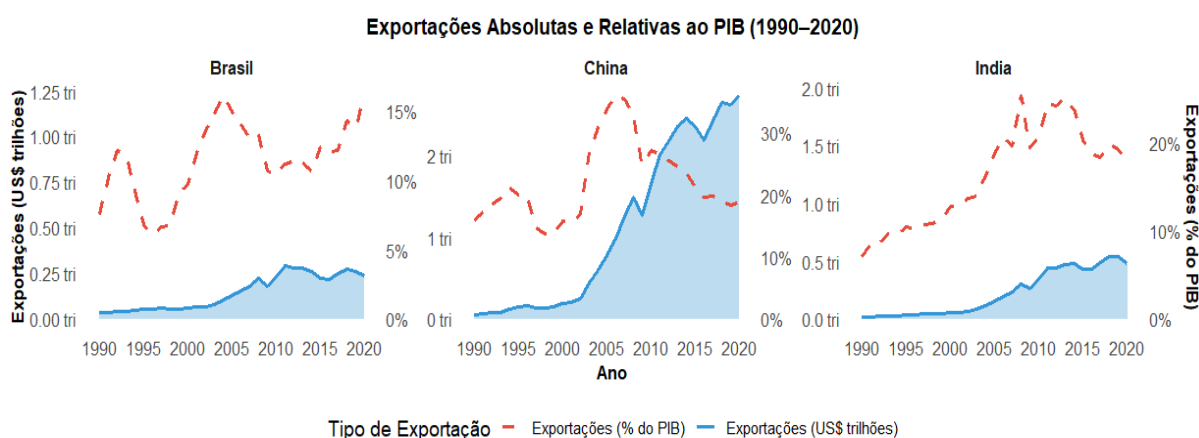
Conforme observado em um estudo de cenários globais de 2050, que utiliza a Calculadora Global de Carbono para modelagem e simulação (Strapasson *et al.*, 2020), a população é um fator de pressão para diversos vetores de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). Após análise comparativa com o grupo de países do G7 analisados, percebe-se que, com exceção dos Estados Unidos, suas populações ficaram praticamente estáveis em 30 anos. Japão e Alemanha obtiveram pequenos crescimentos incrementais, no caso japonês, um decréscimo populacional foi observado na última década (Banco Mundial, 2024).

Outro aspecto determinante nas emissões incorporadas ao comércio internacional é o volume comercializado por país, como já observado na literatura por Jakob e Marschinski

(2013), Franzen e Mader (2018) e Grubb *et al.* (2022). O crescimento na importância dos países do BRICS, dentro das cadeias comerciais globais, pode ser um dos fatores que influenciou o crescimento de suas emissões incorporadas ao comércio internacional, bem como seu comportamento de exportador de emissões.

Percebe-se que nos últimos 30 anos, as exportações tornam-se mais relevantes para as economias dos três países analisados. A Figura 6 ilustra o cenário, com a curva em área sendo referente ao Eixo Y da esquerda e representando os valores absolutos em trilhões de dólares, enquanto a linha tracejada diz respeito ao Eixo Y da direita, representando os valores das exportações em relação ao PIB dos países.

Figura 6- Brasil, Índia e China evolução das exportações



Fonte: Banco Mundial

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

As exportações representavam 8% do PIB brasileiro em 1990, e esse valor chegou a 16,4% em 2020 — as exportações cresceram de importância em relação à economia brasileira, mas também cresceram de forma absoluta, assim como nos outros países do BRICS. Na China, as exportações representavam 13,6% do PIB em 1990, já em 2020, esse valor foi de 18,5% do PIB — a importância das exportações em relação ao PIB chinês teve seu pico em 2006, significando 36% do PIB, justamente o ano de pico das emissões associadas ao comércio internacional. De forma absoluta, a China exportava 60 bilhões de dólares em 1990, alcançando 2,98 trilhões de dólares exportados em 2020, um crescimento exponencial (Banco Mundial, 2024)

A Índia não se diferenciou dos demais, suas exportações representavam 7% do PIB em 1990, significando 18,6% do PIB em 2020 — o pico indiano se deu em 2013, quando as exportações representavam 25% do PIB do país. Em termos absolutos, a Índia também passou por um crescimento expressivo de suas exportações, passando de um volume de 25,35 bilhões de dólares, em 1990, para 507 bilhões de dólares em 2020.

O crescimento das exportações desses países não se deu somente de forma absoluta no mundo, assim como na importância dentro de suas economias, mas também na criação de “dependências” de seus produtos em outras economias. Ao observar os dados do “Observatório da Complexidade Econômica” do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), percebe-se que os três países do BRICS analisados aumentaram sua importância, como fornecedores, para os países do G7 (OEC, [s.d.]).

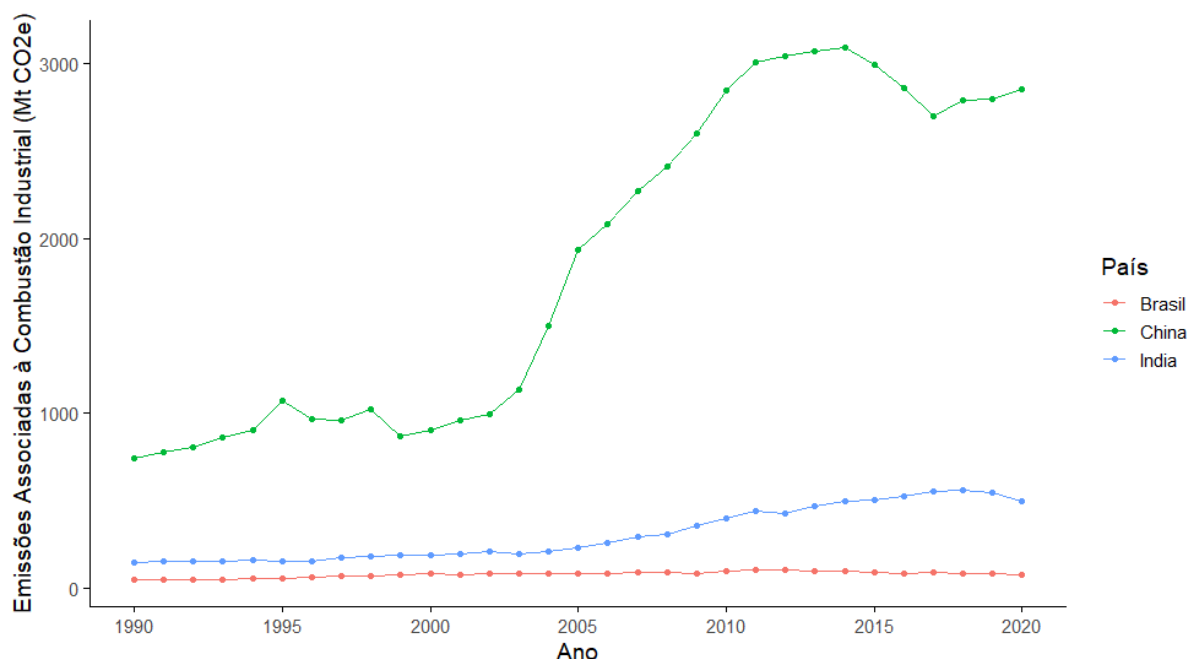
Ao olhar de forma detalhada a origem dos produtos importados pelos Estados Unidos, a maior economia do mundo, percebe-se que em 1995 — primeiro ano com dados disponíveis na série analisada —, a soma dos produtos importados de origem chinesa, indiana e brasileira representava 8,08% do total importado pelos Estados Unidos. Em 2020, os três países representaram 22,8% das importações americanas, porém, anteriormente à primeira chegada do Presidente Trump ao poder, que empreendeu uma guerra tarifária contra produtos chineses, o total importado dos países chegou a ser de 24,93% (2015). Do total de importações, destaca-se que a maior participação foi de produtos chineses (OEC, [s.d.]).

No caso de Alemanha e Japão, um padrão similar aos EUA foi observado. Em 1995, os três países do BRICS analisados representavam 3,79% das importações do país europeu. Após 25 anos, em 2020, 13,23% dos produtos importados pela Alemanha eram de origem chinesa, indiana e brasileira, com destaque para os produtos chineses, que representavam 11,8% das importações alemãs. Já na 2ª maior economia da Ásia, em 1995, 12,73% das importações eram oriundas dos países do BRICS analisados. Em 2020, Brasil, Índia e China respondiam por 27,78% das importações japonesas, dentre as quais 26,1% eram de origem chinesa (OEC, [s.d.]).

Percebe-se, de forma quantitativa, que a China, nos últimos 30 anos, tornou-se um dos maiores fornecedores de bens e serviços globais, bem como para o bloco das maiores economias do mundo. É possível, conforme observado nos dados comerciais e nos

apontamentos da literatura aqui analisada, que essa crescente importância nas cadeias globais de valor correlaciona-se com o aumento expressivo nas emissões associadas ao comércio internacional, mostradas nas Figuras 1 e 2, com destaque para o período de 1990 a 2006. Ademais, outro questionamento se dá em relação às responsabilidades, afinal, esse potencial aumento nas emissões se deu para, dentre outros países de destino, suprir a demanda em quase um quarto por produtos importados das maiores economias do mundo (24,53% dos EUA; 27,8% no Japão e 13,23% na Alemanha, para o ano-base de 2020) (OEC, [s.d.]). Não se pode ignorar os ganhos econômicos obtidos pela China durante esse processo, todavia, algumas questões precisam ser analisadas: i) a responsabilidade climática foi internalizada nesses ganhos? ii) os países importadores líquidos, seriam corresponsáveis por tais emissões?

Outro indicador dos países do BRICS analisados, que se relaciona ao aumento de importância nas cadeias produtivas globais, é o de emissões de CO₂e associadas ao processo industrial. Ao verificar os dados dos três países, percebe-se novamente um crescimento exponencial das emissões oriundas da nesse setor na China, principalmente entre 2000 e 2010, justamente no período de maior crescimento das exportações em relação ao PIB, sendo também o período de pico das emissões líquidas incorporadas ao comércio internacional. Pode-se observar esse cenário na Figura 7.

Figura 7 - Emissões Associadas ao Processo Industrial nas maiores economias do BRICS

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

Ainda na Figura 7, nota-se que, a China passou de aproximadamente 745 milhões de toneladas de CO_{2e} (1990) para 3,1 bilhões de toneladas em 2014, o pico das emissões oriundas do processo industrial. No último ano analisado (2020), a China emitiu aproximadamente 2,8 bilhões de toneladas de CO_{2e}, valor provavelmente afetado pelos *lockdowns* de combate à pandemia de Covid-19, que acometeu o mundo a partir de 2020. Essa análise sugere que grande parte do crescimento expressivo das exportações chinesas, bem como de seu crescimento econômico, foi assentada na indústria, com fontes de energia, como já visto acima, fortemente intensivas em carbono, sobretudo advindas do alto consumo de carvão mineral.

O Brasil destoa do grupo, cortando pela metade em 30 anos o total de emissões oriundas do processo industrial. O Brasil emitia, em 1990, 150 milhões de toneladas de CO_{2e} no processo industrial, já em 2020, emitiu 78 milhões de toneladas. O caso brasileiro destoa, afinal, o país entrou em acelerada desindustrialização nas últimas décadas, sendo o setor agropecuário o principal destaque dentro da balança comercial brasileira, que também cresceu de forma absoluta. Segundo dados do Banco Mundial (2023), a indústria representava

aproximadamente 23% do PIB brasileiro em 1990, passando para 11% em 2020, isso denota a perda de relevância do setor industrial na economia brasileira, esse declínio na participação industrial pode ter atuado como fator de redução ou contenção do crescimento das emissões, considerando que, em um cenário de manutenção do peso histórico da indústria na economia, as emissões tenderiam a ser maiores.

Já a Índia trilhou um caminho similar ao chinês, entretanto, em menor escala. O país asiático emitia, em 1990, aproximadamente 150 milhões de toneladas de CO_{2e} provenientes do processo industrial, e 30 anos depois, 501 milhões de toneladas, mais do que triplicando as emissões industriais. Essa aceleração das emissões também foi observada a partir dos anos 2000, coincidindo com o período de maior crescimento das emissões líquidas associadas ao comércio internacional. Nesse período também houve um forte crescimento das exportações indianas (Banco Mundial, 2024).

Percebe-se, a partir dos perfis de indicadores dos países do BRICS analisados, que China e Índia, nas últimas décadas, experienciaram um “boom” nas exportações, na participação do exportado em seu PIB, nas emissões associadas à indústria, além de crescimento populacional relevante. Nota-se, também, que ambos os países vivenciaram uma abrupta redução no percentual do consumo final de energias oriundas de fontes renováveis (e aumento do consumo de carvão), o que também sugere uma forte dependência de fósseis, resultando em uma maior intensidade de carbono em suas economias, consequentemente também nas exportações, embora investimentos em renováveis tenham avançado em períodos mais recentes.

De maneira geral, o Brasil diferencia-se do grupo, tendo reduzido suas emissões industriais, crescido em menor ritmo suas exportações e mantido seu percentual de consumo de renováveis, em relação ao total, com pequenas oscilações. Por outro lado, ao observar os dados líquidos brasileiros de emissões incorporadas ao comércio, percebe-se que o Brasil passou de importador de emissões para exportador, entre 1990 e 2020, embora em escala muito inferior às dinâmicas internacionais da China e Índia. Ilustrativamente, o Brasil em seu pico de emissões líquidas, importou 56 milhões de toneladas de CO_{2e} em 2011 e exportou, em seu pico, 25 milhões de toneladas de CO_{2e} em 2004 (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Ao observar uma fotografia brasileira, dos anos de pico, percebe-se que em 2004 (pico como exportador líquido), os produtos brasileiros mais exportados, utilizando a padronização de quatro dígitos da ⁴nomenclatura HS, foram: soja e farinha de soja (US\$ 9,84 bilhões); Minério de Ferro (US\$ 6,34 bilhões); Aviões, Helicópteros e/ou espaçonaves (US\$ 3,65 bilhões); Carros (US\$ 3,37 bilhões); Açúcar (US\$ 3,3 bilhões); Petróleo Bruto (US\$ 3,26 bilhões); e Carne de aves (US\$ 2,75 bilhões) — o total exportado foi de 107 bilhões de dólares, com essas categorias representando aproximadamente 30%. No mesmo ano, as importações foram inferiores (US\$ 68,7 bilhões), com destaque para: Petróleo Bruto (US\$ 6,96 bilhões); Motores de veículos, partes e acessórios (US\$ 2,31 bilhões); Petróleo refinado (US\$ 2,08 bilhões); Circuitos integrados (US\$ 1,98 bilhões); Partes de transmissão (US\$ 1,26 bilhões); Fertilizantes de Potássio (US\$ 1,18 bilhões) — representando 22% do total. O superávit comercial foi de aproximadamente 40 bilhões de dólares. Em 2011 — pico como importador líquido —, o superávit comercial brasileiro foi menor, 29 bilhões de dólares (OEC, [s.d.]). Os dados podem ser melhor observados no Quadro 2:

⁴ Sistema Harmonizado de Designações e de Codificação de Mercadorias, é a principal metodologia de padronização das mercadorias no comércio internacional. A nomenclatura Comum do MERCOSUL (NCM) tem por base o sistema harmonizado. Edição de 2022, disponível aqui: <https://www.wcoomd.org/en/topics/nomenclature/instrument-and-tools/hs-nomenclature-2022-edition/hs-nomenclature-2022-edition.aspx>

Quadro 2 - Principais produtos da balança comercial brasileira (2004, pico como importador líquido de carbono)

Exportações brasileiras em 2004 (US\$ 107 bilhões no total; categorias listadas representam ~30%)	
Produto (HS4)	Valor (US\$ bilhões)
Soja e farinha de soja	9,84
Minério de ferro	6,34
Aviões, helicópteros e/ou espaçonaves	3,65
Carros	3,37
Açúcar	3,30
Petróleo bruto	3,26
Carne de aves	2,75
Importações brasileiras 2004 (US\$ 68,7 bilhões no total; categorias listadas representam ~22%)	
Produto (HS4)	Valor (US\$ bilhões)
Petróleo bruto	6,96
Motores de veículos, partes e acessórios	2,31
Petróleo refinado	2,08
Circuitos integrados	1,98
Partes de transmissão	1,26
Fertilizantes de potássio	1,18
Superávit de aproximadamente US\$ 40 bilhões.	

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do *Observatory of Economic Complexity* (2023)

Em 2004, as categorias: produtos vegetais; produtos animais; bioprodutos de origem animal e vegetal; couro animal representaram juntos 30,7% do total exportado. Em 2011, esses produtos representaram 32%, um pequeno aumento. O principal driver das emissões

brasileiras é a mudança no uso da terra, percebe-se que o setor se manteve estável na participação comercial. Logo, dois cenários são prováveis: ou essa mudança de comportamento, nos anos de 2004 e de 2011, se deu nas importações; ou a redução do desmatamento brasileiro — a queda acentuada se deu a partir de 2006, segundo dados do TerraBrasilis (INPE, 2024) — levou as exportações brasileiras de produtos vegetais e animais a uma redução na sua intensidade de carbono (OEC, [s.d.]).

Percebe-se que a representatividade das categorias dos produtos importados, em relação ao total, não se alterou substancialmente ao comparar 2004 com 2011. Todavia, os principais remetentes alteraram-se. Em 2004, os 5 principais remetentes das importações brasileiras eram Estados Unidos (17,7%), Alemanha (8,3%), Argentina (8,1%), China (5,9%) e Nigéria (5,1%), representando os cinco, 45,1% das importações brasileiras. Já em 2011, os principais remetentes foram China (14,9%), Estados Unidos (14,7%), Argentina (7,2%), Alemanha (6,5%), e Coréia do Sul (5,2%), representando os cinco, 48,5% das importações. Ao comparar os cinco principais produtores das importações brasileiras nas duas fotografias, 2004 e 2011, percebe-se que relativamente o total de produtos oriundos dos Estados Unidos e da Alemanha mantiveram-se estáveis, com pequena queda, enquanto os produtos oriundos da China triplicaram percentualmente, além do crescimento absoluto. Ademais, a Coréia do Sul apareceu entre os 5 principais produtores dos produtos importados brasileiros, com um comércio relevante de 12,7 bilhões de dólares (OEC, [s.d.]). O cenário dos maiores remetentes de produtos para o Brasil pode ser melhor observado no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais remetentes das importações brasileiras (2004 x 2011)

2004	
País	Participação das importações brasileiras (%)
Estados Unidos	17,7
Alemanha	8,3
Argentina	8,1
China	5,9
Nigéria	5,1
Total (Top 5)	45,1
2011	
China	14,9
Estados Unidos	14,7
Argentina	7,2
Alemanha	6,5
Coreia do Sul	5,2
Total (Top 5)	48,5

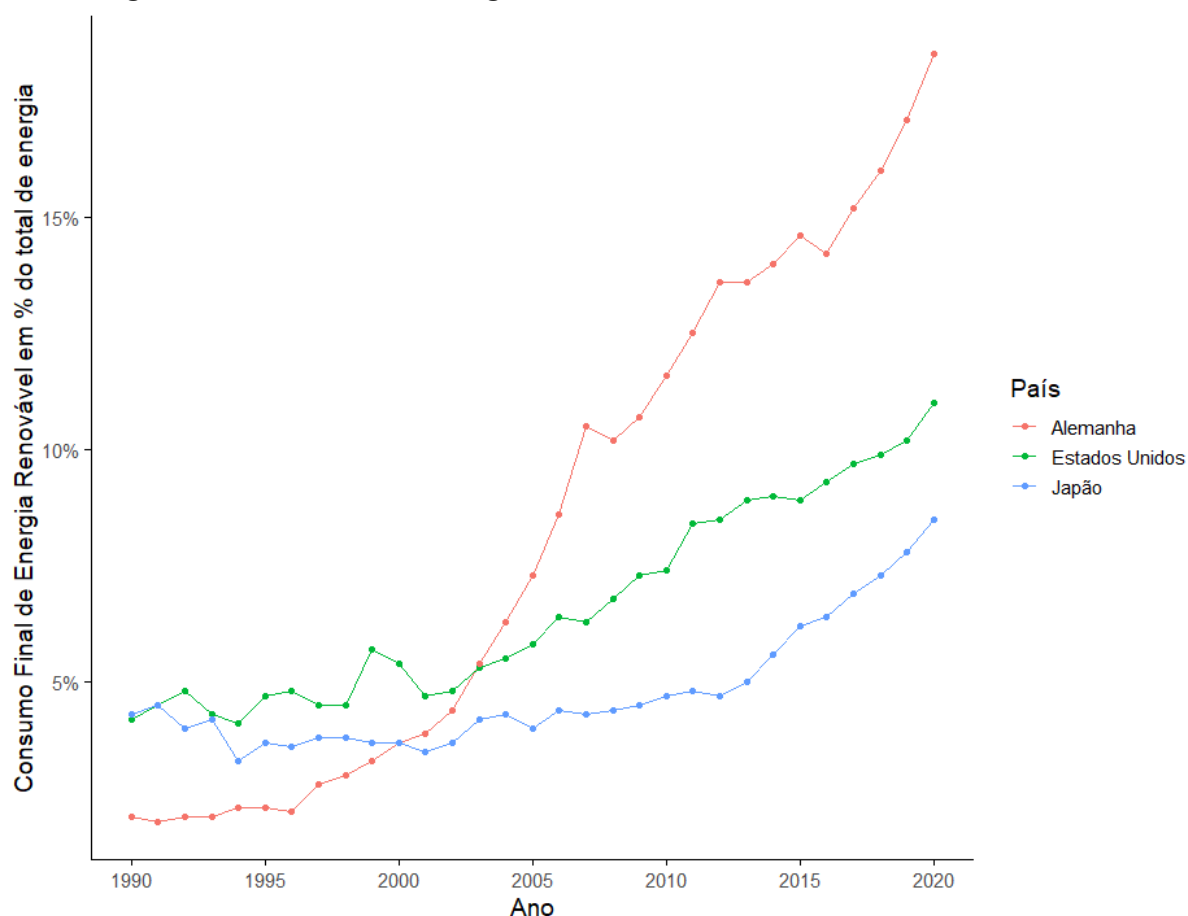
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do *Observatory of Economic Complexity* (2023)

A China pode ter sido um dos *drivers* da mudança brasileira nos dois anos analisados, visto que se comporta historicamente como o maior “exportador líquido” de emissões. Ademais, como analisado anteriormente, cresceu exponencialmente suas emissões ligadas ao setor industrial, reduziu a participação de renováveis em seu consumo final de energia e tornou-se a principal fornecedora de produtos para o Brasil (OEC, [s.d.]).

4.1.2 G7

O G7 é um fórum informal, que reúne os seguintes países: Estados Unidos, Canadá, Japão, Reino Unido, Itália, França, Alemanha e representantes da União Europeia. O primeiro fórum do G7 foi realizado em 1975, o grupo informal passou a se reunir, com o objetivo de ampliar a cooperação econômica e financeira. Entre 1997 e 2013, a configuração do G7 passou a incluir a Rússia nas discussões, com a suspensão do país do BRICS após a anexação da península da Crimeia, que fazia parte do território soberano ucraniano. Nota-se que o grupo, eventualmente, convida chefes de Estado de outros países para as reuniões, em 2024, por exemplo, o presidente brasileiro, Lula, foi convidado para a Cúpula em Borgo Egnazia, na Itália (G7 Italy, 2024).

De forma semelhante à subseção anterior, faz-se necessário analisar os indicadores coletados dos países do G7 que foram alvos da pesquisa. Nos últimos 30 anos, verificam-se tendências contrastantes com os principais países do BRICS. Ao analisar os dados do consumo final de energia de fontes renováveis, tem-se um comportamento antagônico ao dos países do BRICS, conforme observa-se na Figura 8.

Figura 8 - Consumo Final de energia de fontes renováveis nas maiores economias do G7

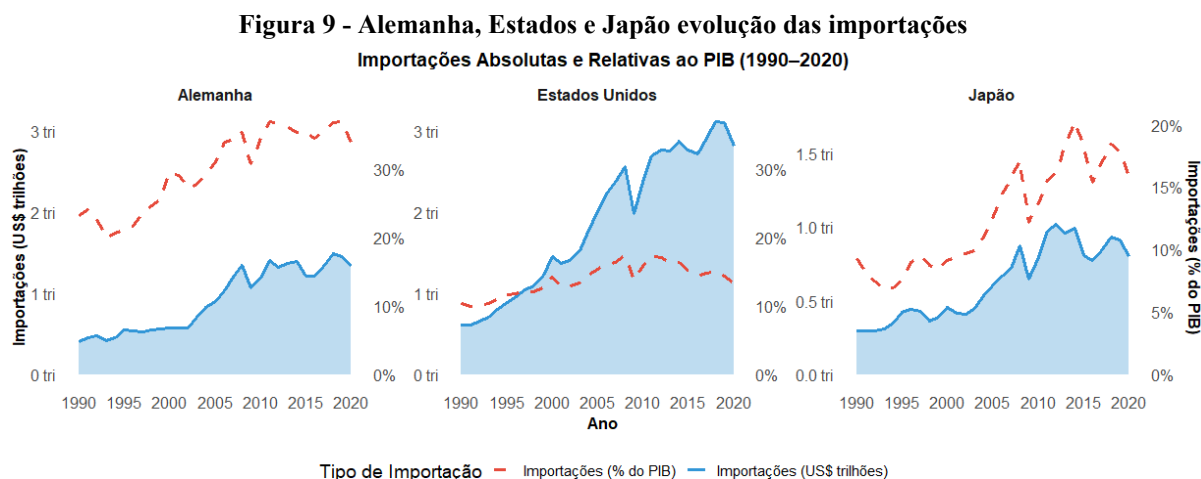
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

Ao contrário de China e Índia, Alemanha, Estados Unidos e Japão aumentaram a participação de energias renováveis em relação ao consumo final de energia por ano. Os três países do G7 saíram de menos de 5%, em 1990, para 18,5% (Alemanha), 11% (Estados Unidos), e 8,5% (Japão), em 2020. Portanto, a tendência das três principais economias do G7, nos últimos 30 anos, foi de um crescimento da participação de renováveis, o que resulta uma menor intensidade de carbono na produção interna dentro dos países, com destaque para a Alemanha, que em 30 anos, multiplicou por 9 a participação de renováveis dentro do consumo energético nacional. Nota-se que, ao analisar a intensidade de carbono por PIB, Estados Unidos, Japão e Alemanha reduziram para menos de 0,5 kg de CO₂ por dólar, chegando em patamar parecido com o brasileiro, mas bem distante do chinês e indiano (Banco Mundial, 2024).

Dado o comportamento contrastante entre blocos, com exceção do Brasil que manteve sua participação de renováveis relativamente estável, e a importância da energia nas emissões associadas ao comércio, é possível que esses dados sejam uma das variáveis de influência para explicar as curvas de carbono associadas ao comércio internacional. Percebe-se que são replicados os papéis inversamente proporcionais dos países, de acordo com os blocos analisados — os países do G7 com uma aceleração na participação de renováveis, enquanto os países do BRICS, exceto o Brasil, reduziram substancialmente a participação de renováveis no consumo final de energia (com essa tendência se revertendo nos últimos anos), aumentando assim a pegada de carbono oriunda do uso energético e consequentemente da produção interna.

Ao analisar o comportamento populacional das nações do G7 analisadas, tem-se que, diferentemente dos países do BRICS, o crescimento se deu em menor grau. A Alemanha, em 1990, possuía uma população de 79 milhões de habitantes, já em 2020, de 83 milhões. O Japão também apresentou uma estabilidade populacional, saindo de 123 milhões em 1990, para 126 milhões em 2020. Os Estados Unidos destoaram do bloco, saindo de uma população de 250 milhões para 330 milhões (Banco Mundial, 2024). É possível que o não crescimento populacional possa ter aliviado a demanda energética e por recursos naturais de Japão e Alemanha, com potencial influência nas emissões de carbono dos países, todavia, os Estados Unidos se comportaram de forma diferente do grupo, com um crescimento significativo (aproximadamente 30% em 30 anos).

Faz-se necessário, também, entender o comportamento dos países do G7 analisados em relação ao comércio internacional e sua participação nas cadeias globais de valor. Na Figura 9 é possível visualizar a evolução das importações nos países analisados:



Fonte: Banco Mundial

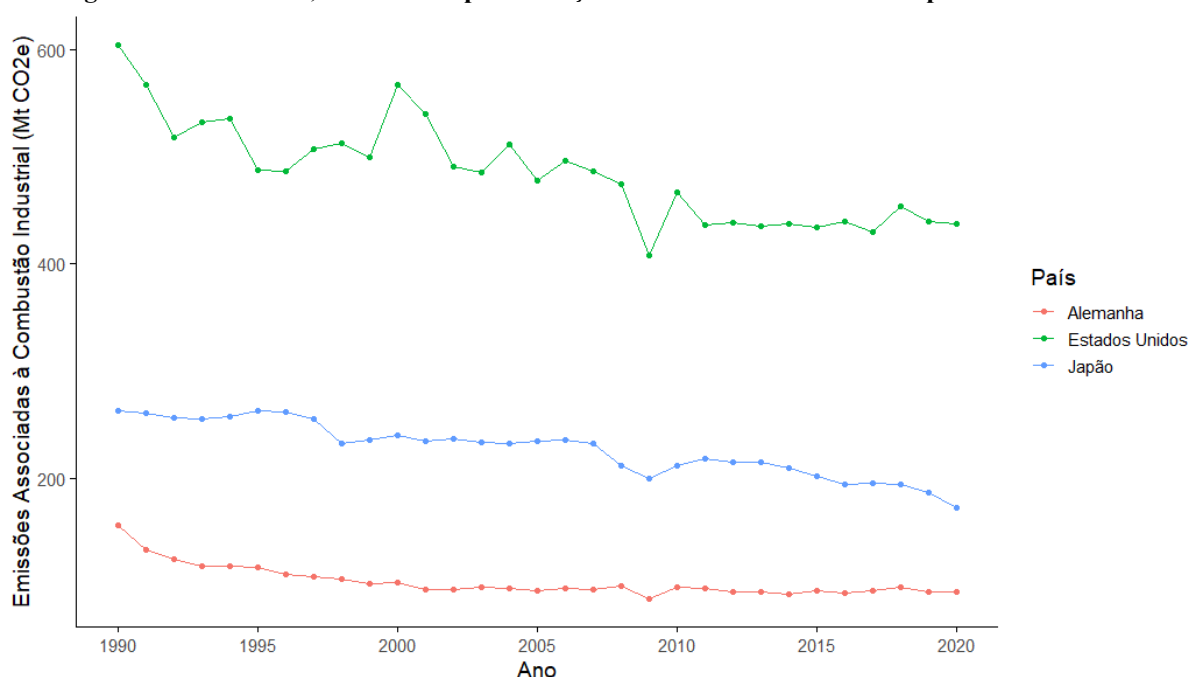
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

Destaca-se, conforme a Figura 9, a crescente importância das importações nas economias dos países, com crescimentos vertiginosos, sobretudo nos Estados Unidos. As exportações dos todos países também cresceram nos últimos 30 anos, todavia, os Estados Unidos — maior mercado consumidor do mundo — obtiveram um crescimento muito maior nas importações, acumulando um déficit comercial, em 2020, de aproximadamente US\$ 700 bilhões (um maior detalhamento é apresentado na seção seguinte). Ao analisar pela ótica dos déficits e superávits comerciais, nota-se que os países não possuem comportamentos uniformes, de acordo com os grupos geopolíticos, contudo, os Estados Unidos e a China destacam-se, cada um em uma ponta, com o mesmo comportamento apresentado pelos países no tocante à balança global líquida de carbono. Os EUA, como um país com vultosos déficits comerciais, e a China com superávits comerciais massivos (ambos, em dólares e em carbono).

Além disso, destaca-se a importância crescente da China, como ofertante dessas importações aos países do G7. A China, no último ano-base analisado pela pesquisa (2020), era o maior vendedor para os 3 países, EUA (19,5% das importações vinham da China); Alemanha (10,8% das importações); e Japão (25,8% das importações). Sabe-se da importância dos produtos chineses durante a pandemia (máscaras, seringas, luvas e materiais hospitalares), todavia, ao olhar para o ano de 2019, tem-se um cenário similar: EUA (18,3% das importações oriundas da China); Alemanha (9,57% das importações); e Japão (23,5% das importações) (OEC, [s.d.]).

É provável, como já indicado pela literatura por Jakob e Marschinski (2013), Franzen e Mader (2018) e Grubb *et al.* (2022), que a estratégia comercial dos países se correlacione com as emissões incorporadas, afinal, apesar de não haver um comportamento homogêneo entre grupos, Estados Unidos e China são os maiores emissores e os maiores *traders* globais, coincidindo nas mesmas direções cada. Por fim, ao visitar os dados relacionados às emissões oriundas do processo industrial, percebe-se um comportamento contrastante, condizente com a literatura e com a “balança global de carbono” associada ao comércio internacional. Enquanto os países do BRICS (exceção ao Brasil que se manteve estável), Índia e China, aumentaram substancialmente suas emissões associadas ao processo industrial, bem como tornaram-se grandes exportadores de carbono nos últimos 30 anos, os países do G7 tomaram caminhos opostos, como se pode conferir na Figura 10.

Figura 10 - Alemanha, Estados e Japão evolução das emissões associadas ao processo industrial



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

Ao verificar a evolução das emissões associadas à indústria, percebe-se que mesmo de forma irregular, as emissões nos Estados Unidos reduziram-se nos últimos 30 anos. O país emitia cerca de 600 milhões de toneladas de CO_{2e} associados ao processo industrial em 1990. Esse valor caiu para 567 milhões em 2000, 466 milhões em 2010 e 437 milhões em 2020. A

mesma tendência foi observada nos outros países, todavia, a Alemanha já partiu de um patamar mais baixo. O Japão saiu de um patamar de 262 milhões, em 1990, para 211 milhões em 2010 e 171 milhões em 2020. Já a Alemanha, emitia 156 milhões em 1990, passando para 98 milhões em 2010 e 93 milhões em 2020.

Essa tendência mostra que os países do G7 conseguiram reduzir suas emissões associadas ao processo industrial. É provável que isso reflita o observado na Figura 8, a aceleração do consumo de energia oriunda de fontes renováveis, por parte desses países. Inclusive a Alemanha, que foi o país que mais acelerou a participação de renováveis, também foi o país que mais reduziu as emissões associadas à indústria, de forma relativa, visto que já partia de um patamar menos elevado que seus pares. Ademais, essa tendência também pode mostrar um deslocamento de indústrias mais intensivas em carbono para países com menores regulações socioambientais (Sadik-Zada e Ferrari, 2020), o que pode reforçar a discussão sobre responsabilidades, que perpassa o trabalho. Afinal, o deslocamento da produção, emissão em outro país para consumo interno, via importação, mascara a realidade sobre as emissões, que ainda são geradas pelo consumo, muitas vezes desmedido, de países historicamente favorecidos por processos coloniais e predatórios.

Aliado ao cenário das emissões, tem-se o cenário econômico, que também indica a perda de importância da indústria no PIB dos países do G7 analisados. Segundo dados do Banco Mundial (2023), a indústria representava 34,6% do PIB japonês em 1994, em 2020 esse valor foi de 29,1%. Já para os Estados Unidos, a indústria representava 23,1% do PIB (1997), passando para 17,6% em 2020. A indústria alemã representava 33% do PIB em 1991, passando para 25% em 2020. Ao mesmo tempo, o setor de serviços cresceu nas três economias, representando em 2020: 77,1% do PIB norte-americano; 69,5% do PIB japonês; e 63,7% da economia alemã. Esses dados sugerem uma mudança no perfil das economias desses países, bem como a saída de indústrias tradicionais.

4.1.3. Balanço entre BRICS e G7

Ao contrário de China e Índia, os países do G7 reduziram suas emissões associadas à indústria, ao mesmo tempo que obtiveram, nos últimos 30 anos, o crescimento das importações (de forma absoluta e relativa em relação ao PIB) e o aumento da participação de renováveis em seu consumo final de energia. Em linha com a literatura, esses dados parecem

indicar os *drivers* dos comportamentos das emissões associadas ao comércio internacional. Os resultados podem ensejar discussões relevantes, por exemplo:

- A aceleração do uso de renováveis, em relação ao total de energia consumida, pode significar a falta de democratização de novas tecnologias energéticas;
- O aumento da participação de produtos chineses nas importações dos países do G7, aliado ao crescimento exponencial das emissões industriais, poderiam significar a transferência de externalidades sociais e ambientais da produção, de países desenvolvidos para nações de renda mais baixa;
- Esse aumento da presença de industrial em países como a China e Índia, com alta intensidade de emissões, também pode gerar questionamentos sobre o “valor” desse custo ambiental, se estaria “embutido” em seus produtos exportados.

Nos próximos capítulos, esses indicadores serão de fato testados, com um modelo econométrico para verificação de seus impactos nos dados das emissões líquidas do comércio. Nota-se que, além dos indicadores desenvolvidos e analisados neste capítulo, também serão incluídas variáveis de controle para os testes estatísticos.

4.2 Resultados Econométricos

A partir dos comportamentos já apresentados nas Figuras 1 e 2, nas quais, observou-se o crescimento das emissões líquidas incorporadas ao comércio internacional e os papéis dos países nessa “balança comercial de carbono”. Com isso, realizou-se a regressão com efeitos fixos abaixo para uma maior compreensão dos condicionantes desse comportamento, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Regressão com efeitos fixos, usando-se o método de dados em painel

	<i>Dependent variable:</i>
	carbon_embodied
CleanEnergy_Final_Consumption	-14.712*** (2.608)
gdp_pcp_growth	5.900* (3.387)
Net_Trade_GDP	46.407*** (4.693)
Carbon_industry	0.249*** (0.035)
population_growth	38.682 (25.394)
Observations	186
R ²	0.727
Adjusted R ²	0.712
F Statistic	93.415*** (df = 5; 175)
<i>Note:</i>	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01

Fonte: estimado pelo autor, usando dados do Banco Mundial (2024), Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022) no software *R Studio*.

Nota-se que o modelo apresenta um R^2 alto, explicando acima de 70% das variações das emissões associadas ao comércio internacional. Além disso, conta com significância estatística, logo, pode-se observar correlações estatísticas fortes, a partir dos testes realizados. O número de asteriscos presentes em cada variável representa o nível de significância estatística das variáveis, em relação à correlação com as emissões incorporadas ao comércio internacional — variável investigada. Quanto maior o número de asteriscos, maior é a força da correlação entre as variáveis. Ademais, o sinal (positivo ou negativo) diz respeito ao sentido da correlação, indicando se as variáveis se relacionam de forma diretamente ou inversamente proporcional.

Como já mencionado, o modelo é realizado a partir de uma regressão de dados em painel com efeitos fixos, controlando as variáveis não observadas constantes ao longo do tempo. Os valores numéricos em cada variável representam os coeficientes, que significam a relação entre o aumento de 1 ponto percentual, ou uma unidade, da variável independente e seu impacto na variável dependente (emissões incorporadas ao comércio internacional). Além dos resultados estarem em linha com a literatura, foram realizados testes de multicolinearidade — de forma a investigar a existência de correlação entre as variáveis independentes —, importante pois a alta correlação entre variáveis independentes pode causar viés nos resultados. A partir dos testes, constatou-se que ambas as regressões (com e sem a variável populacional) apresentaram baixa multicolinearidade, valores de referência do teste VIF abaixo de 5.

Ao analisar os resultados em si, percebe-se que, em linha com a literatura, o consumo final de energia oriunda de fontes renováveis (*“CleanEnergy_Final_Consumption”*) apresenta uma correlação forte, da ordem de 1%, bem como uma relação negativa (inversa) com a variável dependente. Com isso, tem-se que o aumento da participação de renováveis no consumo final de energia de um país tende a levar para uma redução das emissões líquidas incorporadas ao comércio internacional para a nação. Destaca-se que, no modelo construído, o aumento de 1% no consumo final de energia oriundo de fontes limpas sugere uma redução de aproximadamente 14 milhões de toneladas de carbono incorporadas ao comércio internacional para o grupo de países analisados. Ademais, os países do BRICS analisados, como já demonstrado no Capítulo 2, reduziram substancialmente a participação de renováveis (com exceção do Brasil), enquanto os países do G7 analisados fizeram o caminho inverso nos

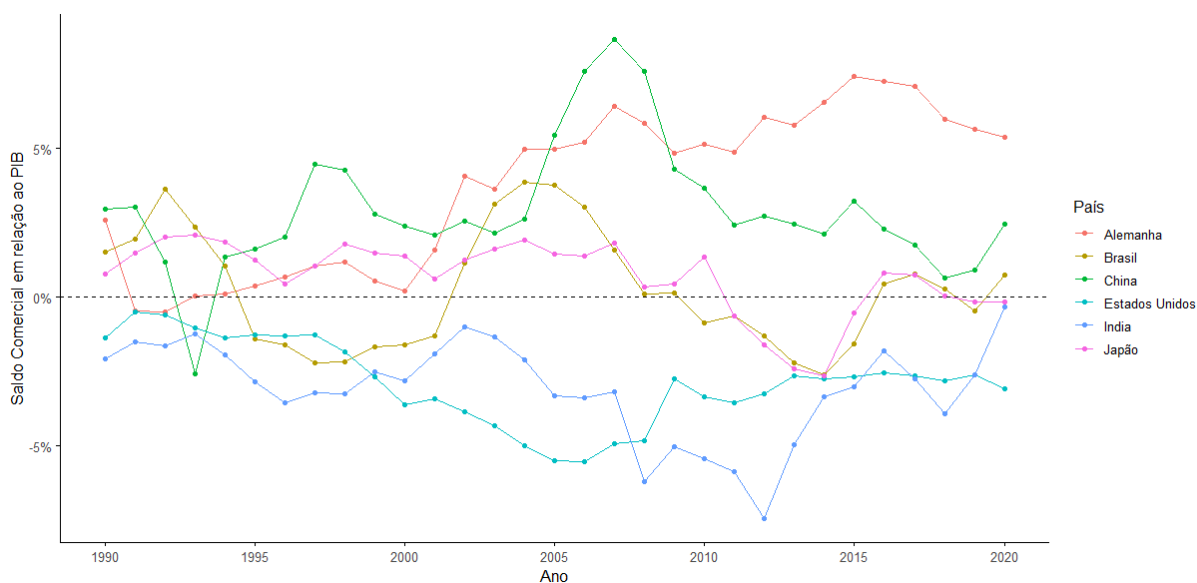
últimos 30 anos — a Alemanha praticamente aumentou em nove vezes, em 30 anos, a participação de renováveis no consumo final, enquanto os Estados Unidos mais que dobraram e o Japão, de forma mais tímida, também seguiu a tendência de aumento. Cabe destacar que a participação de renováveis se refere a termos percentuais e não em termos absolutos na matriz energética. A China, por exemplo, é o país que mais investe em fontes eólica e solar no mundo, mas também segue com alto consumo de carvão mineral (IEA, 2024).

Com esse resultado significativo estatisticamente, em linha com a literatura já apresentada, essa variável corrobora a hipótese, de forma que a mudança no mix energético foi um dos fatores de influência, dentro dos seis países estudados, para os dados de emissões incorporadas ao comércio internacional. Ao mesmo tempo em que países de maior renda aceleraram a representatividade das fontes renováveis em seu consumo final de energia, os países de renda média reduziram esse percentual.

Verifica-se na regressão o efeito dos superávits e déficits comerciais, em relação ao PIB, nas emissões incorporadas ao comércio internacional. Também em linha com a literatura, verifica-se que a relação é forte estatisticamente (com significância em nível de 1%), além de se mostrar uma relação positiva — quanto mais superavitária a balança líquida comercial, em relação ao PIB, espera-se mais emissões líquidas associadas ao comércio. Dentro do modelo, o coeficiente mostra que o incremento de 1% de superávit comercial em relação ao PIB sugere um aumento de 46 milhões de toneladas de carbono incorporado ao comércio, de forma líquida.

O resultado também condiz com a literatura, afinal, diversos autores (Jakob e Marschinski, 2013; Franzen e Mader, 2018; e Grubb *et al.*, 2022) pontuaram sobre o volume comercial, como um dos fatores-chave para as emissões incorporadas ao comércio internacional. Apesar de não haver um comportamento homogêneo entre grupos (BRICS e G7), percebe-se na Figura 11, que os dois países com maior peso nas emissões associadas ao comércio, Estados Unidos e China, possuem grandes déficits e superávits comerciais, respectivamente — com uma evolução nítida desse comportamento ao longo dos últimos 30 anos. O comportamento dos déficits e superávits comerciais, em relação ao PIB de cada país no período de 30 anos, pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Saldo comercial em relação ao PIB dos países analisados



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

As emissões oriundas do processo industrial também possuem correlação forte (com significância em nível de 1%) com as emissões líquidas associadas ao comércio internacional. Ademais, a correlação observada é positiva, de forma que o aumento das emissões associadas à indústria tende a aumentar as emissões líquidas do comércio internacional. O coeficiente aponta que, no modelo aplicado, o aumento de 1 milhão de toneladas de CO₂ oriundos do processo industrial sugere um aumento de 243 mil toneladas de carbono nas emissões incorporadas ao comércio internacional.

O resultado obtido também corrobora a hipótese apresentada, afinal, a existência de efeito indica que o aumento das emissões associadas à indústria — de forma exponencial na China e de forma robusta na Índia —, contribuíram para o comportamento “exportador” de emissões, apresentado pelos países do BRICS analisados. Da mesma forma, a queda considerável nas emissões dos países do G7 analisados contribuíram para o comportamento “importador” de emissões das nações. Nota-se que o contraste nos dados da variável foi discutido nas Figuras 7 e 10 (Capítulo 2), que mostram claramente um comportamento contrastante entre os países dos dois blocos.

Seguindo com os testes, percebe-se que o crescimento populacional não apresentou correlação estatisticamente significativa com os dados de emissões incorporadas ao comércio internacional. Apesar de ser um *driver* importante no aumento das emissões dos países na contabilidade territorial, conforme demonstrado por Wang *et al.* (2017), nota-se que ao analisar as emissões incorporadas ao comércio nos seis países estudados, essa correlação estatística não se replica. O aumento populacional, mais acelerado nos países do BRICS, nos últimos 30 anos, não produziu efeitos significativos no crescimento das emissões associadas ao comércio nesses países. Ao mesmo tempo, a estagnação populacional nos países do G7 analisados (com exceção dos Estados Unidos) não se correlacionou com a redução das emissões líquidas incorporadas ao comércio entre 1990 e 2020.

Por fim, ao discorrer sobre as questões de renda, percebe-se a existência de uma correlação fraca (com significância em nível de 10%) entre o crescimento do PIB *per capita*, métrica amplamente utilizada para avaliar o nível de renda dos países. Devido a isso, buscou-se a realização de uma nova regressão, retirando a variável populacional — que também não apresentou significância relevante —, de forma a verificar se haveria alguma alteração na correlação entre a variável dependente e o crescimento de renda dos países analisados (Tabela 2).

Tabela 2 - Regressão com efeitos fixos, sem a variável populacional, usando-se o método de dados em painel

	<i>Dependent variable:</i>
	carbon_embodied
CleanEnergy_Final_Consumption	-14.168*** (2.593)
gdp_pcp_growth	5.823* (3.399)
Net_Trade_GDP	46.502*** (4.710)
Carbon_industry	0.243*** (0.034)
Observations	186
R ²	0.724
Adjusted R ²	0.710
F Statistic	115.323*** (df = 4; 176)
<i>Note:</i>	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01

Fonte: estimado pelo autor, usando dados do Banco Mundial (2024), Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022) no software *R Studio*.

A segunda análise (Tabela 2), com a exclusão da variável populacional, apresenta significância estatística e pouquíssima alteração no poder explicativo (R^2 mantém-se praticamente estável). Ademais, não há alteração no grau de correlação da variável de renda com as emissões incorporadas ao comércio internacional — mantendo-se uma correlação fraca (significância a nível de 10%) e positiva. Logo, a variável de renda apresenta uma correlação fraca entre com as emissões incorporadas ao comércio internacional — não se obteve o grau esperado de correlação entre aumento de renda e o aumento das emissões líquidas associadas ao comércio internacional — a associação teve o sentido esperado, entretanto, não a relevância esperada, em virtude disso, o resultado não corrobora com a hipótese apresentada. Ademais, a segunda regressão também reforça os achados de que a variável populacional não possui efeito nas emissões analisadas dos seis países estudados.

Dado os resultados acima, é possível confirmar a hipótese inicial, descrita na Introdução (Capítulo 1). Apesar da variável de renda apresentar uma correlação fraca, as outras variáveis do modelo mostraram-se com poder explicativo para as emissões incorporadas ao comércio internacional. Os achados levantam diversas discussões acerca das responsabilidades de emissões. A necessidade de atender a uma demanda global por produtos industriais levou países emergentes, como China e Índia, a assentarem seu acelerado processo de industrialização em fontes fósseis, como o carvão. A partir de uma regressão linear simples, utilizando os dados coletados, verifica-se que o aumento do consumo de carvão na China correlacionou-se, com um R^2 de 0,979 e significância em nível de 1%, com o aumento do consumo energético *per capita* no país.

A redução na participação de renováveis e seu impacto estatístico nas emissões incorporadas ao comércio pode suscitar o debate sobre as externalidades geradas pelo processo de desenvolvimento, com importante ênfase em exportações no caso chinês, e o custo-benefício disso em relação à discussão climática global, mas também em relação à qualidade do ar local, a destruição de ecossistemas e contaminação de fontes hídricas. É notório que China e Índia, entre 1990 e 2020, aumentaram seus indicadores sociais e de renda, mas será que o modelo de desenvolvimento empreendido, atendendo uma demanda externa, internalizou os custos ambientais e de recursos naturais? Os resultados em relação aos superávits comerciais também corroboram o raciocínio acima, afinal, quanto maiores superávits, mais o país tende a se aproximar de um comportamento exportador de emissões. Logo, as externalidades negativas do processo de desenvolvimento, baseado em fósseis, ficam no território nacional e afetam o clima global, mas são oriundos de um processo que atende a uma demanda externa.

4.3 Considerações sobre a mitigação de emissões no comércio internacional

Com o diagnóstico posto, percebe-se claramente que para a efetiva mitigação das emissões incorporadas ao comércio internacional, faz-se necessário o aumento dos investimentos em eficiência energética e em energia limpa, principalmente nos países que são o centro da indústria mundial. Ainda, há evidências que sugerem as emissões associadas ao processo industrial como uma das causas das emissões incorporadas ao comércio, de forma a

corroborar com Sadik-Zada e Ferrari (2020), em seus achados empíricos sobre o deslocamento de indústrias para países com menor grau de regulações ambientais.

Sabe-se que a China, principal país manufatureiro do mundo nas últimas décadas, aumentou suas regulações ambientais contra poluentes e atualmente é o país que mais investe em energia limpa (IEA, 2024). Com isso, é possível que ocorra um novo possível deslocamento de indústrias energo e carbono-intensivas para países que possuem regulações fracas e que aceleram seus processos de industrialização. Camboja, Bangladesh e Índia, por exemplo, apresentam uma aceleração no crescimento do PIB, ao mesmo tempo que constam entre as últimas posições no Índice de Performance Ambiental (Yale University, 2024) (Banco Mundial, 2025).

Com a possibilidade de um novo deslocamento, com o aumento de regulações ambientais na China, faz-se necessário pensar em alternativas para evitar esse tipo de “vazamento” de carbono. Com as dificuldades de coordenação de um mercado de carbono global, em virtude das dificuldades decisórias da UNFCCC e dos organismos multilaterais, a criação de “Carbon Taxes” e “Ajustes Fronteiriços de Carbono” por grandes regiões consumidoras globais, como os Estados Unidos, União Europeia, China, Brasil, Índia e Japão poderia pressionar os setores a não só deslocarem suas produções, mas de fato empreenderem um grande esforço para mitigação e descarbonização de suas cadeias produtivas.

Destaca-se que a União Europeia já possui um mecanismo de ajuste fronteiriço de carbono, o “Carbon Border Adjustment Mechanism”, instituído em 2023, com previsão de completa eficácia da norma em 2026. O mecanismo visa nivelar o preço das emissões de carbono da produção interna europeia com as importações. O objetivo explícito no documento guia da legislação é: “O mecanismo de ajuste fronteiriço reduz o risco dos objetivos climáticos da União Europeia serem minados pela realocação da produção para países com políticas de descarbonização menos ambiciosas” (Comissão Europeia, 2023, p.5). Nota-se que o mecanismo pode se amparar nas exceções gerais, presentes no Artigo XX (b) do Acordo Geral sobre Tarifas Aduaneiras e Comércio (GATT), em que são excetuadas medidas que violam o acordo, como tarifas: “necessárias à proteção da saúde e da vida das pessoas e dos animais, e à preservação dos vegetais” (GATT, 1947, p.30). Segundo a própria Comissão

Europeia, o CBAM é desenhado de forma adequada às regras da Organização Mundial do Comércio (OMC).

Ao mesmo tempo, em caso de não coordenação entre os grandes consumidores globais, essas taxas poderiam ser utilizadas como medidas protecionistas, disfarçadas de regulações ambientais, violando inclusive as regras da OMC — as recentes reuniões do G20, com o aumento do peso das discussões climáticas dentro do fórum “informal”, poderiam se tornar uma das instâncias de coordenação desse tipo de medida.

Segundo Celso Amorim, ex-chanceler e atual Assessor Especial do Presidente da República brasileiro:

O embrião da nova governança mundial é o G20, porque é um órgão que reúne representatividade com efetividade, porque é um número manejável de países (...) e ao mesmo tempo é um órgão que tem latino-americanos, tem poucos africanos, acho que tinha que ter mais um ou dois para ficar bem representativo, tem europeus (...) (Amorim, 2024)

A adoção de um “*Carbon Tax*” coordenado ensejaria também o debate sobre a aplicação desses recursos, visto que a taxa não seria uma medida meramente nacional, com um acordo e arranjo transnacional. O caminho mais óbvio seria destiná-la para medidas de descarbonização e mitigação climática na produção, todavia, a aplicação dos recursos seria, certamente, um entrave ainda distante, afinal, a concepção de um arranjo multi-level e multinacional já representa, por si só, um enorme desafio.

Além disso, outra alternativa para que o deslocamento citado não aconteça é a flexibilização e transferência de propriedades intelectuais de tecnologias energéticas limpas para países do Sul Global. Sabe-se que tecnologias fundamentais para a transição energética, como baterias de lítio, painéis solares e turbinas eólicas, ainda não são amplamente difundidas no mundo — que continua com a prevalência do uso de energias fósseis, como o carvão. Historicamente, países de alta renda são os principais responsáveis pelo estoque de carbono na atmosfera, a transferência de tecnologias limpas seria uma medida em linha com o conceito de responsabilidades comuns, porém diferenciadas — princípio fundador da Convenção do Clima e fundamental para a mitigação climática. Outro ponto importante da difusão tecnológica para geração de energia livre de carbono seria o potencial ganho de

escala, visto que mais empresas estariam no mercado, com mais competição, trazendo uma potencial redução de custo.

Essa difusão pode resultar em cooperações ganha-ganha entre países, empresas e universidades, de forma a fomentar as cadeias tecnológicas de energia limpa entre os países. Além disso, iniciativas como essa podem envolver não só os países do Norte Global. Essas transferências podem ser realizadas a partir de uma cooperação Sul-Sul, visto que a China apresenta um papel de destaque na produção científica e nas patentes de “tecnologias disruptivas” (Islam, 2025).

A democratização de propriedades intelectuais de tecnologias limpas, aliada a uma pressão, por parte da demanda de grandes compradores globais, poderia reduzir substancialmente as emissões incorporadas ao comércio internacional. Nota-se que esse tipo de emissão ainda enfrenta desafios complexos, como a navegação e a aviação internacional, principalmente em países ilhas (altamente dependentes desse tipo de transporte de mercadorias). Ainda assim, essas duas medidas teriam um grande peso na descarbonização do comércio entre países, de forma a auxiliar no enfrentamento às mudanças climáticas e na transição energética para um modelo econômico menos dependente de combustíveis fósseis.

Além disso, há um aspecto fundamental mais profundo, que é a mudança do próprio paradigma de desenvolvimento global. A queima de combustíveis fósseis, a industrialização desmedida e o avanço da mineração estão na base do desenvolvimento econômico de diversos países. A maioria dos países emergentes tem buscado, nesses processos, formas de atender suas demandas por empregos, salários e bem-estar social, espelhando os países de alta renda, em seu processo de desenvolvimento no século XIX e XX. Todavia, como já demonstrado nesse trabalho e em vasta literatura, o esgotamento de recursos naturais, a degradação ambiental e o enorme estoque de carbono na atmosfera obrigam, de forma cada vez mais urgente, todos os países a repensarem o cerne de seu modelo de desenvolvimento.

Nesse sentido, uma mudança de paradigma é ainda mais difícil do que substituir plantas industriais a gás natural por plantas industriais com captura de carbono, entre outros desafios de mitigação em setores complexos, como navegação, transporte de carga pesada, indústria de cimento, ferro e aço (Davis et al., 2018). Repensar, de forma sistêmica — com medidas amplas e transnacionais e não apenas com reflexões individuais —, o consumo

desenfreado, o “comprar por estar barato”, o alto consumo de proteína animal e a obsolescência programada são abordagens cruciais para um repensar sistêmico do modelo econômico atual.

De forma mais concreta e menos subjetiva, tem-se o exemplo brasileiro de novo programa de desenvolvimento, “Nova Indústria Brasil” (NIB), que prevê políticas baseadas em missões para um processo de “neoindustrialização”, tendo uma das missões a de “descarbonização e transição e segurança energética”. Destaca-se que o programa ainda não empreendeu grandes iniciativas, sendo lançado em 2024, todavia, de forma principiológica demonstra uma iniciativa, com potencial de replicação. O Plano estipula metas, como por exemplo ampliação da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes; a promoção de novas fontes de energias (por exemplo: combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs), diesel verde e hidrogênio); e a previsão da descarbonização da indústria de base — cimento, aço e química (Brasil, 2024).

Como visto nas análises de dados, em todo o trabalho, a disseminação de “ajustes fronteiriços de carbono”, similares ao da União Europeia (UE), em grandes regiões consumidoras globais poderia gerar uma vantagem comparativa para o Brasil. A redução das emissões associadas ao processo industrial, alta participação em energias renováveis na matriz elétrica e energética, poderiam conferir ao Brasil uma atratividade para a instalação de indústrias, afinal, a produção interna dificilmente seria taxada em mecanismos como esse (a intensidade de carbono brasileira, como já citada, é a menor dentre os países analisados). Aliar essas valências, resultantes do processo histórico brasileiro, com medidas estruturantes, como o NIB, podem posicionar o Brasil em uma posição de proeminência nas disputas por mercados e tecnologias verdes.

Além disso, medidas como a “Nova Indústria Brasil”, que coloquem a indústria menos intensiva em carbono e a promoção de novas tecnologias energéticas no centro do processo de desenvolvimento, representam uma mudança nos planos de desenvolvimento, o que pode ser uma das respostas para a mitigação das emissões dentro do comércio internacional e das cadeias produtivas globais.

5. Conclusões

A pesquisa endereçou uma lacuna na literatura, do entendimento das condicionantes das emissões incorporadas ao comércio internacional, com um recorte geopolítico, contrapondo países de renda média e países de renda alta. O estudo contribui para a compreensão da complexidade das dinâmicas do carbono no comércio internacional, a identificação de variáveis que auxiliam na compreensão dos fluxos, e os diferentes caminhos seguidos por países de renda média e alta, sintetizados pelos países do BRICS e do G7.

A partir da literatura revisada e dos testes econométricos efetuados, é possível concluir que a existência de desigualdades históricas entre países contribuiu para o cenário das emissões incorporadas ao comércio internacional. Com base no efeito atribuído às emissões industriais e no perfil da matriz energética, à luz dos dados utilizados e da literatura analisada, percebe-se que devido à industrialização tardia nos países do BRICS analisados e a mudança na estrutura econômica de países do Norte Global (crescimento do setor de serviços e da economia do conhecimento), o cenário apresentado foi condicionado.

Este cenário, utilizado de forma complementar ao cenário global de emissões, via contabilidade territorial, evidencia a necessidade de uma divisão de responsabilidades nas emissões associadas ao comércio internacional. Os países mais ricos já têm suas responsabilidades delimitadas nos princípios da Convenção do Clima, e o cenário de desequilíbrio apresentado pode ser mitigado com o incremento da cooperação, do multilateralismo, de transferências de tecnologias e de financiamento climático, com objetivo de tornar novas tecnologias energéticas e industriais competitivas e acessíveis a todos. Medidas como essas evitarão que, em uma nova reconfiguração do comércio global no mundo cada vez mais multipolar, empresas utilizem a falta de regulações dos “novos emergentes” para poluir e exportar, o que atrasaria ainda mais os objetivos tão necessários de redução de emissões.

Os resultados observados no trabalho apontam que a aceleração da expansão de renováveis nos países do Norte Global nos 30 anos analisados, bem como, a redução do percentual de renováveis na China e na Índia podem significar dois cenários: o processo de industrialização citado acima foi assentado por fósseis, ao mesmo tempo que isso pode

significar que entre 1990 e 2010, as tecnologias limpas estavam concentradas principalmente nos países de alta renda, no entanto, essa situação tem se alterado rapidamente. A China, por exemplo, teve uma rápida expansão de renováveis nos últimos anos, tanto em capacidade instalada, quanto na exportação de equipamentos relacionados, como painéis fotovoltaicos. Nota-se que o Brasil é uma exceção, dentro do grupo de três países analisados para os BRICS, embora com desafios no setor energético e de transportes, o principal driver das emissões brasileiras é o desmatamento, agropecuária e a mudança no uso do solo.

Esse novo cenário global que vai se desenhando, com a China, um país do sul global, figurando na fronteira tecnológica de questões críticas para a transição energética, como minerais raros, baterias de lítio, painéis solares, turbinas eólicas e carros elétricos, abre uma janela de oportunidade para países emergentes, principalmente via cooperação Sul-Sul. Os investimentos chineses no continente africano e sul-americano denotam uma nova era das relações internacionais, que pode ser decisiva para os países emergentes alcançarem suas metas climáticas e sociais.

Aliado aos cenários acima, tem-se a correlação forte entre a demanda comercial e as emissões incorporadas ao comércio internacional, com a China figurando com grandes superávits e os Estados Unidos, com grandes déficits comerciais, replicando seus respectivos comportamentos comerciais nas balanças de carbono. Esse resultado reflete a estrutura produtiva apresentada, com um provável deslocamento de plantas industriais, mas ainda com o objetivo de atender a uma demanda externa.

Apesar das limitações metodológicas, apontadas em capítulos anteriores, foi possível confirmar a hipótese, com auxílio de metodologia quantitativa e de literatura técnico-científica. Ademais, foram apresentadas reflexões e considerações finais quanto à mitigação das emissões incorporadas ao comércio internacional. Com o objetivo de endereçar o problema das emissões incorporadas ao comércio internacional, foram trazidas discussões a respeito de conceitos e políticas modernas, como “taxas de carbono”, “ajustes fronteiriços” e a própria necessidade de uma maior utilização da contabilidade baseada no consumo, de forma complementar, para a mitigação climática ser melhor coordenada.

Em termos de trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do escopo de países analisados e a repetição da metodologia quantitativa, assim como a utilização de padrões de resultados mais refinados, como a “correção por erros robustos”. Futuras pesquisas também poderiam buscar entender os pormenores dos países analisados. Como o escopo do trabalho foi global, fica prejudicada uma análise de peculiaridades de cada país, em relação às emissões. Estudos de caso sobre o perfil das emissões brasileiras, a partir do ajuste da contabilidade baseada no consumo, replicando o estudo de Steininger *et al.* (2018) sobre a Áustria, podem ser valiosos para a criação de políticas nacionais, relacionadas à mitigação das emissões associadas ao comércio internacional. Além disso, a utilização de outras metodologias econométricas, como “*Dif-in-dif*”, podem estimar o impacto de intervenções nos dados das emissões incorporadas ao comércio internacional. Entender como o *Green Deal* europeu, ou como o *Inflation Reduction Act* norte-americano impactaram o comportamento das emissões nos países. Futuramente, metodologias como essa podem se debruçar também sobre o Programa “Nova Indústria Brasil” e se ele, de fato, impactou nas emissões brasileiras associadas ao comércio transnacional.

Por fim, o trabalho demonstra a necessidade, cada vez mais urgente, de uma transição energética global para uma economia de baixo carbono, mas que observe também as discrepâncias envolvidas nos fluxos de carbono associados ao comércio internacional. Também demonstra a urgência de decisões efetivas, dentro de um sistema multilateral, que considere a justiça e as responsabilidades diferenciadas em seu cerne, afinal, sem um sistema de diálogo e baseado em regras, a tendência é que a “lei do mais forte” se sobreponha, dificultando a superação de desigualdades econômicas, sociais e ambientais. O aumento do unilateralismo e o pouco apreço pela ordem internacional, visões de mundo que emergiram na última década, aumentam os riscos para o enfrentamento às mudanças climáticas. A defesa dos valores cooperativos, como uma solução para o desenvolvimento, tendem a auxiliar o respeito aos consensos já estabelecidos, como a necessidade de limitar o aumento de temperatura terrestre.

De forma mais ampla, o trabalho demonstra que é imprescindível uma mudança no processo de desenvolvimento, de forma sistêmica, que não pode mais estar assentado em fósseis, ignorando as questões ambientais e climáticas, como foi a regra durante os séculos XIX e XX, e que ainda tem permanecido no XXI. Essa transição para uma economia de baixo

carbono não pode ser dissociada da reforma do sistema multilateral, que hoje reflete desequilíbrios históricos de poder e decisões descoladas das realidades do Sul Global. Faz-se necessária a promoção de uma nova arquitetura de cooperação internacional, capaz de articular ações coordenadas em clima, comércio, financiamento e tecnologia, tendo como base princípios de equidade, solidariedade e corresponsabilidade. A construção dessa nova governança requer não apenas compromissos políticos, mas também mudanças profundas na forma como concebemos o desenvolvimento, o consumo e a nossa relação com as próximas gerações.

Referências

ACORDO GERAL SOBRE TARIFAS ADUANEIRAS E COMÉRCIO 1947. (**GATT 47**). [S. l.]: [s. n.], 1947. Disponível em:

https://www.gov.br/siscomex/pt-br/arquivos-e-imagens/2021/05/omc_gatt47.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). 2022. **Fluxos financeiros de energia renovável**. Disponível em:

<https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Finance-and-Investment/Renewable-Energy-finance-Flows>. Acesso em: 01 jun. 2024.

AMORIM, Celso. **G20: “O Brasil vê necessidade de uma nova governança global”, diz Celso Amorim**. UOL, Youtube. 2 ago. 2024. 59 segundos. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=SXagZSL9oyQ>. Acesso em: 20. abr. 2025.

BANCO MUNDIAL. **Uma nova era de desenvolvimento**. Washington, DC: Banco Mundial, 2023. 202 p.

BANCO MUNDIAL. **Worldwide Governance Indicators Database**. Washington, D.C.: Banco Mundial, 2024. Disponível em:

<https://databank.worldbank.org/source/worldwide-governance-indicators>. Acesso em: 04 fev 2025.

BANCO MUNDIAL. 2024. **PIB (PPA do mercado cambial)**. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BANCO MUNDIAL. **Trade (% of GDP)**. 2023. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/NE.TRD.GNFS.ZS?end=2023&start=1990>. Acesso em: 08 set. 2024.

BANCO MUNDIAL. **Serviços, valor adicionado (% do PIB)**. 2025. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TOTL.ZS?locations=US-DE-JP-BR-CN-IN>. Acesso em: 26 jun. 2025.

BANCO MUNDIAL. 2022. **Population estimates and projections**. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/source/population-estimates-and-projections>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BRASIL. **Nova Indústria Brasil: forte, transformadora e sustentável: Plano de Ação para a Neointustrialização 2024-2026**. Edição atualizada. Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://dhg1h5j42swfq.cloudfront.net/2025/03/24095825/doc-sf248986727199-20240830_org_anized.pdf. Acesso em: 12 mai. 2025.

BRASIL. **História do BRICS**. Brasília, DF: [Presidência da República], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/agenda-internacional/missoes-internacionais/cupulas-do-brics/reuniao-do-brics-2023/historia-do-brics>. Acesso em: 18 jun. 2025.

BRICS POLICY CENTER. **New Development Bank**. Rio de Janeiro: BRICS Policy Center, 2018. Disponível em: <https://bricspolicycenter.org/new-development-bank/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

CLIMATE WATCH DATA. World Resources Institute. 2021. 21 jun. 2024. **Emissões de gases de efeito estufa por setor**. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&end_year=2021&start_year=1990. Acesso em: 10 jun. 2024.

COPELAND, B. R.; TAYLOR, M. S. **Trade, Growth, and the Environment**. Journal of Economic Literature, v. 62, p.7-71, 2004.

COPERNICUS: 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level. In: **Copernicus Climate Change Service (C3S)**. [S. l.]: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), 10 jan. 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 15 jun. 2025.

CRIPPA, M. *et al.* **GHG emissions of all world countries**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. Disponível em: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/GHG_emissions_of_all_world_countries_booklet_2024report.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

DAVIS, S. J. et al. **Net-zero emissions energy systems**. Science, v. 360, n. 6396, p. eaas 9793, 29 jun. 2018.

DIFFENBAUGH, N. S. et al. **Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 114, n. 19, p. 4881–4886, 9 maio 2017.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 04 jul. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: síntese 2025**. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2025. 1 arquivo PDF. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Taxation and Customs Union. **Guidance document on CBAM implementation for importers of goods into the EU**. Brussels: European Commission, 2023. 1 PDF. Disponível em: https://taxation-customs.ec.europa.eu/document/download/bc15e68d-566d-4419-88ec-b8f5c6823eb2_en?filename=TAXUD-2023-01189-01-00-EN-ORI-00.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

FEDERAL RESEARCH DIVISION. **Soviet Union: a country study**. Washington, D.C.: Library of Congress, 1994.

FRANZEN, A.; MADER, S. **Consumption-based versus production-based accounting of CO2 emissions: Is there evidence for carbon leakage?** Environmental Science & Policy, v. 84, p. 34–40, jun. 2018.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre; O'SULLIVAN, Michael; JONES, Matthew W.; ANDREW, Robbie M.; GREGOR, Luke; HAUCK, Judith; QUÉRÉ, Corinne Le; LUIJKX, Ingrid T.; OLSEN, Are; PETERS, Glen P. **Global Carbon Budget 2022**. Earth System Science Data, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 4811-4900, 11 nov. 2022. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.

G7 ITALY. **About G7**. 2025. Disponível em: <https://www.g7italy.it/en/about-g7/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

GLOBAL CARBON PROJECT. **Global Carbon Budget 2023** – with major processing by Our World in Data. Fossil fuels and industry – GCB [dataset]. Disponível em: https://ourworldindata.org/grapher/co2-emissions-fossil-land?country=~OWID_WRL. Acesso em: 07 jun. 2024.

GRUBB, Michael *et al.* **Carbon Leakage, Consumption, and Trade**. *Annual Review Of Environment And Resources*, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 753-795, 17 out. 2022. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-120820-053625>.

HSIAO, Cheng (2005), **Why Panel Data?** The Singapore Economic Review VOL. 50, NO. 02.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Coal Information - Overview**. Paris: IEA, [ano da última atualização ou do acesso]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/coal-information-overview/consumption>. Acesso em: 15 abr. 2025.

IEA (International Energy Agency). China. In: IEA (International Energy Agency). **World Energy Investment 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024/china>. Acesso em: 01 mai. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 07 mar. 2025.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **TerraBrasilis**. [S. l.]: INPE, c2024. Disponível em: https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates. Acesso em: 08 abr. 2025.

IPCC. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Chapter 1, Introduction to national GHG inventories**. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 09 out. 2024.

IRENA. **Global Landscape of Renewable Energy Finance 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>. Acesso em: 19 mai. 2024.

ISLAM, Faisal. **UK will not be able to resist China's tech dominance**. BBC News, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/articles/c0rq0vyd549o>. Acesso em: 01 mai. 2025.

JAKOB, Michael; MARSCHINSKI, Robert. **Interpreting trade-related CO₂ emission transfers**. *Nature Climate Change*, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 19-23, 23 set. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1630>.

KIM, T.-J.; TROMP, N. **Carbon emissions embodied in China-Brazil trade: Trends and driving factors**. *Journal of Cleaner Production*, v. 293, p. 126206, abr. 2021.

LE QUÉRE, Corinne; ROELICH, Katy; LENZEN, Manfred; SCOTT, Kate; PETERS, Glen; BARRET, John; WIEDMANN, Thomas. **Consumption-based GHG emission accounting: a UK case study**. *Climate Policy*, v. 13, n. 4, p. 451-470, 2013. DOI: 10.1080/14693062.2013.788858.

LE QUÉRE, Corinne; KORSBAKKEN, J.I.; WILSON, C. *et.al.* **Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies**. *Nature Climate Change*, v. 9, 213-217 (2019).

MESQUITA, Rafael; FERNANDES, Antônio Alves Torres; FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto. **Uma introdução à regressão com dados em painel**. *Política Hoje*, v. 29, n. 1, 2020.

MUNKSGAARD, Jesper; PEDERSEN, Klaus Alsted. **CO₂ accounts for open economies: producer or consumer responsibility?** *Energy Policy*, v. 29, n. 4, p. 327-334, 2001.

NAÇÕES UNIDAS. **Mundo tem 66% de chance de superar marca de 1,5°C de aquecimento em cinco anos, alerta ONU**. ONU News, 17 maio 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/05/1814502>. Acesso em: 12 out. 2024.

NAÇÕES UNIDAS. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Nova Iorque, 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2024.

OUR WORLD IN DATA. **Energy intensity**. 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-intensity?time=2020>. Acesso em: 20 mai. 2025.

OUR WORLD IN DATA. **Manufacturing value added to GDP**. Oxford: Our World in Data, 2025. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/manufacturing-value-added-to-gdp?tab=chart&country=CHN~BRA&mapSelect=CHN~BRA>. Acesso em: 18 fev. 2025.

OUR WORLD IN DATA. **Cumulative CO₂ emissions – GCB. Global Carbon Project. 2023**. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-co-emissions>. Acesso em: 4 nov. 2024.

PETERS, Glen P. **From production-based to consumption-based national emission inventories**. Ecological Economics, v. 65, n. 1, p. 13–23, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.10.014>. Acesso em: 08 mai. 2024.

PETERS, G. P., DAVIS, S. J., and ANDREW, R.: **A synthesis of carbon in international trade**, Biogeosciences, 9, 3247–3276, <https://doi.org/10.5194/bg-9-3247-2012>, 2012.

PETERS, Glen P.; MINX, Jan C.; WEBER, Christopher L. *et.al.* **Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008**. Proceedings Of The National Academy Of Sciences (Pnas), Cambridge, Massachusetts, v. 108, n. 21, p. 8903-8908, 25 abr. 2011.

SADIK-ZADA, E. R.; FERRARI, M. **Environmental Policy Stringency, Technical Progress and Pollution Haven Hypothesis**. Sustainability, v. 12, n. 9, p. 3880, 9 de maio de 2020.

SCHULTE, Simon; JAKOBS, Arthur; PAULIUK, Stefan. **Estimating the uncertainty of the greenhouse gas emission accounts in global multi-regional input–output analysis**. *Earth System Science Data*, v. 16, p. 2669–2700, 2024. DOI: 10.5194/essd-16-2669-2024. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/16/2669/2024/>. Acesso em: 12 out. 2024.

STEININGER, K. W. et al. **Austria’s consumption-based greenhouse gas emissions: Identifying sectoral sources and destinations**. Global Environmental Change, v. 48, p. 226–242, jan. 2018.

STRAPASSON, A. et al. **Modelling carbon mitigation pathways by 2050: Insights from the Global Calculator**. Energy Strategy Reviews, v. 29, p. 100494, maio de 2020.

THE OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY. **The Observatory of Economic Complexity**. [Cambridge, MA]: OEC, [s.d.]. Disponível em: <https://oec.world/en>. Acesso em: 10 mar. 2025.

UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. A Carta da Terra. **Pensamento & Realidade**, São Paulo, v. 11, 2002. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/pensamentorealidade/article/view/8497/>. Acesso em: 05 ago. 2024.

UNFCCC. **Introduction to mitigation**. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change, [s.d.]. Disponível em: <https://unfccc.int/topics/introduction-to-mitigation>. Acesso em: 26 jun. 2025.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **First global stocktake**. Emirados Árabes Unidos: UNFCCC, 2023. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/FCCC_PA_CMA_2023_L.17_Adv.pdf. Acesso em: 20 mai. 2025.

U.S. CENSUS BUREAU. **Foreign trade: balance of payments basis**. Disponível em: <https://www.census.gov/foreign-trade/balance/c5700.html>. Acesso em: 07 set. 2024.

YALE UNIVERSITY. **2024 Environmental Performance Index**. [New Haven, CT]: Yale University, c2025. Disponível em: <https://epi.yale.edu/measure/2024/EPI>. Acesso em: 28 abr. 2025.

WANG, Shaojian; LI, Guangdong; FANG, Chuanglin. **Urbanization, economic growth, energy consumption, and CO2 emissions: Empirical evidence from countries with different income levels**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 2144-2159, 2018.

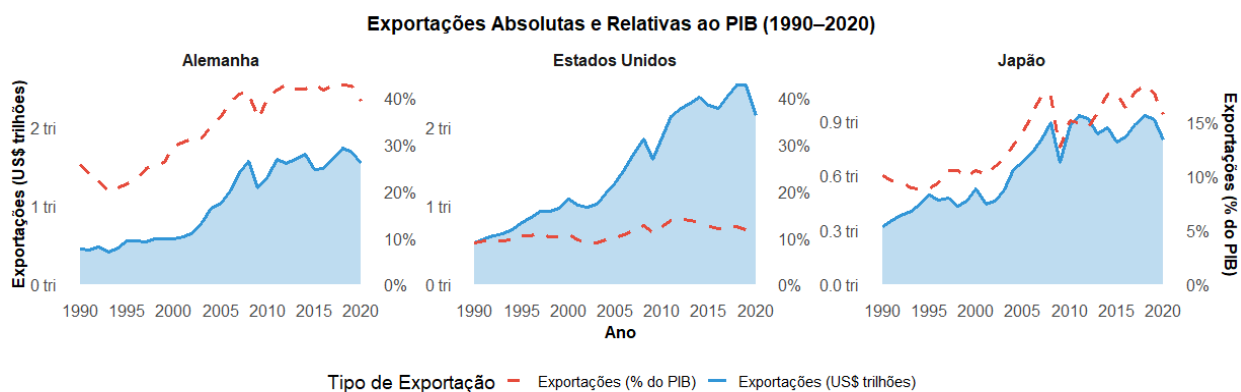
WORLD BANK. **GDP growth (annual %)**. [S. l.]: World Bank, c2025. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2023&locations=IN-CN-BD-KH&start=1990>. Acesso em: 14 abr. 2025.

WORLD BANK. **Manufacturing, value added (% of GDP) - Brazil**: data. Washington, D.C.: World Bank, 2023. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?end=2023&locations=BR&start=1960>. Acesso em: 23 jun. 2025.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. Introdução à econometria: uma abordagem moderna. Tradução de Maria José Cyhlar Monteiro. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

YERGIN, Daniel. **O novo mapa: energia, clima e o conflito de nações**. Tradução de Francisco Araújo da Costa. Porto Alegre: Bookman, 2023.

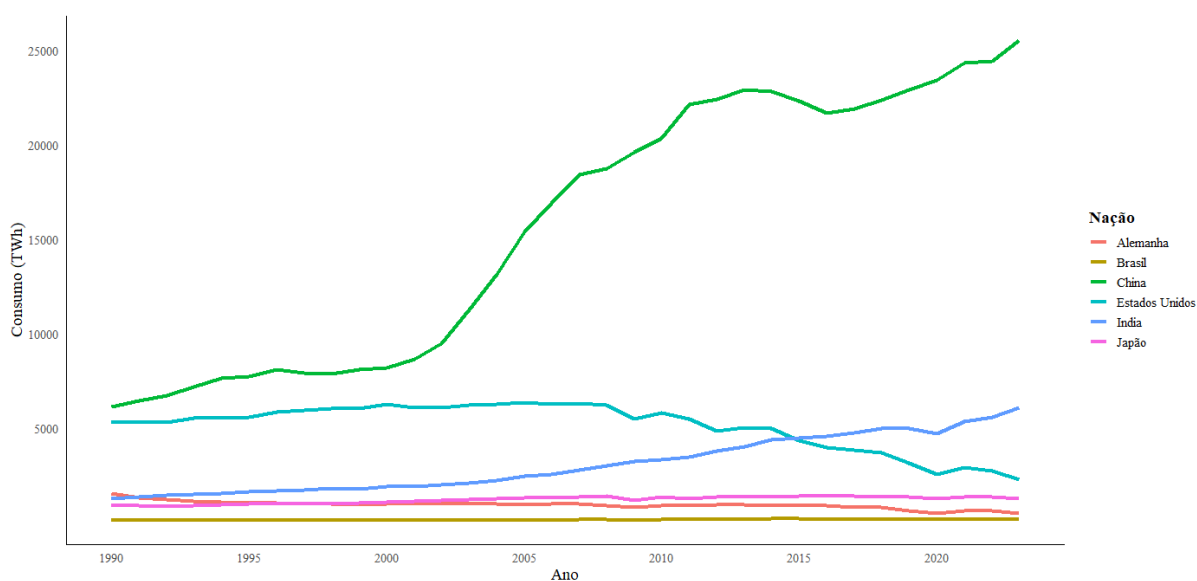
APÊNDICE A - Gráfico evolução das exportações nos países do G7



Fonte: Banco Mundial

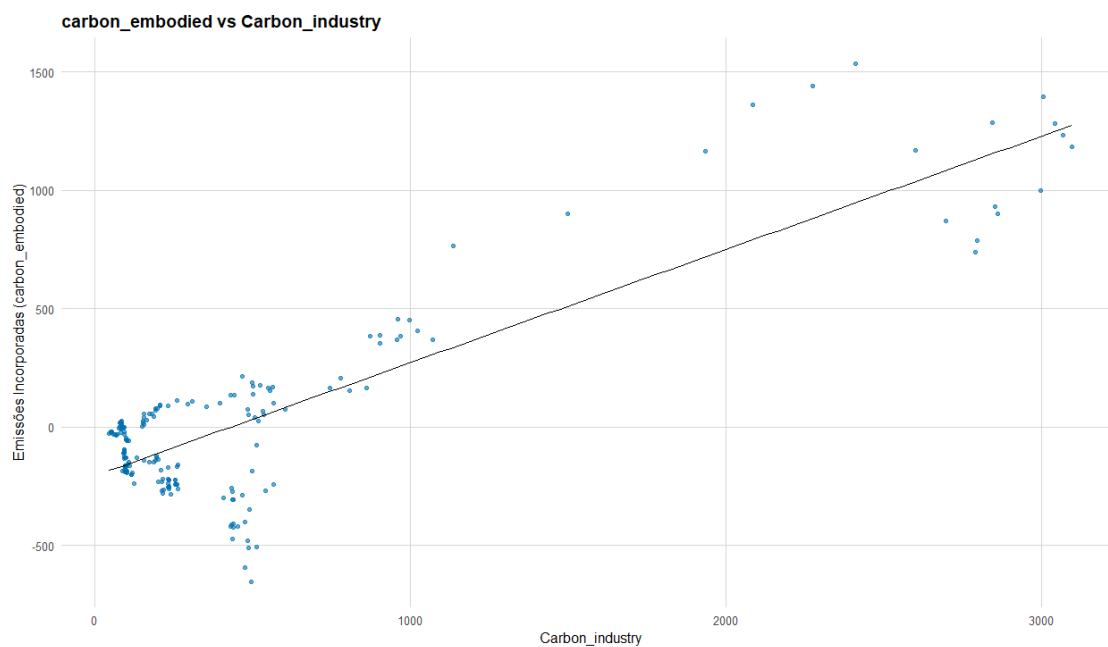
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024).

APÊNDICE B - Consumo de Carvão ao longo do Tempo por País



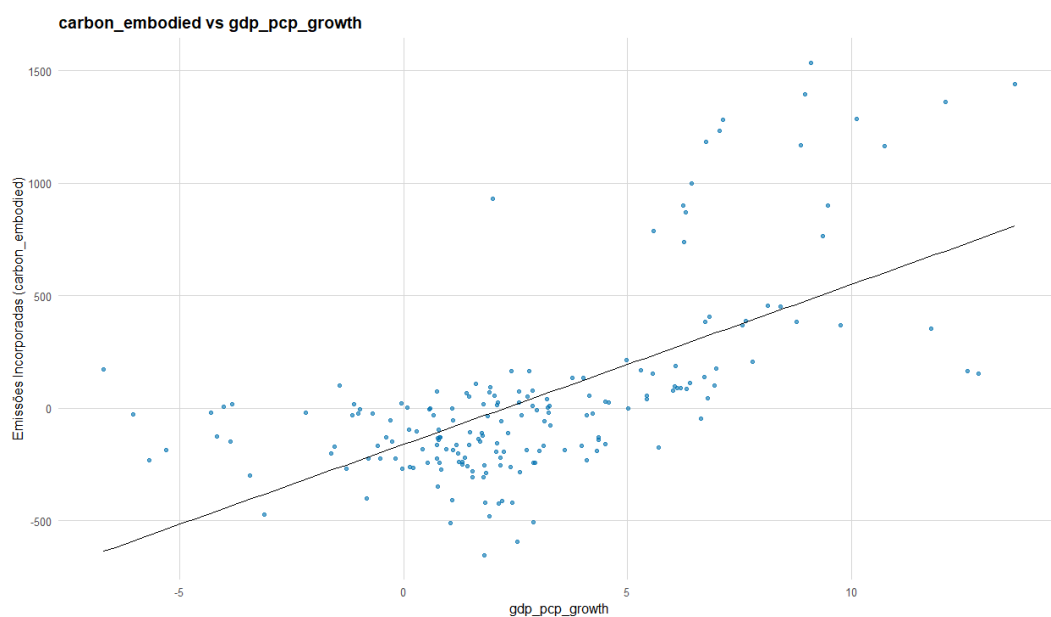
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Statistical Review of World Energy (2024)

APÊNDICE C - Relação entre as Emissões Industriais e as Emissões Associadas ao comércio Internacional



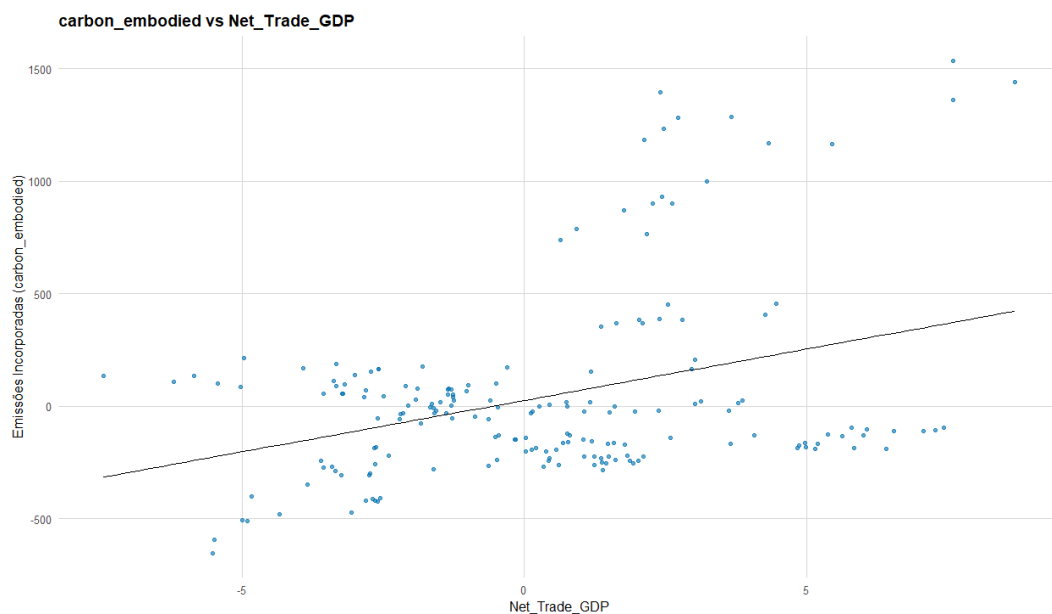
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024) e do Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022)

APÊNDICE D - Relação entre o Crescimento da Renda *per capita* e as Emissões Associadas ao comércio Internacional



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024) e do Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022)

APÊNDICE E - Relação entre a Balança Comercial Líquida sobre o PIB e as Emissões Associadas ao comércio Internacional



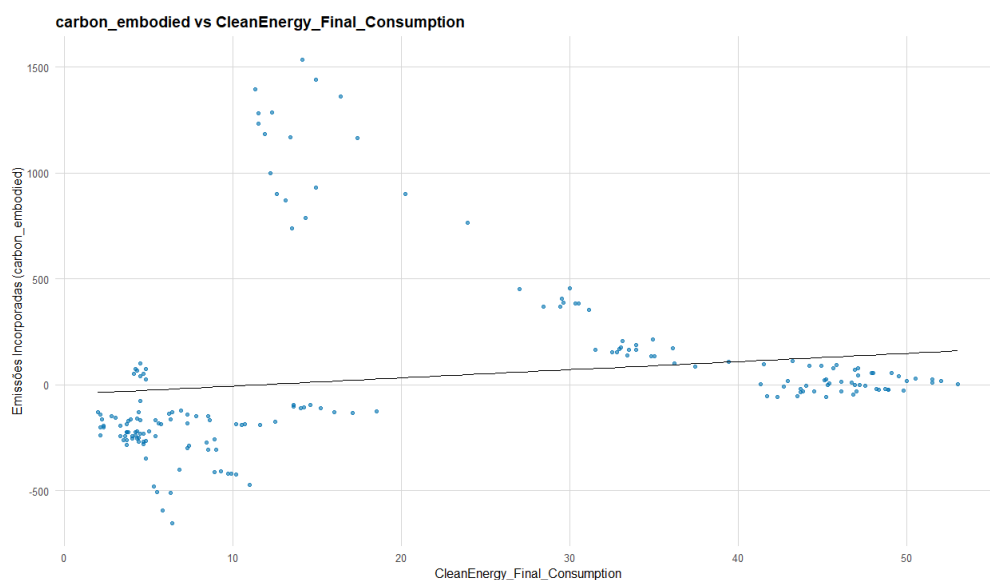
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024) e do Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022)

APÊNDICE F - Relação entre o Crescimento Populacional e as Emissões Associadas ao comércio Internacional



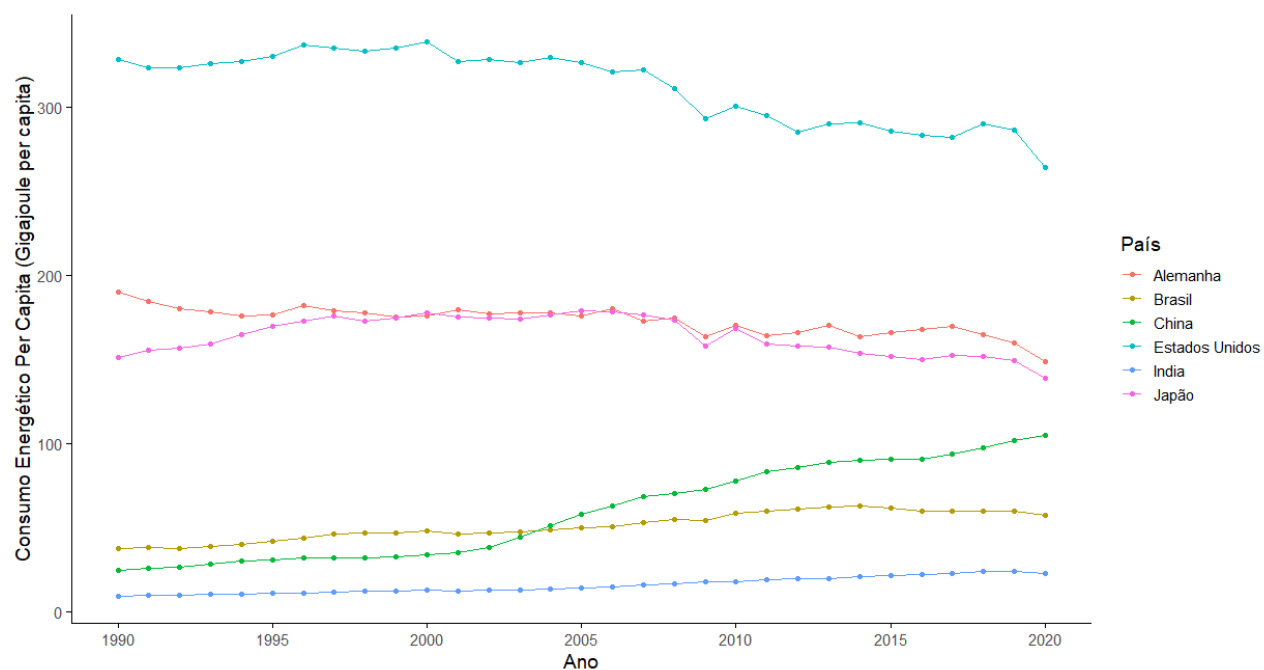
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024) e do Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022)

APÊNDICE G - Relação entre o Consumo de Energia Renovável em relação ao total consumido e as Emissões Associadas ao comércio Internacional



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Banco Mundial (2024) e do Global Carbon Budget (Friedlingstein *et al.*, 2022)

APÊNDICE H - Evolução do consumo energético *per capita* nos países analisados



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do *Statistical Review of World Energy* (2024)