



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS OU CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIOECONÔMICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS

Lucas Gabriel Alves

**Decomposição da taxa de crescimento das emissões de dióxido de carbono
derivados da geração de energia no Brasil nos efeitos escala, composição e
técnica de 2008 a 2020**

Florianópolis
2024

Lucas Gabriel Alves

Decomposição da taxa de crescimento das emissões de dióxido de carbono derivados da geração de energia no Brasil nos efeitos escala, composição e técnica de 2008 a 2020

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Econômicas do Campus Florianópolis ou Centro de Ciências Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas.
Orientador: Prof. Pedro Luiz Paolino Chaim, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Alves, Lucas Gabriel

Decomposição da taxa de crescimento das emissões de dióxido de carbono derivados da geração de energia no Brasil nos efeitos escala, composição e técnica de 2008 a 2020 / Lucas Gabriel Alves ; orientador, Pedro Luiz Paolino Chaim, 2024.

48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Socioeconômico, Graduação em Ciências Econômicas, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Ciências Econômicas. 2. Macroeconomia. 3. Economia Ambiental. I. Chaim, Pedro Luiz Paolino. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Ciências Econômicas. III. Título.

Lucas Gabriel Alves

Decomposição da taxa de crescimento das emissões de dióxido de carbono derivados da geração de energia no Brasil nos efeitos escala, composição e técnica de 2008 a 2020

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de “bacharel em Ciências Econômicas” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Ciências Econômicas

Florianópolis, 25 de junho de 2024

Prof. Pedro Luiz Paolino Chaim, Dr.
Orientador

RESUMO

Idealizada na década de 1990, a curva de Kuznetz ambiental estabelece uma relação entre a renda nacional e o nível de emissão de algum certo poluente. Presume que nos estágios iniciais de uma economia o aumento da renda é acompanhado do crescimento nas emissões desse poluente, mas, que ao atingir certo ponto de renda, esta dependência se modificaria gerando um comportamento de “U” invertido. Alguns dos fatores explicativos para este determinado fenômeno são os efeitos escala, composição e técnica, sendo que: o efeito escala prevê o aumento das emissões com o crescimento da atividade econômica; o efeito composição captura os efeitos de mudanças estruturais na composição da economia para empresas mais ou menos intensivas em poluição, e; o efeito técnica surge do impacto de melhorias nas tecnologias de produção. Numerosos são os trabalhos que buscam evidências da existência da curva de Kuznets ambiental para as emissões brasileiras, porém, ainda não foram estimados e analisados os impactos dos efeitos escala, composição e técnica para elas. Assim, o estudo tem como propósito decompor as emissões de CO₂ derivadas da geração de energia no Brasil entre 2008 e 2020 nos efeitos escala, composição e técnica. O modelo utilizado é baseado em um sistema de três variáveis, sendo elas: o valor adicionado bruto total, a participação de cada setor econômico e um coeficiente de emissão de CO₂ para cada valor adicionado à produção. As emissões de dióxido de carbono foram estimadas com base na metodologia sugerida pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas e seu dados retirados do Balanço Energético Nacional. Ao mesmo tempo, os dados de valor adicionado bruto foram extraídos das Pesquisas Estruturais em Empresas e do Sistema de Contas Nacionais fornecidos pelo IBGE. Os resultados indicam que as emissões brasileiras cresceram 5% no período, no qual o efeito escala contribuiu para o aumento das emissões de dióxido de carbono em 37%, enquanto os efeitos composição e técnica atuaram para redução das emissão em 19 e 13 pontos percentuais respectivamente. O resultado está em linha com o observado para demais países, mas diferencia-se por apresentar maior repercussão do efeito composição frente ao efeito técnica. Desagrupando o efeito composição verificou-se que os setores de transportes e industrial foram os principais responsáveis pela redução nas emissões, sendo que o setor industrial teve a maior participação, fruto de um processo de desindustrialização da economia. Em contrapartida, desagrupando o efeito técnica percebeu-se que todos os setores contribuíram para redução, com os setores energéticos e de transporte tendo os maiores impactos.

Palavras-chave: Curva de Kuznets Ambiental. Emissões de CO₂. Escala. Composição. Técnica.

ABSTRACT

Originated in the 1990s, the Environmental Kuznets Curve establishes a relationship between national income and the level of emissions of a certain pollutant. It assumes that in the early stages of an economy, income growth is accompanied by an increase in emissions of this pollutant. However, upon reaching a certain income threshold, this dependency changes, generating an inverted "U" shaped behavior. Some explanatory factors for this phenomenon include scale, composition, and technique effects: the scale effect predicts an increase in emissions with economic activity growth; the composition effect captures the structural changes in the economy's composition towards more or less pollution-intensive industries; and the technique effect arises from improvements in production technologies. Numerous studies seek evidence of the existence of the Environmental Kuznets Curve for Brazilian emissions, but the impacts of scale, composition, and technique effects have not yet been estimated and analyzed. Thus, this study aims to decompose CO₂ emissions in Brazil between 2008 and 2020 into scale, composition, and technique effects. The model used is based on a system of three variables: total gross value added, the share of each economic sector, and a CO₂ emission coefficient for each value added in production. The CO₂ emissions were estimated using the methodology suggested by the Intergovernmental Panel on Climate Change, with data sourced from the National Energy Balance. Gross value added data were extracted from Structural Business Surveys and the National Accounts System provided by IBGE. Results indicate that Brazilian emissions increased by 5% during the period, where the scale effect contributed to a 37% increase in CO₂ emissions, while the composition and technique effects reduced emissions by 19 and 13 percentage points, respectively. This outcome aligns with observations in other countries but differs by showing a more significant impact of the composition effect compared to the technique effect. Breaking down the composition effect, it was found that the transportation and industrial sectors were mainly responsible for emission reductions, with the industrial sector having the largest share due to economic deindustrialization. Conversely, breaking down the technique effect revealed that all sectors contributed to reductions, with the energy and transportation sectors having the greatest impacts.

Keywords: Environmental Kuznets Curve. CO₂ emissions. Scale. Composition. Technique.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	8
1.1.1	Objetivo Geral	8
1.1.2	Objetivos Específicos	9
2	REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1	A HISTÓRIA POR TRÁS DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL	10
2.2	O CONCEITO DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL	10
2.2.1	Os mecanismos escala, composição e técnica	12
2.3	ESTUDOS EMPÍRICOS	15
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	18
4	FORMAS DE OPERACIONALIZAÇÃO DO ESTUDO	19
4.1	O MODELO	19
4.1.1	Categorias e Variáveis	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1	EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO	26
5.2	COEFICIENTES DE EMISSÃO DE CO ₂	30
5.3	DECOMPOSIÇÃO DOS EFEITOS ESCALA, COMPOSIÇÃO E TÉCNICA	32
6	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A premissa econômica “os recursos são escassos e as necessidades são ilimitadas” dá o tom na controversa relação entre crescimento econômico e meio ambiente. É razoável pensarmos na natureza como fonte de materiais finitos e escassos, de modo que sejam um fator restritivo ao crescimento produtivo. Recentemente, entretanto, entende-se que a origem desta limitação pode estar não somente na utilização dos recursos naturais, mas também na capacidade da natureza em sustentar sua função como depósito para os resíduos humanos. Nessa situação, quando a capacidade da natureza em lidar com o lixo humano é excedida, ocorrem consequências a produção de uma economia de maneira a reduzir seu crescimento (BROCK; TAYLOR, 2005).

Na literatura econômica, o aspecto crescimento econômico versus degradação ambiental ganhou notoriedade na década de 1990 com a publicação do trabalho de Grossman e Krueger (1991). O estudo analisa os potenciais impactos do estabelecimento do Tratado de Livre Comércio da América do Norte (NAFTA) no meio ambiente, supondo uma possível relação entre as taxas de emissão de determinados poluentes e o nível de renda *per capita* de uma economia. Hipotetizaram que haveria um declínio na qualidade ambiental nos estágios iniciais do desenvolvimento, mas, que após certo ponto, passaria por uma inflexão, com decaimento da emissão de poluentes, gerando uma curva no formato de um U invertido. Esta relação passou a ser reconhecida posteriormente como curva de Kuznets ambiental (CKA) (STERN, 2014).

Interpretações iniciais sobre o que eventualmente causa o formato de U invertido do relacionamento entre renda per capita e o nível de emissões de determinado poluente são dadas pela aceitabilidade de uma população à deterioração do meio-ambiente. Nesta explicação, países pobres não podem dar ao luxo de incomodar-se com os prejuízos causados pela emissão de poluentes, assim, a degradação do ambiente seria aceitável frente aos efeitos do crescimento econômico. Mas, ao atingir determinado nível de renda, o meio-ambiente passaria a compor parte das preocupações da população, que instituiria novas legislações e instituições de proteção (ARROW, 1995).

No âmbito acadêmico brasileiro, numerosos trabalhos objetivaram estabelecer evidências para o formato da curva ambiental de Kuznets. Biage e Almeida (2015), por exemplo, buscaram a estimar com um modelo de painel de efeitos fixos para diversos países e observaram uma curva em formato de “N” no que tange as emissões de CO₂, enquanto Lucena (2005) procurou modelar CKA especificamente para o Brasil, mas não localizou um ponto de inflexão, indicando que ou o país se encontra nos estágios iniciais da curva ou a relação tem o formato de uma reta positivamente inclina, diferente do proposto

pela teoria.

Do ponto de vista contábil as emissões em determinado instante de tempo podem ser explicadas por três mecanismos, os efeitos escala, composição e técnica. O efeito escala, de intuição mais simples, prevê o aumento das emissões de poluentes com o crescimento da atividade econômica. Se as naturezas de produção crescem, então a poluição deve crescer também, isto é, a emissão de poluentes possui uma variação proporcional ao tamanho da atividade econômica, mensurada por meio do produto interno bruto (PIB) real (GROSSMAN; KRUEGER, 1991).

O efeito composição captura mudanças na poluição resultante de mudanças na estrutura produtiva de uma economia. Algumas indústrias poluem mais do que outras, ou seja, possuem intensidades de poluição e pesos sobre a composição industrial diferentes. Pode ser responsável tanto pela redução, quanto aumento, das emissões de poluentes de uma economia, dependerá se o país fará mudanças a fim de se especializar em indústrias de bens mais limpos ou sujos (CHERNIWCHAN; TAYLOR, 2022).

Por fim, o efeito técnica surge do impacto de melhorias no estado da tecnologia. Com o desenvolvimento, é esperado que conhecimentos tecnológicos avancem, gerando consequências positivas as emissões de poluentes por meio de dois caminhos: indiretamente pela redução no uso de insumos na produção, e diretamente pela adoção de melhores técnicas no controle de poluição. Segundo Copeland, Shapiro e Taylor (2021) este efeito seria o principal responsável pelas mudanças nas taxas de emissão. Pode ser representado por uma variedade de forças, como regulamentações ambientais, realocação das indústrias em plantas mais limpas, crescimento da produtividade, ou outros canais.

Com isso, uma vez que a curva ambiental de Kuznets por si só oferece capacidade limitada para compreensão da complexa relação entre crescimento econômico e qualidade ambiental, objetiva-se neste trabalho decompor as taxas de emissão de CO₂ do Brasil de 2008 a 2020, utilizando os efeitos escala, composição e técnica como ferramentas de análise.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste projeto de monografia.

1.1.1 Objetivo Geral

Decompor as taxas de crescimento das emissões de CO₂ decorrentes da queima de combustíveis fósseis para geração energia no Brasil de 2008 a 2020.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

a) Revisar a literatura acerca da relação entre taxas de emissão de determinados poluentes e o nível de renda *per capita* de uma economia.

b) Coletar dados brasileiros de renda, emissões do poluente CO₂, intensidade de poluição e composição das indústrias, bem como demais indicadores relevantes à pesquisa.

c) Utilizar de modelos estatísticos para compreensão das forças dos efeitos escala, composição e técnica sobre as emissões de poluentes no Brasil.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentados um breve histórico da curva de Kuznets ambiental, seu conceito, seus mecanismos de composição e resultados empíricos de demais estudos acadêmicos na área que objetivaram decompor a taxa de crescimento das emissões para examinar os canais de causalidade de um potencial formato de U invertido..

2.1 A HISTÓRIA POR TRÁS DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL

A relação entre meio ambiente e crescimento econômico tem sido objeto de um longo debate, mas é no final da década de 1960 e início de 1970 em que os recursos naturais passaram a ser vistos como um limitador do crescimento econômico. Este foi o foco do livro “*Limits to Growth*”, publicado em 1972 pelos economistas ambientalistas do “*Club’s of Rome’s*”, no qual argumentavam que a finitude dos recursos naturais poderia limitar o crescimento econômico e, preocupados com cenários ecológicos dramáticos para o futuro, passam a requisitar pela desaceleração do crescimento. Entretanto, esta visão foi duramente criticada nos campos teóricos e empíricos por demais economistas, em especial, após o estabelecimento da hipótese da intensidade de uso ¹ (DINDA, 2004).

Sugerida pela primeira vez por Wilfreud Malenbaum, a hipótese da intensidade de uso afirma a existência de uma relação entre a intensidade de uso de um material e o nível de desenvolvimento econômico, refletido pelo produto interno bruto per capita. A hipótese propõem que nos estágios iniciais de uma economia, quando se está em uma etapa agrária, a procura por materiais é baixa, mas, na medida que passa a se industrializar, começa a demandar por maior quantidade de matérias-primas. Ao alcançar certo nível de desenvolvimento, a necessidade por produtos seria satisfeita e a demanda do consumidor é transferida para o setor de serviços, sendo este menos intensivo no uso de materiais. Assim, a relação entre a intensidade do uso de materiais e a renda apresentaria um formato de U invertido (CROWSON, 2017).

No início dos anos 1990, com a disponibilização de dados empíricos de vários poluentes, a curva de Kuznets assume uma nova existência com a publicação de Grossman e Krueger, onde o nível de renda passa a ser relacionado com indicadores de poluição.

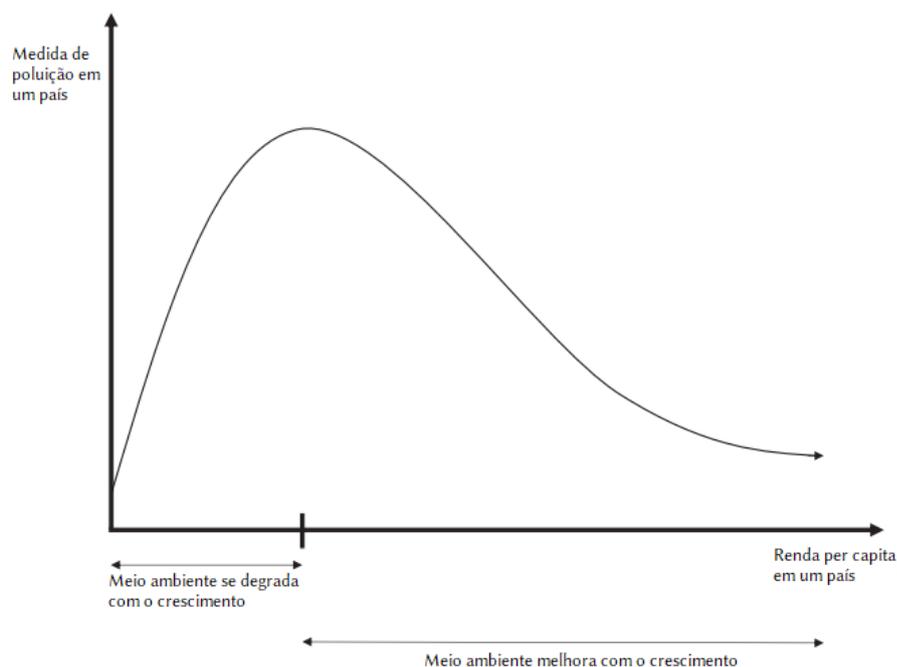
2.2 O CONCEITO DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL

A curva de Kuznets ambiental é uma relação hipotetizada entre algum indicador de degradação ambiental e a renda de uma economia. Supõem que nos estágios iniciais do crescimento, na medida em que a renda aumenta, ocorreria uma intensificação da

¹ Também conhecida como Curva de Kuznets Material.

emissão de poluentes, porém, após atingir certo ponto, passaria por uma inflexão, onde o incremento de renda seria acompanhado de uma queda nos indicadores de poluentes. Com isso, é esperado que esta relação assumira o formato de um U invertido, conforme a figura 1 (STERN, 2014).

Figura 1 – Curva de Kuznets ambiental.



Fonte: Adaptado de Cherniwchan e Taylor (2022).

A explicação mais usual para a curva é dada pela elasticidade renda da demanda por qualidade ambiental, em que a população, ao atingir certo nível de renda, reivindicaria por mudanças estruturais na economia para prevenção ambiental. Conforme as famílias alcançam um novo patamar de vida passam a se importar mais com a qualidade do ambiente em que vivem, como uma forma de expressão de sua saúde. Desse modo, o meio ambiente seria visto como um bem de luxo, onde somente em determinado nível de renda haveria uma disposição para pagar por um ambiente mais limpo, se refletindo em maior gasto com defesa ambiental, escolha por produtos menos danosos e doações a organizações não governamentais (DINDA, 2004).

Outro fator com forte influência explicativa é o comércio internacional, onde duas hipóteses possuem maior relevância ao relacionar o efeito do comércio sobre a degradação ambiental, a hipótese do deslocamento e a hipótese do refúgio de poluição. Na hipótese de deslocamento o formato de U invertido seria dado pela especialização internacional dos países, em que, países mais pobres concentrariam sua produção na manufatura de produtos “sujos”, exportando-os para países ricos, que estariam dedicados a produção de

produtos “limpos”. De modo similar, a hipótese do refúgio da poluição também estabelece uma especialização de produção internacional, porém, seria dada pela migração de multinacionais para países com regulação ambiental mais frágil. Em ambos os casos o aumento da renda provocaria um impacto nas atividades industriais do país, que, ao ver sua renda aumentar, modificaria sua estrutura produtiva para fabricação de produtos menos nocivos, bem como estabeleceria uma legislação ambiental mais firme (DINDA, 2004).

Além desses cenários, há outros três mecanismos que possuem poder explicativo sobre a hipótese da curva de Kuznets ambiental, o efeito escala, composição e técnica.

2.2.1 Os mecanismos escala, composição e técnica

Em novembro de 1991, Gene M. Grossman e Alan B. Krueger publicaram seu artigo intitulado *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*, em que, desde o início de sua circulação, se tornou extremamente influente por identificar os mecanismos chaves pelo qual a implantação de um tratado de livre comércio pode impactar o meio ambiente. Foi idealizado num contexto preestabelecimento do Tratado Norte-Americano de Livre Comércio (NAFTA), onde grupos ambientalistas alertavam para os possíveis impactos ambientais com a instauração do tratado.

Os grupos de ambientalistas se apresentavam como opositores ao acordo, já que para eles a expansão dos mercados e da atividade econômica levaria a uma depreciação dos recursos naturais, em especial para o México, devido sua infraestrutura regulatória frágil e como exemplo, citavam o setor de maquilarias mexicanas.

As maquilarias mexicanas são firmas estrangeiras com produção em larga escala voltada para exportação de bens aos Estados Unidos da América (EUA). Originalmente deveriam estar situadas em uma faixa de 20 quilômetros da fronteira do México com os EUA, recebendo isenção nas taxas de importações para que agregassem valor no processamento de componentes adquiridos no exterior e posteriormente os reexportasse. Foi um setor com rápido crescimento que recebeu pouca vigilância do governo, contribuindo para a periculosidade ambiental e social. Era tratado como um exemplo de expansão sem regulação, com exposição de riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Uma segunda preocupação se dava no ganho de competitividade devido às diferenças de regulação ambiental entre os países. O argumento era de que visando compensar a competitividade internacional com o estabelecimento da NAFTA os grupos industriais norte-americanos demandariam menor restrição aos controles de poluição, visto que o México possuiria leis ambientais e trabalhistas mais frouxas. Assim, visando manter certa competitiva, os países chegariam a um denominador comum para os padrões ambientais, que seria menor em relação ao padrão inicial.

Apesar de relevantes, para Grossman e Krueger (1991) as questões levantadas pelos grupos de ambientalistas mostraram poucas respostas convincentes, falhando ao reconhecer todas as implicações da liberação do livre comércio nos recursos naturais. Além disso evidenciam a falta de investigações teóricas e estudos empíricos no período para entendimento da relação entre o regime de trocas de um país e seu efeito na degradação do meio ambiente, ou na relação entre um estado econômico de desenvolvimento e sua emissão de poluição.

Com isso estipularam três possíveis mecanismos que afetariam o nível de poluição e depreciação dos recursos naturais devido à mudanças na política de comércio ou investimento. O primeiro foi o efeito escala, em que, a expansão da atividade econômica, gerada pela liberação do comércio e investimento estrangeiro, causaria um aumento no total de poluição caso a natureza das atividades se mantivessem inalteradas. A poluição do ar seria gerada, por exemplo, pela queima de combustíveis fósseis na indústria de transportes e na medida em que o crescimento econômico demandasse mais energia, que seria produzida por métodos similares, haveria um crescimento na emissão de poluentes nocivos. De modo geral, expressa a ideia dos ambientalistas econômicos, na qual elevações na renda resultariam em aumentos diretos na emissão de poluentes.

O segundo mecanismo estipulado é o efeito composição. Com a liberação do comércio é esperado que países se especializem nos setores em que possuem vantagem competitiva. Se esta vantagem competitiva tem origem nas diferenças entre legislações ambientais, então haverá uma consequência negativa ao meio ambiente, visto que cada país se especializará nas atividades em que o governo não regulamenta estritamente. Entretanto, caso a origem da vantagem seja mais tradicional, ou seja, nas diferenças dos fatores de tecnologia, haverá um efeito ambíguo, dado que os países se especializarão nos setores em que possuem abundância de fatores. Neste caso, se as atividades especializadas forem menos intensivas em poluição então ocorrerá uma diminuição na emissão de poluentes, mas se as atividades forem mais intensivas em poluição então haverá uma expansão nas emissões de poluentes.

Por fim, o terceiro mecanismo estabelecido é o efeito técnica. Após a liberação do comércio não necessariamente as técnicas de produção serão as mesmas, então teriam duas razões para acreditar que a poluição por unidade produzida deveria reduzir. A primeira é de que com a liberação do comércio e investimentos haveria uma transferência de tecnologias entre os países e uma vez que tecnologias modernas tendem a ser mais limpas, haveria uma redução na emissão de poluentes. Já a segunda é de que a liberação do comércio geraria um incremento na renda, então pela demanda por qualidade ambiental o corpo político demandaria um ambiente mais limpo.

Com estes mecanismos o trabalho de Grossman e Krueger (1991) explorou evi-

dências empíricas dos possíveis impactos ambientais ocasionados pela NAFTA. Para isso, se concentraram em dois focos da pesquisa. O primeiro buscou avaliar a magnitude dos efeitos escala e técnica na relação entre crescimento econômico e poluição do ar. Enquanto o segundo abordava aspectos do efeito composição, objetivando compreender o quanto o investimento estrangeiro e as exportações do México são afetados pelas regulamentações ambientais.

Utilizando amostras de emissão de dióxido de enxofre e partículas suspensas no ar obtidas no Sistema de Monitoramento Ambiental Global (GEMS) em diversas áreas urbanas pelo mundo e dados de PIB per capita encontraram evidências de que haveria uma relação entre o nível de renda de um país e níveis de emissão de poluentes. Os níveis ambientais de SO₂ e de partículas suspensas no ar aumentariam em países com baixo nível de renda, enquanto diminuiriam em países de renda mais alta. O ponto de virada ocorreria entre US\$ 4.000,00 e US\$ 5.000,00, medidos em dólares americanos de 1985.

Já, para o segundo objetivo, relacionando uma série de variáveis industriais com taxas tarifárias os pesquisadores descobriram que as vantagens competitivas criadas pela negligência no controle de poluição pelo México não foram substancialmente suficientes na determinação do fluxo de comércio e investimento, desempenhando no máximo um papel secundário. Em contrapartida os determinantes tradicionais de comércio e investimento (competitividade por meio da diferença dos fatores de produção) se mostraram mais significativos.

Assim, diferente do previsto pelos grupos de ambientalistas, as conclusões de Grosman e Krueger (1991) apontam potenciais benefícios, em especial para o México, com o estabelecimento do tratado de livre comércio. Este acordo, muito provavelmente, causaria uma expansão da atividade econômica e um incremento de renda para o México que, conseqüentemente, aliviaria os problemas de poluição, uma vez que o se encontraria em um nível de renda per capita US\$ 5.000,00, passando, portanto, por uma conjuntura crítica em seu processo de desenvolvimento, onde um crescimento na renda poderia gerar pressão política por proteção ambiental e talvez uma mudança no comportamento do consumo privado. Além disso, os pesquisadores concluem que, com a liberação do comércio, o México se especializaria em setores que causam, em média, menor dano ambiental. Isso se deve ao fato de que a vantagem comparativa não teria origem na assimetria de regulação ambiental entre EUA e México, mas sim por fatores tradicionais, que no caso mexicano é dado pelo largo número de trabalhadores pouco qualificados empregados em atividades intensivas em capital físico e menos poluentes, como a agricultura.

A lição do estudo é de que os impactos ambientais de uma liberação do comércio entre países depende não apenas das mudanças da mudança da escala da atividade econô-

mica, mas também de mudanças na composição intersetorial da atividade econômica e nas tecnologias empregadas na produção de bens e serviços.

2.3 ESTUDOS EMPÍRICOS

Muitos estudos têm replicado os componentes escala, técnica e composição para decompor as emissões de diversos poluentes por diferentes locais e períodos. Os métodos costumam variar entre regressões não paramétricas ou semiparamétricas. Enquanto os poluentes mais comuns costumam ser o dióxido de enxofre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2) e o consumo de energia. Em geral os estudos empíricos têm corroborado com a hipótese da curva de Kuznets ambiental, ou seja, encontram o efeito escala como principal fator contribuindo para o aumento da degradação ambiental e o efeito técnica como maior responsável pelas quedas das emissões de poluentes, ao passo que o efeito composição assume um caráter dúbio.

Tsurumi e Managi (2010), examinaram os determinantes da qualidade ambiental decompondo a relação entre renda e poluição por métodos semiparamétricos com modelos de generalização aditiva. Utilizaram dados de emissão de dióxido de enxofre e dióxido de carbono entre os anos de 1963 a 2000 e uso de energia entre os anos de 1970 e 2000. Como variáveis econômicas foram incluídos dados de PIB real per capita e taxa de capital-trabalho. Os resultados validam a hipótese da curva de Kuznets ambiental apenas para as emissões de dióxido de enxofre, que apresentou uma forte influência do efeito técnica com o aumento da renda, os autores supõem que tal evidência seja pela adaptação aos equipamentos de dessulfurização nos ambientes produtivos. Para as emissões de dióxido de carbono, entretanto, não encontram um declive nas emissões nos países de baixa e média renda, apenas uma pequena queda decorrente dos efeitos composição e técnica para os países de alta renda. Não foi observado declínio em nenhuma faixa de renda para o uso de energia.

Ansari e Khan (2021), por sua vez, buscaram examinar o impacto da abertura do comércio no meio ambiente no contexto asiático. Para isso, decompueram os efeitos do comércio em indicadores de pegada ambiental para 35 países asiáticos no período de 1991 a 2016. Os achados constatarem o esperado para hipótese da CKA, com o efeito escala apresentando resultados significativamente positivos na degradação ambiental, enquanto os efeitos composição e técnica contribuíram para diminuição da emissão de poluentes. Na divisão por renda, o efeito do comércio foi positivo para países de alta e média-alta renda, enquanto contribuiu para deterioração ambiental nos países de média-baixa renda.

Shahbaz *et al.* (2019) incorporaram os papéis do consumo de energia, abertura comercial e efeitos de investimento estrangeiro direto (IED) na decomposição das emissões

de carbono para os Estados Unidos da América. Os resultados apontaram cointegração entre as emissões de carbono e seus determinantes. Conforme hipotetizado, o efeito escala contribuiu para o aumento das emissões de carbono, a medida em que os efeitos técnica e composição o diminuíram, mas, com menor participação na queda vinda do efeito composição. Para os demais determinantes, o uso de energia e o IED contribuíram para a elevação das emissões de CO₂, enquanto a abertura do comércio favoreceu sua diminuição.

Bakehe (2018) analisou o desmatamento nos países da bacia do Congo, região que concentra 70% da cobertura florestal de todo o continente africano. Assim, usando de modelos não paramétricos decompôs o desmatamento na região entre os anos de 1990 a 2010. Os resultados demonstraram uma situação diferente da prevista pela teoria da CKA, o efeito escala contribuiu para o aumento do desmatamento, enquanto o efeito composição favoreceu sua queda, mas a surpresa veio pelo efeito técnica, que contrário ao esperado, mostrou um formato de “N”, contribuindo para o aumento do desmatamento após certo nível de renda. Conforme o autor:

“Uma melhoria na eficiência técnica, embora conduza a um aumento da produção agrícola, melhoria nas técnicas de corte de madeira e utilização de árvores de forma mais eficiente na produção madeira, também gera um aumento nas capacidades de transformação de madeira na bacia do Congo e uma extensão de terra arável que contrabalança os efeitos positivos das técnicas de corte de madeira e produção agrícola (BAKEHE, 2018, p. 9).”

Khan, Safdar e Nadeem (2022) empregaram os efeitos escala, composição e técnica para estudar as relações entre comércio e meio ambiente no Paquistão para os anos de 1984 a 2019. Os resultados comprovam a teoria da curva de Kuznets ambiental, com os efeitos escala e composição contribuindo para o aumento da emissão de CO₂, enquanto o efeito técnica ajudou a diminuí-las. O comércio auxiliou para expansão das atividades de exportação de produtos intensivos em poluição, de modo que a abertura comercial degrada a qualidade ambiental tanto no curto quanto no longo prazo.

Levinson (2009) decompôs as taxas de emissão de quatro poluentes para os EUA no período de 1972 a 2001, são eles: dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e componentes orgânicos voláteis. Seus resultados colaboraram com a hipótese da curva de Kuznets ambiental, entretanto os impactos de cada efeito foi diferente para cada poluente. O efeito escala foi responsável pelo aumento da emissão de todos os poluentes, enquanto o efeito técnica foi o maior responsável pelas quedas das emissões, sendo mais significativo para o dióxido de enxofre, monóxido de carbono e gases orgânicos voláteis. O efeito composição também se mostrou como um fator para queda das emissões, mas em uma menor dimensão.

No Quadro 1 é possível verificar um resumo estudos empíricos.

Quadro 1 – Resumo dos trabalhos que decompueram emissões de poluentes nos efeitos escala, composição e técnica.

Autores	Período	Local	Poluentes	Resultados
Ansari e Khan (2021)	1991 – 2016	Grupo de países asiáticos	Indicadores de pegada ambiental	Os resultados corroboraram para hipótese da curva de Kuznets ambiental, uma vez que o efeito escala foi significativamente positivo ao incrementar à degradação ambiental e os efeitos composição e técnica tiveram impactos negativos em todos os países do grupo.
Bakehe (2018)	1990 – 2010	Países da bacia do Congo	Desmatamento	O estudo confirmou o impacto esperado para o efeitos de escala no desmatamento florestal dos países da bacia do Congo. O o efeito composição se apresentou como um fator positivo, impactando na redução do desmatamento. Enquanto, diferente do teorizado, o estudo encontrou um efeito negativo do efeito técnica sobre o desmatamento, em que o efeito técnica contribuiu para seu aumento.
Khan, Safdar e Nadeem (2022)	1984 – 2019	Paquistão	Dióxido de carbono (CO ₂)	As descobertas do estudo apoiaram a hipótese padrão da CKA no longo prazo, em que durante os estágios iniciais da expansão econômica o efeito escala se sobrepôs aos demais, diminuindo a qualidade ambiental e, após certo nível de renda, passa a ser superado pelos efeitos composição e renda, que contribuem negativamente para emissão de CO ₂ .
Levinson (2009)	1972 – 2001	Estados Unidos da América	Dióxido de enxofre (SO ₂), dióxido de nitrogênio (NO ₂), monóxido de carbono (CO) e componentes orgânicos voláteis	Os resultados obtidos pelo estudo apontam que o efeito técnica e composição superaram o efeito escala na emissão dos quatro poluentes para o período e local. O componente técnica foi o principal responsável pela s quedas de emissões, em especial para o poluente CO, em que chegou a representar uma queda de 32%, enquanto para o NO ₂ representou uma queda de apenas 6%.
Shahbaz <i>et al.</i> (2019)	1965 – 2016	Estados Unidos da América	Uso de energia e dióxido de carbono (CO ₂)	Os pesquisadores encontrara resultados que corroboram com a hipótese da curva de Kuznets ambiental, entretanto sendo mais evidenciada no longo prazo que no curto. O efeito escala foi responsável pelo aumento das emissões de carbono, enquanto o efeito técnica o diminuiu. O efeito composição mostrou também estar negativamente ligado as emissões de CO ₂ , mas com um impacto menor no longo prazo.
Tsurumi e Managi (2010)	1963 – 2000	Grupo de 112 países	Dióxido de enxofre (SO ₂), dióxido de carbono (CO ₂) e uso de energia	Neste estudo os resultados implicam que o efeito escala foi similar para ambos os poluentes, contribuindo para seu aumento. O efeito técnica apresentou uma queda acentuada para as emissões de SO ₂ em todos os grupos de países. Por sua vez, as emissões de CO ₂ e uso de energia não mostraram um declive em países de baixa e média renda.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Conforme Prodanov e Freitas (2013) a pesquisa científica tem por objetivo explicar fenômenos, fornecendo respostas aos problemas de compreensão da natureza. Para isso, deve ser sistemática, metódica e crítica, possuindo procedimentos e peculiaridades conforme o tipo de pesquisa. De forma costumeira podemos classificar as pesquisas quanto seu ponto de vista da natureza, seu objetivo, seu procedimento técnico e sua forma de abordagem do problema.

Do ponto de vista da natureza este trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada. Conforme Genhardt e Silveira (2009, p. 35), a pesquisa aplicada “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos”, desse modo, o objetivo de empregar os mecanismos escala, composição e técnica, já estabelecidos academicamente, para maior entendimento das taxas de emissão de poluentes no Brasil classificam o trabalho como aplicado.

Do ponto de vista de seus objetivos este trabalho admite um nível de complexidade descritivo, pois de acordo com Prodanov e Freitas (2013) objetiva descobrir as características, causas e frequência de fatos, para isso se coleta dados observáveis, sendo registrados, analisados e interpretados sem a interferência do pesquisador.

Quanto aos objetivos, o método científico a ser aplicado será o indutivo, nele são atribuídas verdades universais a partir de dados particulares suficientemente constatados, isto é, visando compreender a relação entre determinadas variáveis será induzida uma lei geral por meio da observação e experimentação de um fenômeno (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Por fim, o problema terá uma abordagem quantitativa, pois serão formuladas relações entre variáveis, quantificadas com base em dados econômicos e naturais utilizando de dados estatísticos para classificação e análise (PRODANOV; FREITAS, 2013).

4 FORMAS DE OPERACIONALIZAÇÃO DO ESTUDO

Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico nas áreas de crescimento econômico e meio ambiente a respeito da relação existente entre as taxas de emissão de poluentes e de crescimento econômico, bem como uma seleção de trabalhos que possuam objetivo similar a esse. Para isso se utilizara da plataforma Google Scholar, empregando combinações dos seguintes termos de busca para refinamento: decomposição (*decomposition*), emissões (*emissions*), escala (*scale*), composição (*composition*) e técnica (*technique*).

4.1 O MODELO

O modelo empregado para decomposição das taxas de emissão de CO₂ neste trabalho foi inspirado por Levinson (2009). Nesse modelo, o total de emissão de um determinado poluente na economia pode ser escrito como o somatório da parcela individual de emissão de cada indústria que, por sua vez, pode ser escrito também pelo total de valor adicionado na economia multiplicando a soma da parcela de emissão de cada indústria e de um coeficiente que reflete o quanto do poluente é emitido para cada valor adicionado de determinada indústria:

$$P = \sum_i p_i = \sum_i v_i z_i = V \sum_i \theta_i z_i, \quad (1)$$

em que,

P = total de emissão de um poluente,

p_i = a emissão de cada indústria i ,

v_i = o valor adicionado de cada indústria i ,

$\theta_i = v_i/V$ = a participação do valor adicionado de cada indústria no total da economia, e

$z_i = p_i/v_i$ = o quanto cada indústria emite de poluição para cada real de valor adicionado, um indicador que mede a intensidade de poluição.

Por simplicidade e tratabilidade analítica, (1) pode ser reescrita em notação vetorial:

$$P = V\theta'z, \quad (2)$$

em que θ e z são vetores $n \times 1$ contendo a parcela de cada indústria e sua intensidade de poluição, respectivamente. Diferenciando totalmente (2), tem-se que:

$$dP = \theta' z dV + V z' d\theta + V \theta' dz \quad (3)$$

Neste formato é possível verificar os impactos dos três componentes das emissões de poluição propostos por Grossman e Krueger de forma isolada. O primeiro termo é o efeito escala ($\theta' z dV$), nos permite verificar as variações das emissões do poluente frente a variações do tamanho geral da economia, uma vez que a composição das indústrias e as intensidades de emissão são mantidas constantes. O segundo termo é o efeito composição ($V z' d\theta$), considera o impacto nas emissões de determinado poluente em relação a mudanças na composição de indústrias de uma economia, para isso a escala e intensidade de poluição são mantidas constantes. Por fim, o terceiro termo é o efeito técnica ($V \theta' dz$), que captura mudanças na intensidade de poluição das indústrias, mantendo a escala e composição da economia fixas.

4.1.1 Categorias e Variáveis

Para execução do modelo proposto foram utilizadas variáveis de categoria ambiental e econômica. Para a categoria ambiental, necessita-se, conforme descrito pelo modelo, selecionar um poluente base, sendo o dióxido de carbono (CO_2) o poluente analisado neste trabalho.

Primeiramente, é importante mencionar de que as emissões de gases antrópicos podem ter diferentes origens em uma economia, como na geração de energia, na agropecuária, nas mudanças do uso da terra, nos processos industriais, entre outros. Historicamente, no Brasil, a mudança de uso da terra, na qual são contabilizadas as mudanças na biomassa do solo pela substituição de um tipo de uso da terra por outro, tem sido a principal fonte das emissões de dióxido de carbono, principalmente pela conversão de florestas para atividades de agricultura ou pecuária. Conforme dados de Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação Brasil (2016), em 1990 as mudanças de uso da terra representavam 78% das emissões totais, porém, após consecutivas reduções, chegaram a representaram 42% das emissões em 2010.

Na geração de energia, maior fonte das emissões de CO_2 em 2010, com 47% do total, contabilizam-se dois subsetores de produção de gases do efeito estufa, a queima de combustíveis fósseis e as emissões fugitivas. Na queima de combustíveis fósseis estão incluídas as emissões decorrentes da oxidação do carbono durante sua queima, seja para geração de energia elétrica, outras formas de energia ou consumo final. Já, nas emissões fugitivas, se incluem a queima de gás nas tochas de plataformas e refinarias e a combustão

espontânea de carvão em depósitos e pilhas de rejeito. Dito isso, no presente trabalho apurou-se somente as emissões de CO₂ resultantes da queima de combustíveis fósseis para geração de energia, desconsiderando as demais origens e emissões fugitivas. Ressalta-se, portanto, que as emissões apresentadas não retratam sua totalidade na economia, mas, que para fins de decomposição das emissões nos efeitos escala, composição e técnica, são as significativamente representativas.

O CO₂ é um dos gases causadores do efeito estufa, sendo o mais comum dentre os gases produzidos pelas atividades antrópicas. Tem origem, em sua maioria, pela oxidação do carbono durante a queima de combustíveis fósseis, cerca de 70 a 90 por cento de toda emissão resultante da ação humana e, por isso, pode ser estimado por dados de consumo de combustíveis conforme abordagem de referência do IPCC (1996). Nesta abordagem o processo de estimação pode ser dividido em 5 passos:

- 1 – Estimação do consumo de combustíveis por tipo de combustível: para mensuração das emissões de CO₂ por consumo de energia devem ser quantificados os usos de combustíveis em uma economia;
- 2 – Conversão dos dados de combustíveis para uma unidade comum de energia: para estimar as emissões do gás causador do efeito estufa o consumo entre setores necessita partilhar de uma mesma unidade de energia;
- 3 – Seleção do fator de emissão de carbono para cada combustível: diferentes fontes de energia possuem diferentes emissões de dióxido de carbono, assim, cada consumo de combustível tem de ser multiplicado pelo seu fator de emissão correspondente;
- 4 – Correção dos valores para consideração da combustão incompleta do combustível: durante uma combustão nem todo carbono torna-se CO₂, uma vez que a oxidação não acontece de forma completa, fazendo com que parte do carbono seja transformado em subprodutos da combustão. Com isso, demanda-se a adição de um fator de correção para considerar diferentes graus de oxidação para cada combustível;
- 5 – Conversão da quantidade de carbono oxidada em emissões de CO₂: após estimada a quantidade de carbono liberado na combustão deve-se obter a quantidade de CO₂ equivalente pela multiplicação das emissões por 44/12, sendo 44 o peso molecular do CO₂ e 12 o peso atômico do carbono;

Matematicamente as emissões de carbono podem ser expressas da seguinte maneira:

$$E(\text{CO}_2) = \sum_i C_{ci} * \alpha * \omega_c * \phi_c * \epsilon \quad (4)$$

sendo,

$E(\text{CO}_2)_i$ = emissão total de dióxido de carbono,

C_{ci} = consumo do combustível c na indústria i ,

α = fator de conversão de unidade para uma unidade comum,

ω_c = fator de emissão de carbono para o combustível c ,

ϕ_c = fator de correção para queima incompleta do combustível c , e

ϵ = fator de conversão do carbono para CO_2 .

Dito isso, para estimação das emissões de CO_2 no Brasil utilizou-se dos dados de consumo de combustíveis publicados pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) no Balanço Energético Nacional (BEN). A EPE é uma empresa pública que presta serviços ao Ministério de Minas e Energia com estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético. O BEN é uma das publicações elaboradas anualmente pela empresa e constitui fonte oficial de dados e informações sobre a matriz energética brasileira. É dividido entre tipos de combustíveis e setores da economia, sendo os setores: Agropecuário, Comercial, Energético, Público¹, de Transportes e Industrial. Os setores de transportes e industrial também apresentam subdivisões entre atividades, sendo as atividades de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário as subdivisões do setor de transportes e as atividades industriais de cimento, ferro-gusa e aço, ferro-ligas, mineração e pelletização, química, não-ferrosos e outros da metalurgia, têxtil, alimentos e bebidas, papel e celulose, cerâmica e outras indústrias as subdivisões do setor industrial.

No Balanço Energético Nacional o consumo dos combustíveis estão expressos em toneladas equivalentes de petróleo (tep), uma medida da energia contida em uma tonelada médio de petróleo consumido. O IPCC, em contrapartida, utiliza como unidade de medida comum o terajoule (TJ), porém, a EPE dispõem da nota técnica nº 011/2022² que apresenta os fatores de emissão de CO_2 já ajustados para a unidade tep, considerando também a conversão do carbono em CO_2 . Assim, utilizou-se dos valores apresentados

¹ O setor denominado como "Público" pelo BEN é composto pelas atividades que são comumente denominadas como da administração pública.

² Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-informativo-tecnico-sobre-metodologias-e-fatores-de-emissao-utilizados-para-estimar-as-emissoes-de-gases-de-efeito-estufanos-seus-estudos>> .

pela nota técnica para conversão do consumo de combustíveis em emissão de dióxido de carbono.

Ademais, se considerou a queima incompleta do combustível, computando as emissões pelas frações de carbono oxidado disponibilizados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia Brasil (2006) em seu anexo I.

Partindo para a categoria econômica, objetivando estabelecer o tamanho geral da economia bem como a participação de cada indústria, foram utilizados dados de valor adicionado bruto. Esta medida representa o valor agregado aos bens e serviços consumidos durante o processo produtivo, é contabilizado pela diferença entre o valor bruto da produção e seu consumo intermediário. Os valores adicionados brutos para cada setor econômico foram coletados majoritariamente das Pesquisas Estruturais em Empresas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mais especificamente da Pesquisa Anual de Serviços, Pesquisa Anual do Comércio, Pesquisa Anual da Indústria da Construção e da Pesquisa Industrial Anual – Empresa.

Iniciando pela Pesquisa Anual de Serviços (PAS), tem como objetivo fornecer características da estrutura da prestação de serviços não financeiros no país. Na classificação do balanço energético nacional abrange atividades correspondentes aos setores de transportes, comercial e público. Contém também certas classes de atividades do setor agropecuário, entretanto, não foram consideradas a fim de evitar duplicidade nos valores, uma vez que, para este setor, os resultados tiveram origem em outra base de dados. Os valores adicionados brutos desta pesquisa foram extraídos de sua aba de *downloads*, em sua Tabela 1 designada “Receita operacional líquida, valor adicionado, salários, retiradas e outras remunerações, pessoal ocupado e número de empresas dos serviços empresariais não financeiros, segundo as atividades - Brasil”(IBGE, 2024c).

A Pesquisa Anual do Comércio (PAC), por sua vez, objetiva fornecer características básicas do segmento empresarial da atividade de comércio no país. Na classificação do BEN compreende somente atividades do setor comercial. Os resultados de valor adicionado bruto são cedidos pela pesquisa em sua seção de *downloads* na Tabela 1 denominada “Dados comparativos das empresas comerciais, segundo as divisões, grupos e classes de atividades – Brasil”(IBGE, 2024a).

Já a Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) disponibiliza informações sobre as características estruturais básicas do segmento da indústria da construção. Na classificação do BEN, condizem com algumas divisões das atividades de “Outras Indústrias” do setor industrial. Os dados de valor adicionado bruto foram extraídos da Tabela 2.1 intitulada “Dados gerais das empresas de construção, segundo as divisões, os grupos e as

classes de atividades – Brasil” em sua seção de *downloads*(IBGE, 2024b).

Por fim, a Pesquisa Industrial Anual (PIA) é dividida entre PIA-Empresa e PIA-Produto, para o objetivo do trabalho, utilizou-se a PIA-Empresa, que tem intuito de investigar características estruturais básicas do segmento empresarial da atividade industrial no país. Na classificação do BEN, condiz com as atividades do setor industrial. Fornece as informações de valor adicionado em sua seção de *downloads* na Tabela 105 denominada “Estrutura do valor adicionado das empresas industriais com 30 ou mais pessoas ocupadas, segundo as divisões, os grupos e as classes de atividades – Brasil”(IBGE, 2024d).

Além das Pesquisas Estruturais em Empresas utilizou-se também valores disponibilizados no Sistema de Contas Nacionais, mas somente para o setor de Agropecuário. Os dados foram coletados de sua seção de *downloads*, exclusivamente da Tabela 10.4 designada “Valor adicionado bruto constante e corrente, segundo as atividades”(IBGE, 2024e).

Finalizada a coleta dos valores adicionados de produção, realizou-se a confecção dos coeficientes de intensidade de emissão para cada setor, esta medida visa compreender o quanto cada indústria emite de CO₂ para cada valor adicionado, sendo fundamental para compreensão do efeito técnica sobre as emissões. Entretanto, para que isso fosse possível, foi necessário unir os dados de valor adicionado nos mesmos setores e atividades estabelecidos pelo BEN, isto foi efetuado com base nas classes da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0). As classes CNAE compreendidas por cada setor são apresentadas no manual metodológico do BEN³ e, visto que as pesquisas estruturais em empresas do IBGE apresentam seus resultados diferenciados com base nas classes do CNAE 2.0, simplesmente agrupou-se os valores conforme as classes de cada setor.

No entanto, o Sistema de Contas Nacionais utiliza de uma classificação própria para exibição dos resultados, da maneira que, para obtenção de dados do setor agropecuário, foi fundamental efetuar uma conversão entre classificações, para isto, utilizou-se a tabela “SCN (nível 147/55) x CNAE”. Além disso, dado que a tabela ainda trabalha com a CNAE 1.0, fez-se necessário realizar uma segunda conversão entre versões da CNAE, empregando, desta vez, a tabela “CNAE 2.0 X CNAE 1.0”⁴.

Completado o agrupamento em setores, os coeficientes de emissão foram estimados pela razão entre emissões de CO₂ em kilogramas sobre o valor adicionado bruto em milhares de reais. Com isso, temos um indicador de quantos kg de gás carbônico são emitidos para adição de R\$ 1000 sobre o produto, quanto maior for este coeficiente, mais

³ Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

⁴ Tabelas de correspondências disponíveis em: <<https://concla.ibge.gov.br/classificacoes/correspondencias/atividades-economicas.html>> .

intensivo em emissão será o setor.

Além da confecção dos coeficientes de emissão, estabeleceu-se a participação dos setores na economia com base nos resultados de valor adicionado. Isto é, no total da economia, quanto mais valor o setor adiciona sobre seus produtos, maior sua participação.

Só então, preparadas todas as variáveis no tempo, valor adicionado bruto total, participação de cada setor na economia e coeficiente de emissão, pôde-se aplicar as variáveis sobre o modelo exposto e estimar os efeitos escala, composição e técnica sobre as emissões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

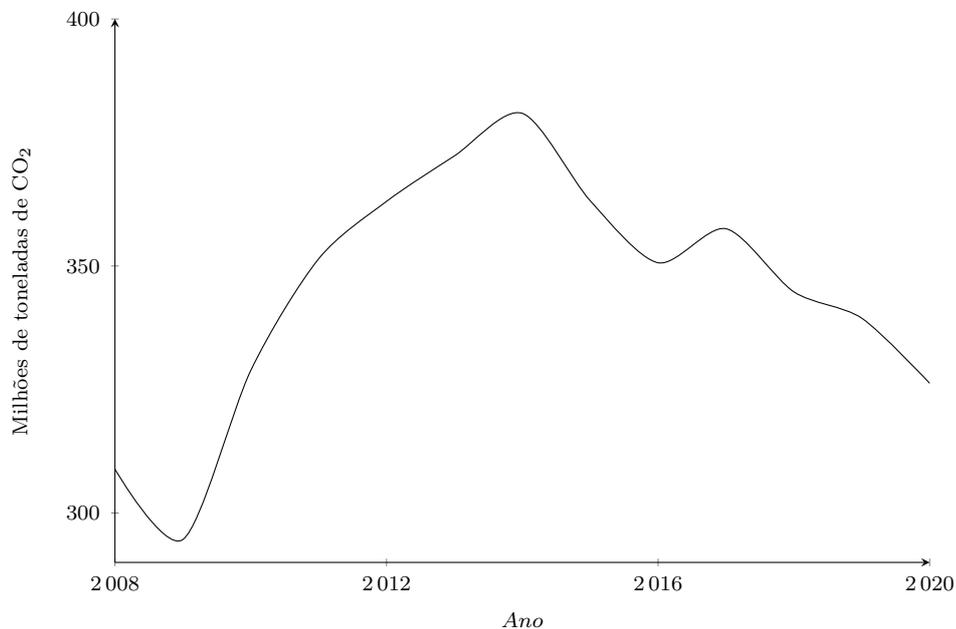
Nesta seção serão apresentados os resultados empíricos da pesquisa, iniciando pelas estimativas de emissão de dióxido de carbono, sua relação com o valor adicionado e sua decomposição nos efeitos escala, composição e técnica.

Porém, antes de serem discorridos, destaca-se que os resultados para o ano de 2020 podem sofrer influência da pandemia de *covid19*. No entanto, ressalta-se que, no geral, não foram visualizadas mudanças no comportamento das séries, somente intensificação de processos que já vinham ocorrendo anteriormente ao início da pandemia.

5.1 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO

No período de 2008 a 2020 as emissões totais de CO₂ passaram de 308 para 326 milhões de toneladas, um aumento de 5,63%. Inicialmente, nota-se que o fluxo de emissões provenientes do consumo de energia cresceram até 2014 a uma taxa 3,55% e posteriormente passaram a decrescer a uma taxa 2,55% ao ano, fator que pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Emissões totais de dióxido de carbono decorrentes da geração de energia no Brasil de 2008 a 2020 ¹



Fonte: Estimativas próprias do estudo.

¹ Trajetória das estimativas de emissões de CO₂ em milhões de toneladas confeccionadas a partir de dados de consumo de combustíveis disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional. Para mais detalhes, verificar subseção 3.1.1 dos procedimentos metodológicos.

Observando de forma desagregada, os resultados estimados para emissão de CO₂ obtidos por meio da metodologia *top-down* podem ser observados na Tabela 1 e estão segregados em 7 setores econômicos definidos pelo balanço energético nacional.

Tabela 1 – Emissões de CO₂ em toneladas decorrentes da geração de energia no Brasil por setor de 2008 a 2020 ²

Setores	2008	%	2012	%	2016	%	2020	%
Setor Energético	26.302,22	8,52	23.551,16	6,49	26.771,86	7,63	23.626,39	7,24
Setor Comercial	1.774,38	0,57	1.685,32	0,46	1.428,07	0,41	1.215,11	0,37
Setor Público	1.773,15	0,57	821,94	0,23	784,67	0,22	763,88	0,23
Setor Residencial	16.367,86	5,30	17.428,05	4,80	18.032,54	5,14	18.672,68	5,72
Setor Agropecuário	17.288,05	5,60	17.278,28	4,76	17.734,37	5,06	19.224,45	5,89
Rodoviário	135.594,17	43,90	181.209,74	49,91	178.388,75	50,87	165.955,38	50,86
Ferroviário	3.024,92	0,98	2.997,28	0,83	2.717,82	0,78	2.886,72	0,88
Hidroviário	4.601,90	1,49	4.112,14	1,13	3.789,13	1,08	3.617,79	1,11
Setor Transportes	143.220,99	46,37	188.319,16	51,87	184.895,70	52,73	172.459,90	52,86
Cimento	10.835,66	3,51	13.934,81	3,84	11.207,21	3,20	10.459,34	3,21
Ferro-gusa e Aço	41.519,60	13,44	46.010,14	12,67	42.147,28	12,02	41.656,09	12,77
Ferro-ligas	527,13	0,17	415,32	0,11	285,38	0,08	364,69	0,11
Mineração/Pelotização	7.778,25	2,52	7.378,96	2,03	5.620,67	1,60	3.590,57	1,10
Química	14.129,70	4,57	13.934,17	3,84	12.834,03	3,66	10.617,71	3,25
Não-ferrosos e Outros da Metalurgia	7.755,68	2,51	12.243,67	3,37	10.885,40	3,10	8.919,56	2,73
Têxtil	1.128,07	0,37	980,03	0,27	595,79	0,17	509,22	0,16
Alimentos e Bebidas	3.247,95	1,05	3.437,78	0,95	3.121,24	0,89	2.818,23	0,86
Papel e Celulose	3.388,71	1,10	3.828,85	1,05	4.030,33	1,15	3.995,09	1,22
Cerâmica	4.544,68	1,47	4.908,24	1,35	4.555,95	1,30	3.831,62	1,17
Outras Indústrias	7.304,99	2,36	6.930,76	1,91	5.728,22	1,63	3.544,28	1,09
Setor Industrial	102.160,42	33,07	114.002,73	31,40	101.011,48	28,81	90.306,39	27,68
Total (milhares toneladas de CO₂)	308.887,06	100	363.086,63	100	350.658,69	100	326.268,78	100

Fonte: Estimativas próprias do estudo.

Dentre os setores econômicos, o de transporte destaca-se como o maior responsável pelas emissões de CO₂, correspondendo, somente ele, por mais da metade das emissões totais em 2020. Apenas o transporte rodoviário, com 165 milhões de toneladas de CO₂ emitidas, constituiu 50,86% das emissões no ano.

O óleo diesel e a gasolina automotiva foram os combustíveis mais consumido pelo setor, com um consumo total em 2020 de 33 mil tep e 20 mil tep de energia respectivamente. Ambos os combustíveis possuem altos fatores de emissão de CO₂, de 3.102 tCO₂/mil tep para o óleo diesel e 2.901 tCO₂/mil tep para a gasolina automotiva, fazendo com que, aliado ao grande consumo, configurem este setor como o principal emissor de dióxido de carbono para geração de energia. O álcool etílico também apresenta um consumo significativo, de cerca de 15 mil tep, entretanto, em razão de sua característica renovável, acaba por não contribuir nas emissões totais ³.

² Estimativas das emissões de CO₂ em milhares de toneladas confeccionadas a partir de dados de consumo de combustíveis disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional. Para mais detalhes, verificar subseção 3.1.1 dos procedimentos metodológicos.

³ Os combustíveis de biomassa (lenha, carvão vegetal, resíduos vegetais, lixo, álcool e bagaço), no uso

Após o setor de transportes, o ramo industrial é quem apresenta maior participação nas emissões de CO₂, com um valor total emitido de 99 milhões de toneladas em 2020. Apesar de, entre os setores, ser o segundo maior emissor, foi o setor com maior consumo de energia em 2020, superando, inclusive, o setor de transportes. Apesar disso, trata-se de um setor com maior variedade nos combustíveis consumidos e que, mesmo tendo uma utilização considerável de combustíveis mais sujos (com maiores fatores de emissão de CO₂), consome também muitos combustíveis de matriz renovável, tendo, como consequência, um total de emissões de dióxido de carbono menor do que o setor de transportes.

Dentre as atividades industriais a produção de ferro-gusa e aço se sobressai nas emissões de dióxido de carbono, correspondendo a quase metade das emissões do setor, fator devido ao grande consumo de combustíveis com altos fatores de emissão de CO₂, o coque e o carvão mineral. Além das atividades de ferro-gusa e aço se ressaltam a produção química e de cimento no setor industrial.

Em matéria de composição, conforme a Tabela 2, percebe-se uma substituição na participação da indústria pelo setor de transportes. Em 2008, o setor industrial correspondia a aproximadamente 33% das emissões de dióxido de carbono, enquanto a fração do setor de transportes era de 46%. Já, em 2020, as indústrias passaram a corresponder a 28% das emissões e os transportes 53%, uma variação de -5,40 e 6,49 pontos percentuais (p.p), respectivamente. O setor energético também exibiu uma mudança significativa de -1,27 ponto percentual.

Tabela 2 – Participação e variação dos setores econômicos nas emissões de CO₂ decorrentes da geração de energia de 2008 e 2020 para o Brasil e outros grupos econômicos⁴

2*Setores	Brasil			BRICS (excluindo Brasil)			G7			Mundo		
	2008	2020	Variação (p.p.)	2008	2020	Variação (p.p.)	2008	2020	Variação (p.p.)	2008	2020	Variação (p.p.)
Setor Energético	8,52	7,24	-1,27	47,87	52,73	4,86	41,22	35,45	-5,77	40,77	42,79	2,02
Setor de Transportes	46,37	52,86	6,49	9,63	10,30	0,66	28,41	30,53	2,12	23,51	22,34	-1,17
Setor Industrial	33,07	27,68	-5,40	29,36	26,11	-3,26	11,25	11,76	0,51	19,00	19,51	0,51
Outros Setores	12,04	12,22	0,18	13,14	10,87	-2,27	19,13	22,26	3,14	16,71	15,36	-1,36
Total	100	100	-	100	100	-	100	100	-	100	100	-

Fonte: Resultados brasileiros estimados pelo estudo enquanto dados internacionais são adaptados da Agência Internacional de Energia.

Em confronto a outros países, as emissões de CO₂ do Brasil apresentam uma participação e direcionamento distintos, principalmente no que diz respeito a centralidade das

da terra, acabam por capturar todo o dióxido de carbono emitido na queima, fazendo com que não computem emissões líquidas de gases.

⁴ Os resultados para a economia brasileira foram estimados pela metodologia *top-down* a partir de dados de consumo de combustíveis disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional. Enquanto os dados internacionais foram adaptados dos Dados Estatísticos de Energia fornecidos pela Agência Internacional Energética.

emissões em torno do setor de transportes. Conforme dados disponibilizados pela Agência Internacional de Energia (IEA), no mundo, as atividades produtoras de eletricidade e calor são as principais responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono, com 42,79% das emissões, seguidas pelas atividades de transportes (22,34%) e pelas atividades industriais (19,51%).

Comparando aos países do BRICS⁵, as emissões nacionais se distanciam ainda mais, uma vez que as atividades de produção de eletricidade e calor chegam a representar 58,73% das emissões de CO₂ do grupo. O setor de transportes, por sua vez, emite apenas cerca de 10,3% das emissões, atrás das atividades industriais (26,11%) e das outras atividades (10,87%)⁶.

Em relação ao G7⁷, as participações de emissão de CO₂ entre os setores apresentam similaridade às brasileiras por terem o setor de transportes como principal responsável pelas emissões do gás. Apesar disto, não podemos afirmar que as emissões do G7 também possuem centralidade no setor de transportes, uma vez que não chegam ao mesmo patamar de concentração da economia brasileira.

Em se tratando da dinâmica das emissões, entre 2008 e 2020 podemos dizer que o Brasil apresentou valores opostos ao do resto do mundo, que teve crescimento na participação do setor industrial e energético e queda da fatia do setor de transportes. Em relação aos países membro do G7 e do BRICS, o Brasil acompanhou a tendência de ambos de aumento na parcela do setor de transportes, apesar da diferença de magnitude. Já os setores industrial e energético assumem uma movimentação singular, apresentam uma perda de participação das indústrias nas emissões similar ao BRICS, mas também apresenta queda de participação do setor energético como nos países membros do G7.

Em síntese, o que se observa é uma centralidade das emissões de CO₂ brasileiras em torno do setor de transportes, sendo esta uma particularidade da economia nacional quando comparado as demais. Conforme estudos de Andrade e Mattei (2012), este fenômeno é fruto de um modelo de desenvolvimento econômico que privilegiou a concentração em torno do modal rodoviário, tanto para o transporte de cargas quanto para o o transporte de passageiros, sendo o modal rodoviário excessivamente dependente de combustíveis fósseis. Os autores visualizaram também que entre 1990 e 2007 o Brasil apresentou, após a China, o maior crescimento das emissões de CO₂ per capita e em valores absolutos para o setor, indicando que as emissões desse setor tem crescido a pelo menos 3 décadas no país.

⁵ Grupo econômico não formal formado pelos seguintes países: Brasil, Rússia, Índia, China, e África do Sul. Para a análise, desconsiderou-se o Brasil nas métricas.

⁶ Para os valores percentuais de participação foram desconsiderados resultados do Brasil.

⁷ Grupo formado pelos seguintes países: Alemanha, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Japão e Reino Unido.

Além do setor de transportes, o setor energético é outro que se diferencia do padrão internacional, porém, desta vez, de forma positiva, pois, para o caso brasileiro, este setor exibe uma participação bem menor. O fator determinante para esta ocorrência é a composição da matriz elétrica nacional em comparação com os demais países. Enquanto para o resto do mundo somente 28% da energia elétrica tem origem de fontes renováveis, no Brasil este montante chega a 84%, sendo as usinas hidrelétricas as principais responsáveis pelo valor, compondo 61,9% da matriz (EPE, 2023).

5.2 COEFICIENTES DE EMISSÃO DE CO₂

Estimadas as emissões de CO₂ para o Brasil, determinou-se os coeficientes de emissões com base nos valores adicionados obtidos no IBGE. O coeficiente foi estabelecido pela razão das emissões sobre valor adicionado do setor, representando, portanto, quantos kilogramas de gás são emitidas para cada mil reais de valor adicionado. Os dados de valor adicionado podem ser visualizados na Tabela 3 e os coeficientes de emissões na Tabela 4. Nota-se que a categoria de transportes foi avaliada de forma unificada, dada a agregação nos dados de valor adicionado.

Tabela 3 – Valor Adicionado em milhões de reais e participação por setores econômicos de 2008 a 2020 ⁸

Setores	2008	%	2012	%	2016	%	2020	%
Setor Agropecuário	142.051,18	12,30	161.166,29	10,90	185.757,33	13,46	226.082,44	14,15
Setor Energético	68.960,85	5,97	49.268,88	3,33	63.532,86	4,60	102.215,02	6,40
Setor Comercial	393.904,06	34,12	577.191,21	39,03	578.271,02	41,91	637.316,03	39,90
Setor Público	15.869,70	1,37	22.529,51	1,52	25.896,82	1,88	26.006,71	1,63
Setor de Transportes	63.202,25	5,47	89.927,65	6,08	86.679,01	6,28	80.802,10	5,06
Setor industrial	470.573,24	40,76	578.809,07	39,14	439.622,09	31,86	524.980,40	32,86
Setor Industrial – Cimento	3.792,34	0,33	5.728,44	0,39	1.947,40	0,14	2.528,99	0,16
Setor Industrial – Ferro-gusa e aço	33.105,32	2,87	18.029,04	1,22	11.599,04	0,84	16.286,27	1,02
Setor Industrial – Ferroligas	4.310,13	0,37	3.132,07	0,21	2.732,73	0,20	4.707,69	0,29
Setor Industrial – Mineração e Pelotização	31.549,36	2,73	55.150,80	3,73	23.046,33	1,67	59.716,32	3,74
Setor Industrial – Química	32.539,11	2,82	34.020,65	2,30	35.391,01	2,57	43.405,71	2,72
Setor Industrial – Não-ferrosos e Metalurgia	23.872,92	2,07	21.667,47	1,47	18.621,75	1,35	26.711,29	1,67
Setor Industrial – Têxtil	7.660,52	0,66	7.483,74	0,51	5.959,94	0,43	6.282,18	0,39
Setor Industrial – Alimentos e Bebidas	61.454,92	5,32	93.855,75	6,35	91.139,81	6,61	113.698,95	7,12
Setor Industrial – Papel e Celulose	15.512,28	1,34	15.867,73	1,07	17.455,79	1,27	17.996,36	1,13
Setor Industrial – Cerâmica	3.867,02	0,33	4.760,12	0,32	3.757,00	0,27	4.320,16	0,27
Setor Industrial – Outras Indústrias	252.909,33	21,91	319.113,25	21,58	227.971,30	16,52	229.326,50	14,36
Total (Milhões R\$)	1.154.561,28	100	1.478.892,61	100	1.379.759,14	100	1.597.402,70	100

Fonte: Adaptado de IBGE.

⁸ Valores extraídos das Pesquisas Estruturais Empresariais e do Sistema de Contas Nacionais e agrupados nos setores conforme classes CNAE's. Para mais detalhes, verificar subseção 3.1.1 dos procedimentos metodológicos.

Tabela 4 – Coeficientes de emissão de CO₂ ⁹

Setores	2008	2012	2016	2020
Setor Agropecuário	105,95	102,05	88,11	80,09
Setor Energético	381,41	478,01	421,39	231,14
Setor Comercial	4,50	2,92	2,47	1,91
Setor Público	111,73	36,48	30,30	29,37
Setor de Transportes	2.266,07	2.094,12	2.133,11	2.134,35
Setor Industrial	217,10	196,96	229,77	172,02
Setor Industrial – Cimento	2.857,25	2.432,56	5.754,97	4.135,78
Setor Industrial – Ferro-gua e aço	1.254,17	2.552,00	3.633,69	2.557,74
Setor Industrial – Ferroligas	122,30	132,60	104,43	77,47
Setor Industrial – Mineração e Pelotização	246,54	133,80	243,89	60,13
Setor Industrial – Química	434,24	409,58	362,64	244,62
Setor Industrial – Não-ferrosos e Metalurgia	324,87	565,07	584,55	333,92
Setor Industrial – Têxtil	147,26	130,95	99,97	81,06
Setor Industrial – Alimentos e Bebidas	52,85	36,63	34,25	24,79
Setor Industrial – Papel e Celulose	218,45	241,30	230,89	221,99
Setor Industrial – Cerâmica	1175,24	1031,12	1212,66	886,92
Setor Industrial – Outras Indústrias	28,88	21,72	25,13	15,46
Total (kg CO₂/R\$ 1000 VA)	248,81	244,17	251,32	202,48

Fonte: Estimativas próprias do estudo.

Os resultados estão em linha com as emissões de CO₂, sendo que, no geral, os setores mais poluentes são também aqueles com os maiores coeficientes. O setor de transportes é quem apresenta o pior coeficiente, emitindo 2.134,35 kg de CO₂ para cada mil reais adicionados. No entanto, ao avaliarmos as atividades do setor industrial, duas delas superam o setor de transportes exibindo piores coeficientes de emissão, a produção de cimento com um coeficiente de 4.135,75 kg de CO₂/ R\$ 1000 VA e o setor de ferro-gusa e aço com um coeficiente de 2.557,74 kg de CO₂/ R\$ 1000 VA. No lado oposto, o setor comercial apresenta o menor coeficiente, com um valor de 1,91 kgCO₂/\$ 1000 VA.

No tempo, todos os setores da economia exibiram uma redução no coeficiente de emissão, com excessão de algumas atividades do setor industrial, sendo elas a produção de cimento, ferro-gusa e aço, não-ferrosos e outros metalurgia e papel e celulose. Entre as quedas, o setor de mineração e pelotização foi o que apresentou maior contração do

⁹ Valores apurados pela razão das emissões de CO₂ do setor ou atividade sobre seu valor adicionado bruto, representa qauntos kg de CO₂ são emitidos para cada mil reais de VA. Para mais detalhes, verificar subseção 3.1.1 dos procedimentos metodológicos

coeficiente, passando de 246,54 para 60,13 kg de CO₂/ R\$ 1000 VA, uma redução de 75,61%.

Generalizando para a economia brasileira, os coeficientes de emissão tiveram uma redução considerável, passando de 248,81 em 2008 para 202,48 kg de CO₂/R\$1000 VA em 2020, uma diminuição de 18,62%.

Visando confrontar os resultados brasileiros com outras regiões do mundo, elaborou-se também uma comparação entre coeficientes de emissão de CO₂ em relação ao produto interno bruto em dólares de 2015 que podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente de emissão de CO₂ em relação ao produto interno bruto em dólar americano a preços de 2015 ¹⁰

Coeficiente de Emissão	2008	2012	2016	2020
Brasil	195	201	201	185
Mundo	461	458	417	387
BRICS (excluindo o Brasil)	1.091	897	830	744
G7	286	260	234	200

Fonte – Valores brasileiros estimados pelo estudo e valores internacionais adaptados de Agência Internacional de Energia.

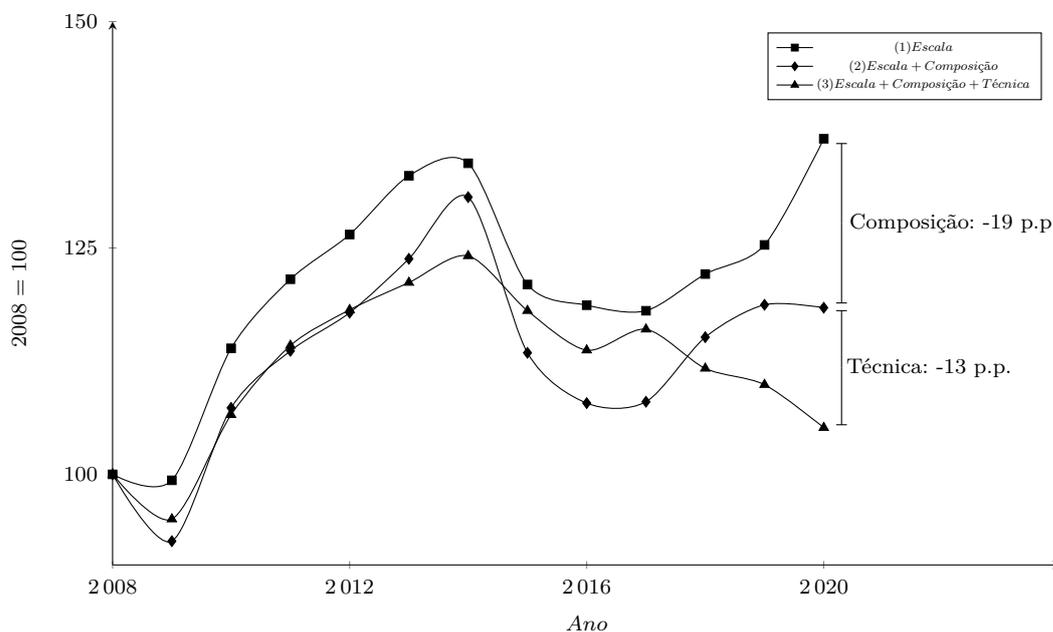
Podemos identificar que frente as demais regiões selecionadas, o coeficiente brasileiro é significativamente menor para todos os períodos, indicando uma menor intensidade de poluição para a economia brasileira quando comparada às demais, inclusive em relação a países mais desenvolvidos como os que compõem o G7. Os países do BRICS (excluindo o Brasil) são os que apresentam os piores coeficientes de emissão, com mais que o dobro em relação ao resto do mundo. Nota-se também que para todos as regiões e grupos econômicos podemos observar uma redução do coeficiente quando comparado entre 2020 e 2008, fator que denota uma melhora nas técnicas produtivas para todas os grupos.

5.3 DECOMPOSIÇÃO DOS EFEITOS ESCALA, COMPOSIÇÃO E TÉCNICA

A partir da construção dos fatores de emissão, pôde-se decompor as emissões de dióxido de carbono no Brasil nos efeitos escala, composição e técnica. A Figura 3 ilustra a análise para o período de 2008 a 2020.

¹⁰ Coeficientes de emissão de CO₂ em razão do produto interno bruto em dólares americanos de 2015. Valores brasileiros estimados pelo estudo, enquanto os valores internacionais foram adaptados dos Dados Estatísticos de Energia fornecidos pela Agência Internacional de Energia. Exclui-se o Brasil das estimativas para o BRICS

Figura 3 – Decomposição das emissões de Dióxido de Carbono no Brasil entre 2008 e 2020 (2008 = 100) ¹¹



Fonte: Estimativas próprias do estudo.

A linha 1 representa a evolução do valor adicionado deflacionado pelo índice nacional de preços ao consumidor amplo (IPCA) e está dimensionada de modo que o valor de 2008 seja igual a 100. Nela, assumimos que a composição dos setores da economia e as técnicas produtivas não se alteraram, isto é, a participação dos setores e os modos de produção permaneceram inalterados em toda a série. O crescimento de 37% é o efeito escala.

A linha 2 é o produto do coeficiente de emissão de CO₂ em 2008 pelo valor adicionado de cada atividade no tempo. Ela representa como seria se todas as indústrias fabricassem no período com as mesmas técnicas produtivas de 2008. É a combinação dos efeitos escala e composição. Juntos tiveram um crescimento de 18% entre 2008 e 2020.

Por fim, a linha 3 representa as emissões de CO₂ das atividades econômicas no tempo, dimensionados de forma que o ano de 2008 equivale a 100. O crescimento de 5% representa a atuação dos efeitos escala, composição e técnica combinados sobre os níveis de emissão.

Dito isso, o efeito composição é a diferença entre as linhas 2 e 1 da Figura 3. O

¹¹ Trajetória dos efeitos escala, composição e técnica no tempo, sendo: a linha 1 a atuação de somente o efeito escala; a linha 2 atuação do efeito escala e composição em conjunto, e; a linha 3 a atuação dos efeitos escala, composição e técnica unidos. A subtração da linha 2 pela 1 resulta no efeito composição isoladamente e a subtração da linha 3 pela 2 resulta no efeito técnica. As séries foram estimadas pelo estudo, para mais detalhes, verificar a seção de procedimentos metodológicos.

efeito escala foi responsável pelo crescimento de 37% das emissões, enquanto o efeito escala e composição juntos foram representaram um aumento de 18%, logo, o efeito composição por si só colaborou com um decréscimo de 19 p.p. nas emissões do poluente em relação ao ano base, ou seja, uma contribuição relativa de 59,37% sobre as reduções.

Já o efeito técnica é a diferença entre as linhas 2 e 3 na Figura 3. Os efeitos escala, composição e técnica juntos foram responsáveis por um incremento de 5% nas emissões de CO₂. Por sua vez, os efeitos composição e escala combinados participaram com um aumento de 18%. Portanto, o efeito técnica isoladamente instigou uma queda de 13 p.p., ou, em outros termos, uma parcela de 40,62% sobre a queda nas emissões do poluente.

É um resultado esperado e de acordo com o estudos para outras nações, entretanto, se diferencia no peso dos efeitos composição e técnica, uma vez que, via de regra, o efeito composição costuma contribuir para a redução das emissões, mas com uma participação menor em relação ao efeito técnica. O estudo de referência, de Levinson (2009), por exemplo, constatou que para os Estados Unidos, entre 1983 e 2001, o efeito técnica teve a maior influência entre as emissões dos poluentes SO₂, NO₂, CO e VOC_s, sendo que, para os 4 poluentes combinados, o efeito composição foi responsável por apenas 22% das reduções, enquanto que, para os componentes orgânicos voláteis (VOC_s), o efeito composição chegou a representar somente 5% das reduções de emissões. Situações semelhantes são descritas por Tsurumi e Managi (2010) e Shahbaz *et al.* (2019), em que tanto o efeito composição e técnica contribuem para a redução da degradação ambiental, mas com a menor porção tendo origem via efeito composição. Conforme descrito por Copeland, Shapiro e Taylor:

“No geral, esta comparação entre países reflete em grande medida as conclusões de estudos anteriores específicos para cada país – a técnica, mais do que a composição ou o efeito escala, é responsável pela maior parte da alteração nas emissões. A maioria dos estudos, inclusive para os EUA, Canadá, UE e muitos outros países, geralmente conclui que a grande maioria das mudanças na poluição ocorre devido à técnica, e não à escala ou composição (COPELAND; SHAPIRO; TAYLOR, 2021, p. 19).”

Além disso, é importante destacar que entre os anos de 2015 e 2018 outra situação atípica é observada com o efeito técnica contribuindo para o aumento das emissões de dióxido de carbono, visto que a linha 3 se encontrava acima da linha 2. O período é marcado por uma recessão econômica na economia brasileira que resultou em uma redução no tamanho da economia e em mudanças na sua composição, de modo que tanto o efeito composição quanto o efeito escala atuaram para a redução da emissões. Entretanto, as emissões totais de CO₂ tiveram uma redução de menor magnitude no período, resultando em piores coeficientes de emissão e, por consequência, uma colaboração do efeito técnica para o aumento das emissões.

Haja visto estas peculiaridades, para compreender melhor a atuação dos efeitos composição e técnica, os resultados foram desagrupados entre os setores econômicos. Iniciando pelo efeito técnica, entre os setores pesquisados, conforme Tabela 6, temos que todos contribuíram evitando o crescimento das emissões de CO₂, sendo o setor energético aquele que mais contribuiu, com 5 dos 13 p.p. reduzidos, seguido pelos setores de transportes (4), agropecuário (2), industrial (1) e público(1).

Tabela 6 – Desagrupando o efeito técnica entre os setores ¹²

Setores	Pontos percentuais
Setor Agropecuário	-2
Setor Energético	-5
Setor Comercial	0
Setor Público	-1
Setor de Transportes	-4
Setores Industrial	-1
Setores Industrial (exceto Ferro-gusa e Aço)	-8
Setor Industrial - Ferro-gusa e Aço	7
Total	-13

Fonte – Estimativas próprias do estudo.

Esta análise leva em conta a melhoria nos coeficientes de emissão de CO₂ em cada setor e sua participação nas emissões totais do poluente. Então, por exemplo, o setor comercial que mesmo tendo uma melhora em seu coeficiente de emissão, se tornando menos intensivo na emissão do gás, acabou tendo pouca contribuição via efeito técnica em razão de sua pequena participação nas emissões totais.

O setor energético, em contrapartida, foi o que mais impactou, evitando o crescimento das emissões de dióxido de carbono em 5 pontos percentuais via efeito técnica. Este setor é caracterizado por possuir uma matriz produtiva limpa, com predominância da geração de energia elétrica por meios renováveis, principalmente por usinas hidrelétricas (EPE, 2023). Entretanto, em certas situações, para atender a demanda por energia, pode utilizar combustíveis fósseis em usinas termelétricas, sendo o uso desses combustíveis nessas circunstâncias a principal origem do aumento dos gases geradores do efeito estufa no setor.

Entre os anos de 2008 e 2020 observou-se para o setor energético uma redução no coeficiente de emissão de 381,41 para 231,14 kg de CO₂ para cada 1000 reais de valor adicionado. Esta queda gera, por consequência, a redução via efeito técnica sobre as emissões totais. Entretanto, ambos os anos utilizados para avaliação do desempenho são marcados pelo baixo consumo de combustíveis fósseis, seja pela menor demanda por

¹² Desagregação do efeito técnica estimado pelo estudo. Foram estimados de modo diferenciado o resultado ao trancar a atuação de somente um dos setores ou atividade nas séries em comparação com o todo.

eletricidade ou pela oferta abundante de energia gerada pelas usinas hidrelétricas. Caso sejam utilizados anos com maior participação das usinas termelétricas, os resultados apresentados podem diferir, como para os anos de 2014 e 2015, em que, em razão de uma temporada de chuvas reduzidas, os usuais 11% de combustíveis fósseis utilizados para a geração de energia elétrica alcançaram o patamar de 20%, tendo, como consequência, uma piora em sua intensidade de emissão, com seu coeficiente de emissão alcançando o valor de 723,13 kg de CO₂/R\$ 1000 VA em 2015 (EPE, 2023).

Ainda assim, ao observar uma matriz de participação dos energéticos do setor, podemos notar que, apesar da geração de eletricidade por usinas hidrelétricas ter acompanhado o crescimento do setor, outras energias renováveis tem ganhado força, especialmente a eólica e solar, mantendo, por enquanto, o consumo de combustíveis fósseis reduzidos quando comparados as outras nações e limitando sua dependência das chuvas.

Quanto ao setor de transportes, também se verifica uma redução no seu coeficiente de emissão de CO₂, diminuindo no período de 2.266,07 para 2.134,35 kg de CO₂/ R\$ 1000 VA. Apesar da queda ser relativamente pequena em relação ao setor energético, por ser o setor que mais emite gás carbônico para geração de energia, acaba tendo uma redução significativa via efeito técnica, de 4 pontos percentuais.

Ao analisar a matriz de combustíveis do setor de transportes identifica-se que não houve uma mudança considerável, sendo que em 2008 os combustíveis fósseis correspondiam a 90,6% do consumo e em 2020 pouco reduziram para 90,1%, quase que não contribuindo para a redução.

Assim, outra possibilidade para a diminuição está na melhora da eficiência no consumo de combustíveis da frota de automóveis. Fatores que podem corroborar com a hipótese estão no investimento por parte das montadoras em motores menos poluentes e nos programas do governo federal para controle de poluição do ar por veículos, como o Inovar-Auto. Criado em 2012, este programa buscou estimular ganhos de produtividade na cadeia automotiva com incentivos para o desenvolvimento de carros mais tecnológicos e econômicos. Descontos tributários no imposto sobre produtos industrializados foram dados a partir de 2017 para os automóveis que tiverem contração de pelo menos 15,46% no consumo de combustíveis. Todavia, em um estudo, Moraes e Machado (2015) estimaram que entre 2013 e 2017 houve uma queda de somente 2,7 milhões de toneladas de CO₂ em decorrência do programa, resultado tímido quando comparado as 186 milhões de toneladas emitidas pelo setor em 2017. Ainda assim, pode-se dizer que é um possível fator que contribuiu para a redução na intensidade de emissão nos transportes.

Por fim, um fenômeno curioso ocorre com o setor industrial, que, em um balanço

geral, contribuiu evitando o crescimento das emissões de CO₂ em apenas 1 ponto percentual. Esse resultado é causado por uma atividade produtiva em especial, a atividade industrial de ferro-gusa e aço. Se levarmos em consideração as demais atividades do setor industrial, que não a produção de ferro-gusa e aço, seria perceptível uma redução de 8 p.p. via efeito técnica no período, porém, as atividades produtivas de ferro-gusa e aço quase neutralizam o efeito.

Esta atividade viu sua produção e sua participação em relação ao total de valor adicionado da economia encolherem, no entanto, o dióxido de carbono emitido por ela não acompanhou a queda. Enquanto o valor adicionado desta atividade caiu pela metade, as emissões se mantiveram estáveis em 49 milhões de toneladas de CO₂ no ano, fazendo com que seu coeficiente passasse de 1.254,17 em 2008 para 2.557,74 kg de CO₂/R\$ 1.000 VA em 2020. Isto, aliado a importante representatividade do setor nas emissões totais, culminaram no aumento de 7 p.p. no período.

Os resultados do efeito técnica podem ser entendidos melhor em conjunto com os de composição, assim, seguindo com o desagrupamento do efeito composição, conforme a Tabela 5.3, apenas dois setores tiveram uma contribuição significativa para redução das emissões de CO₂, o setor de transportes, com 4 pontos percentuais e o setor industrial com uma diminuição de 16 pontos percentuais. O setor energético acabou por contribuir com o aumento das emissões, mas em pequena magnitude, apenas 1 ponto percentual.

Tabela 7 – Desagrupando o efeito composição entre os setores ¹³

Setores	Pontos percentuais
Setor Agropecuário	0
Setor Energético	1
Setor Comercial	0
Setor Público	0
Setor de Transportes	-4
Setor Industrial	-16
Setor Industrial (exceto Ferro-gusa e Aço)	-4
Setor Industrial (somente Ferro-gusa e Aço)	-12
Total	-19

Fonte: Estimativas próprias do estudo.

O setor de transportes teve uma sucinta variação na participação do valor adicionado total da economia, passando de 5,85% em 2008 para 5,33% em 2020 e, apesar da pequena mudança, acaba tendo um grande impacto sobre as emissões, uma vez que,

¹³ Desagregação do efeito composição estimado pelo estudo. Foram estimados de modo diferenciado o resultado ao trancar a atuação de somente um dos setores ou atividade nas séries em comparação com o todo.

como informado anteriormente, entre os setores é o que mais emite dióxido de carbono proveniente da geração de energia.

Uma situação similar ocorre com o setor energético, em que, por mais que possua baixa intensidade de emissão, acaba por aumentar as emissões de CO₂ via efeito composição em virtude do ganho de participação na economia brasileira. Entre 2008 e 2020, o setor energético passou de 6,39% do valor adicionado da economia para 6,75%.

Por sua vez, o setor industrial, em função do fenômeno de desindustrialização e de sua alta participação nas emissões de dióxido de carbono, é o que possui maior contribuição via efeito composição para redução nas emissões de dióxido de carbono.

Desindustrialização é um termo utilizado para explicar um fenômeno de perda persistente do emprego industrial no emprego total de uma nação ou região. Foi utilizado inicialmente para explicar a ocorrência da perda relativa do emprego industrial nos países desenvolvidos partir da década de 1970. Porém, mais recentemente o conceito foi ampliado para compreender também a redução do valor adicionado industrial no PIB de um país. Nesse entendimento, uma economia não se desindustrializa necessariamente quando o produto industrial se encontra em queda, mas sim quando a indústria perde importância em termos de emprego ou de valor adicionado (OREIRO; FEIJÓ, 2010). Partindo deste princípio, podemos verificar pelos dados obtidos que houve uma contração na porção de valor adicionado do setor industrial no total da economia, posto que passou de 40,03% em 2008 para 32,58% em 2020¹⁴.

Essa queda na participação, em conjunto com os altos coeficientes de emissões de CO₂ de suas atividades, fizeram com que este setor reduzisse 16 pontos percentuais das emissões totais. Apesar deste resultado positivo do ponto de vista ambiental, o fenômeno da perda de participação da indústria pode trazer outras consequências a produção nacional e impactar a renda. Conforme descrito por Oreiro e Feijó (2010), no pensamento heterodoxo, o setor industrial assume uma característica especial em decorrência de alguns fatores como: encadeamentos mais fortes da indústria com os demais setores, tanto para frente quanto para trás; presença de economias estáticas e dinâmicas de escala, fazendo com que a produtividade seja uma função crescente da produção industrial; as melhoras tecnológicas geralmente tem origem no setor industrial ou são difundidos pelo setor, e; a elasticidade renda das importações de manufaturas é maior do que a elasticidade renda das importações de *commodities* e produtos primários, fator responsável por aliviar a restrição da balança de pagamentos e promover o crescimento de longo prazo. De forma simplificada, nesta corrente de pensamento a indústria assume um papel fundamental para manutenção do

¹⁴ lembra-se que no estudo foram estimados os valores adicionados brutos somente para as classes CNAE presentes no balanço energético nacional e que, por isso, não representam o total da economia.

crescimento de longo prazo e desenvolvimento do país.

Por conseguinte, a redução da importância da indústria na economia, além de impactar via efeito composição, pode atenuar o crescimento das emissões via efeito escala, mas também gerar consequências negativas sobre o efeito técnica. Como, por exemplo, na atividade de ferro-gusa e aço, que proporcionou maior impacto sobre a redução das emissões via efeito composição, contribuindo com a redução de 12 dos 16 p.p. atribuídos ao setor.

A produção de ferro-gusa e aço atua na transformação de minérios ferrosos em produtos metalúrgicos como placas, lingotes, chapas, bobinas, fio máquina, vergalhão, e folhas de metálicas com finalidade de atender as necessidades destes materiais intermediários às outras atividades produtivas. Utiliza majoritariamente uma produção via rota integrada para redução do óxido de ferro a ferro-gusa e posterior refino para aço, uma técnica produtiva reconhecida pelo uso de alto fornos abastecidos por combustíveis com fatores de emissão de CO₂ elevados, principalmente pelo coque de carvão mineral, carvão vegetal, carvão mineral e gás de coqueria. Em função disto, em 2020 chegou a representar 46% das emissões do setor industrial.

Seu principal insumo, o minério de ferro, é produzido largamente no território nacional, sendo que em matéria de produção e reservas mundiais o Brasil ocupava em 2013 a segunda colocação para ambos, atrás somente da Austrália (CARVALHO *et al.*, 2014). No tempo, a produção deste insumo tem crescido para atender principalmente ao crescimento da demanda chinesa, no entanto, o mercado brasileiro de produção de ferro-gusa e aço tem visto sua produção encolher. Segundo dados do Anuário Estatístico do Instituto Aço Brasil (2021), entre 2008 e 2020 a produção passou de 35 mil para 24 mil toneladas.

Observando o faturamento, o mercado interno é quem assume a responsabilidade pela queda em função de uma fraca demanda pelo produto. O valor de produção desta atividade até tem apresentado certo crescimento, porém, os custos de produção aumentaram em um maior ritmo, fazendo com que o valor adicionado se reduzisse no tempo, gerando uma redução significativa na participação do setor na economia, que passou de 2,82% em 2008 para 1,01% em 2020. Estes fatores, a alta emissão de gás carbônico e a perda de espaço da atividade frente às demais, resultaram na redução via efeito composição de 12 p.p. nas emissões de CO₂ no período.

Contudo, conforme mencionado anteriormente, apesar da queda na participação deste setor, suas emissões permaneceram estagnadas, culminando em uma piora no seu coeficiente de emissão e em uma contribuição para aumento nas emissões via efeito técnica.

Caso a mesma perda de importância venha a ocorrer com os demais setores industriais, verificaremos, possivelmente, que as indústrias nacionais possuirão piores técnicas produtivas, apesar de sua menor participação na economia, podendo, dependendo da magnitude de atuação de cada efeito, piorar ou contribuir para as emissões de poluentes. No caso das atividades produtivas de ferro-gusa e aço, a melhoria via efeito composição superou o aumento de emissões causado via efeito técnica.

Hipotetiza-se que as atividades produtivas de ferro-gusa e aço, além da queda da demanda interna, tiveram que competir com o ferro e aço provenientes de importação, tendo que utilizar de técnicas mais "suja" para baratear seu preço e manter sua competitividade no mercado, piorando seus níveis de intensidade de emissão. Entretanto, necessitam-se elaborar mais estudos para corroborar com a suposição.

6 CONCLUSÃO

Objetivou-se com este trabalho decompor as emissões de dióxido de carbono para o Brasil nos efeitos escala, composição e técnica. Para isso, fez-se inicialmente uma revisão da literatura acerca da relação entre emissões de gases causadores do efeito estufa e demais poluentes com a renda de um país ou região, mais especificamente relacionadas a teoria da Curva de Kuznets Ambiental.

Observou-se que as primeiras preocupações sobre a relação entre meio ambiente e a produção econômica datam do final da década de 1960, início de 1970, com receios quanto a possibilidade de manutenção do crescimento produtivo frente a finitude dos recursos ambientais. É nesse período também que surge a concepção inicial da CKA com a teoria da intensidade do uso, conceito que associa a procura por materiais com o nível de renda de uma economia.

Idealizada posteriormente, a curva de Kuznets ambiental relaciona o nível de renda com as emissões de um poluente para uma determinada economia. Estabelece uma relação de “U” invertido, em que, nos estágios iniciais de uma economia as emissões do poluente são crescentes, mas, que na medida em que se continua a incrementar a renda, passam a se reduzir. Porém, é com a adição dos efeitos escala, composição e técnica por Grossman e Krueger (1991) que esta teoria ganha destaque e recebe um novo poder explicativo. Em seu estudo, os autores utilizaram desses efeitos para inferir o impacto do estabelecimento do Acordo de Livre Comércio da América do Norte sobre as emissões de determinados poluentes no México. Os resultados enunciaram uma redução nas emissões após a instauração do acordo, ideia que contrariava o pensamento hegemônico da época, pois, além de levar em conta o crescimento das emissões causado pelo aumento da escala da produção mexicana, já previsto pela comunidade ambientalista, considerou também a atuação dos efeitos composição e técnica sobre elas.

Em seguida, diversos trabalhos passaram a adicionar esses novos fatores explicativos ao avaliar a trajetória de poluição em determinada economia. Um deles foi o de Levinson (2009), que buscou entender a dinâmica das emissões de 4 poluentes em relação a renda norte-americana de 1983 a 2001. Seus resultados foram de encontro com demais estudos, evidenciando um crescimento das emissões via efeito escala e redução via efeitos composição e técnica, sendo o efeito técnica dominante na ação de mitigar as emissões. Contudo, além dos resultados, Levinson (2009) contribuiu com uma nova metodologia para estimação dos efeitos sobre as emissões de algum poluente, estabelecendo um modelo baseado em 3 variáveis, sendo elas: o valor adicionado total da economia, a participação de cada setor econômico e o coeficiente de emissão de cada setor.

Baseado nesta metodologia, sucedeu o segundo objetivo do trabalho de coletar as variáveis ambientais e econômicas para consecutiva aplicação sobre o modelo. O poluente avaliado foi o dióxido de carbono, principal gás derivado da queima de combustíveis fósseis e, uma vez que, necessitava-se de suas emissões desagregadas por setor, fez-se com base na metodologia descrita pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas a estimação para as emissões de CO₂ derivadas da geração de energia no país. Os dados de consumo de combustíveis foram fornecidos pela Empresa de Pesquisas Energéticas em seu Balanço Energético Nacional, bem como os fatores de emissão em sua nota técnica nº11/2022. Ao passo que na categoria econômica foram extraídos e agrupados com base nas classes CNAE's para cada setor econômico dados de valor adicionado bruto das Pesquisas Estruturais em Empresas e do Sistema de Contas Nacionais.

Finalizada a apuração das variáveis, se susseceu o terceiro e último objeto do estudo, aplicar os dados coletados sobre o modelo proposto. Os resultados encontrados evidenciam um crescimento das emissões em 5% para o período, sendo que, o efeito escala contribuiu com um aumento de 37%, o efeito composição com uma redução de 19% e o efeito técnica com uma redução de 13%.

Desagregando o resultado do efeito composição entre os setores temos que os de transporte e industrial são aqueles que mais apresentaram mudanças significativas para a queda nas emissões. O setor de transportes, em função de ser o maior emissor do gás, contribuiu com uma diminuição de 4 pontos percentuais derivados de uma pequena perda de participação no VA total da economia. Enquanto o setor industrial teve uma contribuição bem mais expressiva, de 16 p.p., fruto da desindustrialização da economia brasileira. O fenômeno de desindustrialização foi entendido como a perda de espaço das atividades industriais no valor adicionado total da economia, fator corroborado pela perda de 7,45 p.p na participação do setor industrial entre os demais estudados para o período. Dentre as atividades industriais, uma se destacou em relação as outras, a atividade produtiva de ferro-gusa e aço, que, sozinha, contribuiu reduzindo 12 dos 16 pontos percentuais. Esta atividade é marcada pelo alto consumo de combustíveis fósseis em seus fornos e, por isso, representa a maior parte das emissões do setor industrial. Em razão disto e de uma redução expressiva de sua atividade produtiva, acabou contribuindo para a maior parte da redução nas emissões.

Na desagregação do efeito técnica vemos uma contribuição para redução das emissões de CO₂ de todos os setores, com destaque para o setor energético e de transportes. O setor energético apresentou contribuiu com a redução de 5 p.p., fruto de uma melhora de seu coeficiente de emissão e de sua significativa participação nas emissões. Entretanto, nota-se que também pode trabalhar no sentido contrário em certos momentos, visto que, em virtude de períodos de estiagem utiliza de usinas termoelétricas para geração de ele-

tricidade, contribuindo assim para o aumento das emissões. Já o setor de transportes também viu seu coeficiente de emissão melhorar no período, possivelmente em função de uma melhora na eficiência energética da frota de automóveis. Algumas atitudes das montadoras de veículos e programas governamentais podem ter contribuído para esse aumento de eficiência, gerando como resultado uma redução de 4 p.p. nas emissões de CO₂. Por fim, um fenômeno curioso é visualizado no setor industrial, que, em um balanço geral, contribuiu com a redução de apenas 1 p.p. via efeito técnica. Porém, quando avaliamos suas atividades de forma desagrupada, percebe-se que a atividade de ferro-gusa e aço contribui com um aumento de 7 p.p., quase neutralizando a queda de 8 pontos percentuais resultante das demais atividades. Esse fenômeno ocorre pois, apesar do setor ter visto sua produção reduzir, bem como seu valor adicionado, as emissões de CO₂ permaneceram estagnadas, ocasionando uma piora em seu coeficiente de emissão, que, aliado com sua participação relevante nas emissões totais, resultou neste episódio.

Em suma, observamos uma melhora nas emissões de dióxido de carbono para o Brasil, seja via efeito técnica com a melhora no coeficiente de emissão da economia ou via efeito composição com a reorganização da economia para setores menos intensivos na emissão de CO₂. No entanto, por mais que a diminuição dos coeficientes de emissão seja significativa, se levarmos em consideração que, em relação aos demais países, já se encontra em um patamar baixo, pode vir a ter dificuldades para prosseguir nessa tendência. Ao mesmo tempo, caso a melhora das técnicas venha sobre o setor de transportes, pode proporcionar uma redução muito significativa para a economia, visto a centralidade desse setor sobre as emissões de CO₂, em que pequenas reduções no coeficiente de emissão deste setor podem resultar em um grande impacto sobre as emissões. Além disso, nota-se que as intensidades de emissões são também substancialmente dependentes do setor energético e sua demanda por eletricidade originária de usinas termoeletricas. Assim, se enfatiza a necessidade de diversificação das fontes de energia renováveis para redução da dependência das chuvas a fim de manter o baixo nível de emissões.

Ja reorganização da economia entre os setores produtivos deriva de um processo de desindustrialização, com substituição da participação das atividades industriais pelo comércio. No pensamento neoclássico a ocorrência de perda da importância industrial é irrelevante, porém, em teses heterodoxas esse setor recebe uma atenção a mais, pois apresentaria retornos crescentes de escala, fundamentais para a sustentação do crescimento de longo prazo, além de ser a principal origem das inovações tecnológicas e redução da dependência externa. Com isso, mesmo que inicialmente esta queda de participação da indústria incorra na queda das emissões de CO₂, pode vir a atuar de forma contrária sob o efeito técnica, principalmente por possivelmente afetar a renda nacional e, por consequência, os coeficientes de emissão. Esta ocorrência já pode ser vista nas atividades produtivas de ferro-gusa e aço, as quais atuaram reduzindo as emissões de CO₂ via efeito

composição, mas que via efeito técnica acabaram por contribuir com um aumento.

Para trabalhos futuros sugere-se que sejam adicionadas variáveis de exportação e importação entre setores ao modelo para que seus impactos sejam avaliadas em conjunto sobre as emissões do poluente. Essa adição permitiria uma melhor compreensão de cada efeito, em especial, ao efeito composição e ao processo de desindustrialização, com possíveis repercussões em decorrência da substituições de produtos industriais nacionais por importados.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, André Luiz Campos de; MATTEI, Lauro. Consumo Energético e Emissões de CO₂: Uma Análise do Setor de Transportes Brasileiro, p. 1–14, 2012. Disponível em: <https://necat.ufsc.br/files/2012/09/ArtAndre-Lauro-ANPEC-2011-TRANSPORTES.pdf>.
- ANSARI, Mohd Arshad; KHAN, N.A. Decomposing the trade-environment nexus for high income, upper and lower middle income countries: What do the composition, scale, and technique effect indicate? **Ecological Indicators**, Elsevier BV, v. 121, p. 107122, fev. 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107122. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107122>.
- ARROW, Kenneth. Economic growth, carrying capacity, and the environment. **Ecological Economics**, [S. L.], v. 15, n. 2, p. 1–39, nov. 1995. Disponível em: <https://www.nber.org/papers/w3914>.
- BAKEHE, Novice patrick. Decomposition of the Environmental Kuznets curve for Deforestation in the Congo Basin. **Economics Bulletin**, v. 38, n. 2, p. 1058–1068, 2018.
- BIAGE, Milton; ALMEIDA, Helberte J. F. Desenvolvimento e Impacto Ambiental: uma análise da curva ambiental de kuznets. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, [S. L.], v. 45, n. 3, p. 505–556, 2015. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6100/5/PPE_v45_n03_Desenvolvimento.pdf. Acesso em: 24 set. 2022.
- BRASIL, Instituto Aço. Anuário Estatístico. Rio de Janeiro, p. 1–9, 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>.
- BRASIL, Ministério de Ciência e Tecnologia. Emissões de Dióxido de Carbono por Queima de Combustíveis: abordagem *top-down*. **Relatórios de referência: primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**, Brasília, MCI, 2006.
- BRASIL, Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume III, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc>.
- BROCK, William A.; TAYLOR, M. Scott. Economic Growth and the Environment: a review of theory and empirics. **Handbook Of Economic Growth**, [S. L.], p. 1749–1821, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574068405010282>. Acesso em: 24 set. 2022.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de *et al.* Minério de ferro. **BNDES Setorial**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 197–233, mar. 2014. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4802>.

CHERNIWCHAN, Jevan; TAYLOR, M. Scott. International Trade and the Environment: three remaining empirical challenges. **National Bureau Of Economic Research**, [S.L.], p. 1–48, mai. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ee/a/h4qG95LzQSz7LJVB6CRHSXN/?lang=pt>. Acesso em: 24 set. 2022.

COPELAND, Brian; SHAPIRO, Joseph; TAYLOR, M. Scott. Globalization and the Environment. **National Bureau Of Economic Research**, [S.L.], v. 40, n. 3, p. 1–99, mai. 2021. Disponível em: <https://www.nber.org/papers/w28797>. Acesso em: 22 set. 2022.

CROWSON, Phillip. Intensity of use reexamined. **Mineral Economics**, Springer Science e Business Media LLC, v. 31, n. 1-2, p. 61–70, ago. 2017. DOI: 10.1007/s13563-017-0113-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13563-017-0113-z>.

DINDA, Soumyananda. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. **Ecological Economics**, Elsevier BV, v. 49, n. 4, p. 431–455, ago. 2004. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.02.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>.

EPE, Empresa de Pesquisas Energéticas. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>.

GENHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre – RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GROSSMAN, Gene; KRUEGER, Alan. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. **National Bureau Of Economic Research**, [S. L.], p. 1–39, nov. 1991. Disponível em: <https://www.nber.org/papers/w3914>. Acesso em: 22 set. 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PAC - Pesquisa Anual de Comércio, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/comercio/9075-pesquisa-anual-de-comercio.html?=&t=o-que-e>.

_____. PAIC - Pesquisa Anual da Indústria da Construção, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html?=&t=o-que-e>.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PAS - Pesquisa Anual de Serviços, 2024. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/servicos/9028-pesquisa-anual-de-servicos.html?=&t=o-que-e>.

_____. PIA-Empresa - Pesquisa Industrial Anual - Empresa, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9042-pesquisa-industrial-anual.html?=&t=o-que-e>.

_____. SCN - Sistema de Contas Nacionais, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=o-que-e>.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, 1996.

KHAN, Azra; SAFDAR, Sadia; NADEEM, Haris. Decomposing the effect of trade on environment: a case study of Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer Science e Business Media LLC, ago. 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-21705-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21705-w>.

LEVINSON, Arik. Technology, International Trade, and Pollution from US Manufacturing. **American Economic Association**, [S.L.], v. 99, n. 5, p. 2177–2192, 2009. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/25592554#metadata_info_tab_contents. Acesso em: 17 set. 2022.

LUCENA, André Forssard Pereira de. Estimativa de uma Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao uso de energia e suas implicações para as emissões de carbono no Brasil. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2005/1099-estimativa-de-uma-curva-de-kuznets-ambiental-aplicada-ao-uso-de-energia-e-suas-implicacoes-para-as-emissoes-de-carbono-no-brasil>.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo – SP: Atlas, 2003.

MORAES, Natália G. de; MACHADO, Bernardo V. Z. Impacto do Inovar-Auto nas Emissões Veiculares. *In*: ANAIS do XXIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. [S.l.]: Editora Edgard Blücher, set. 2015. (SIMEA 2015). DOI: 10.5151/engpro-simea2015-pap146. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/engpro-simea2015-PAP146>.

OREIRO, José Luis; FEIJÓ, Carmem A. Desindustrialização: conceituação, causas, efeitos e o caso brasileiro. **Revista de Economia Política**, FapUNIFESP (SciELO), v. 30, n. 2, p. 219–232, jun. 2010. ISSN 0101-3157. DOI:

10.1590/s0101-31572010000200003. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1590/S0101-31572010000200003>.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo – RS: Feevale, 2013.

SHAHBAZ, Muhammad *et al.* The technical decomposition of carbon emissions and the concerns about FDI and trade openness effects in the United States. **International Economics**, Elsevier BV, v. 159, p. 56–73, out. 2019. DOI: 10.1016/j.inteco.2019.05.001. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.inteco.2019.05.001>.

STERN, David. The Environmental Kuznets Curve: a primer. [S.L.], v. 40, n. 3, p. 1–23, 2014. Disponível em: <https://econpapers.repec.org/paper/eencepwp/1404.htm>. Acesso em: 1 out. 2022.

TSURUMI, Tetsuya; MANAGI, Shunsuke. Decomposition of the environmental Kuznets curve: scale, technique, and composition effects. **Environmental Economics and Policy Studies**, Springer Science e Business Media LLC, v. 11, n. 1-4, p. 19–36, fev. 2010. DOI: 10.1007/s10018-009-0159-4. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s10018-009-0159-4>.