

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

SÁVIO LOPES TRINDADE

**IMPACTO ECONÔMICO E DESCARBONIZAÇÃO DOS GANHOS DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TRANSPORTES NO BRASIL**

JUIZ DE FORA - MG
2025

SÁVIO LOPES TRINDADE

**IMPACTO ECONÔMICO E DESCARBONIZAÇÃO DOS GANHOS DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TRANSPORTES NO BRASIL**

Monografia apresentada ao curso de
Ciências Econômicas da Universidade Federal
de Juiz de Fora, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Ciências
Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Admir A. Betarelli Junior

JUIZ DE FORA - MG
2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Trindade, Sávio Lopes.

Impacto econômico e descarbonização dos ganhos de eficiência energética dos transportes no brasil / Sávio Lopes Trindade. -- 2025. 68 p. : il.

Orientador: Admir Antonio Betarelli Junior

Coorientadora: Mariana Armelin Duarte

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Economia, 2025.

1. Eficiência Energética. 2. Transportes. 3. Emissões. 4. Economia. 5. Equilíbrio Geral Computável. I. Betarelli Junior, Admir Antonio, orient. II. Duarte, Mariana Armelin, coorient. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
REITORIA - FACECON - Depto. de Economia

FACULDADE DE ECONOMIA / UFJF
ATA DE APROVAÇÃO DE MONOGRAFIA II (MONO B)

Na data de 18/08/2025, a Banca Examinadora, composta pelos professores

- 1 – Admir Antonio Betarelli Junior - orientador;
- 2 – Mariana Armelin Duarte - coorientador; e
- 3 – Weslem Rodrigues Faria,

reuniu-se para avaliar a monografia do acadêmico Sávio Lopes Trindade, intitulada "Impacto econômico e descarbonização dos ganhos de eficiência energética do setor de transportes no Brasil". Após primeira avaliação, resolveu a Banca sugerir alterações ao texto apresentado, conforme relatório sintetizado pelo orientador. A Banca, delegando ao orientador a observância das alterações propostas, resolveu **APROVAR** a referida monografia.



Documento assinado eletronicamente por **Admir Antonio Betarelli Junior, Professor(a)**, em 22/08/2025, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Armelin Duarte, Usuário Externo**, em 22/08/2025, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Weslem Rodrigues Faria, Professor(a)**, em 22/08/2025, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2572037** e o código CRC **7D0B7A48**.

DEDICO ESTE TRABALHO À MINHA FAMÍLIA,
ESPECIALMENTE AOS MEUS PAIS, PELO AMOR, APOIO E
INCENTIVO EM TODOS OS MOMENTOS DA MINHA VIDA.
SEM VOCÊS, NADA DISSO SERIA POSSÍVEL.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Amarildo e Jesalva, por todo amor, dedicação e apoio incondicional ao longo da minha trajetória. Sou grato à minha irmã, Sofia, pela companhia, incentivo e inspiração constantes.

À minha namorada, Kesya, agradeço pelo carinho, compreensão e pela presença fundamental em todos os momentos, especialmente nos mais desafiadores.

Aos colegas de faculdade, que estiveram ao meu lado nessa caminhada, divido essa conquista com vocês. Aprendi e cresci muito graças à convivência, às trocas de experiências e à amizade que construímos.

Estendo meus agradecimentos a toda a minha família, pelo suporte, pela torcida e por acreditarem no meu potencial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Admir A. Betarelli Jr., deixo minha sincera gratidão pela orientação, confiança, paciência e por todo conhecimento compartilhado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha co-orientadora, Mariana Armelin, agradeço pelo acompanhamento dedicado, pelas contribuições valiosas e pelo apoio neste trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora e à Faculdade de Economia pela formação acadêmica de excelência e pelo ambiente de aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

Esta monografia analisa os impactos do aumento da eficiência energética dos transportes sobre a economia brasileira e as emissões de gases do efeito estufa. Para tanto, utilizou-se um modelo de Equilíbrio Geral Computável dinâmico, com módulo fiscal e de emissões, aplicado a quatro simulações distintas, correspondentes aos modais ferroviário, rodoviário, aquaviário e aeroviário, considerando um choque anual de 1% na eficiência da queima de combustíveis ao longo de dez anos. Os resultados mostram que o aumento da eficiência energética tende a impulsionar o crescimento econômico ao mesmo tempo que reduz as emissões de dióxido de carbono, de modo a quebrar o trade-off entre crescimento econômico e meio ambiente. O crescimento se dá principalmente por meio da elevação do consumo das famílias, do salário real e dos investimentos, com efeitos mais intensos nos setores de serviços. Entretanto, verifica-se uma redução na competitividade internacional dos produtos brasileiros devido ao aumento dos preços relativos, resultando em queda das exportações e aumento das importações. Os setores ligados ao refino de petróleo e combustíveis fósseis apresentam retração, enquanto há favorecimento das alternativas sustentáveis, especialmente nos biocombustíveis. Em termos ambientais, todas as simulações indicam redução das emissões de CO₂, sobretudo no modal rodoviário, evidenciando que os ganhos de eficiência energética superam eventuais efeitos rebote. O estudo reforça a importância de políticas de eficiência energética como instrumento para alinhar crescimento econômico e sustentabilidade ambiental, destacando limitações quanto à ausência de análise regional e sugerindo pesquisas futuras que considerem a heterogeneidade da matriz de transportes no Brasil.

Palavras-chave: eficiência energética; transportes; economia; emissões; equilíbrio geral computável.

ABSTRACT

This monograph analyzes the impacts of increased energy efficiency in transportation on the Brazilian economy and greenhouse gas emissions. To this end, a dynamic Computable General Equilibrium model, with fiscal and emissions modules, was applied to four distinct simulations corresponding to the rail, road, waterway, and air transport modes, considering an annual 1% shock in fuel combustion efficiency over ten years. The results show that improvements in energy efficiency tend to foster economic growth while simultaneously reducing carbon dioxide emissions, thus breaking the trade-off between economic growth and environmental sustainability. Growth occurs mainly through higher household consumption, real wages, and investments, with more pronounced effects in the services sector. However, the international competitiveness of Brazilian products declines due to rising relative prices, leading to a decrease in exports and an increase in imports. The petroleum refining and fossil fuel sectors contract, while sustainable alternatives, particularly biofuels, benefit. Environmentally, all simulations indicate reductions in CO₂ emissions, especially in road transport, demonstrating that the gains from energy efficiency outweigh potential rebound effects. The study underscores the importance of energy efficiency policies as a tool to align economic growth with environmental sustainability, while noting limitations such as the absence of regional analysis and suggesting future research that considers the heterogeneity of Brazil's transport matrix.

KEYWORDS: energy efficiency; transport; economy; emissions; computable general equilibrium.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Efeitos dos choques sobre indicadores macroeconômicos.....	46
GRÁFICO 2 – Efeitos dos choques sobre os 3 grandes setores da economia.....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Metas e projeções determinadas para os biocombustíveis na Lei 14.993/2024	22
TABELA 2 – Emissões de CO2 e consumo de combustível por modo de transporte e tipo de carga.....	26
TABELA 3 – Efeitos sobre as principais variáveis macroeconômicas.....	44
TABELA 4 – Efeitos dos choques sobre a renda real das famílias.....	48
TABELA 5 – Efeitos dos choques sobre a utilidade das famílias.....	49
TABELA 6 – Efeitos dos choques sobre setores e produtos	53
TABELA 7 – Setores beneficiados/prejudicados pela ótica do Investimento.....	55
TABELA 8 – Efeitos sobre emissões de CO2e por combustível.....	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Distribuição de modais de transportes de carga por % de TKU.....	24
FIGURA 2 – Estrutura teórica aninhada.....	35
FIGURA 3 – Simulações em modelos EGC dinâmicos	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFE – Análise de Fronteira Estocástica

ANP – Agência Nacional do Petróleo

B3 – Biodiesel 3%

B50 – Biodiesel 50%

B100 – Biodiesel 100%

BIM-RD – Brazilian Intersectoral Model with Recursive Dynamic

CET – Elasticidade Constante de Transformação

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONPET – Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural

CSA – Combustível Sustentável de Aviação

EE – Eficiência Energética

EGC – Equilíbrio Geral Computável

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GEE – Gases do Efeito Estufa

IEA – International Energy Agency

ILOS – Institute of Logistics and Supply Chain

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ktCO₂e – Quilotoneladas de Dióxido de Carbono Equivalente

LMDI – Logarithmic Mean Divisia Index

LES – Linear Expenditure System

MCS – Matriz de Contabilidade Social

PBE Veicular – Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PIB – Produto Interno Bruto

PNDV – Programa Nacional de Diesel Verde

ProBioQAV – Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação

SAF – Sustainable Aviation Fuel

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

TAereo – Transporte Aeroviário

TAqua – Transporte Aquaviário

TFerro – Transporte Ferroviário

TKU – Tonelada-quilômetro útil

TRodo – Transporte Rodoviário

CES – Constant Elasticity of Substitution

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, ECONOMIA E POLÍTICAS	16
2.1 Revisão de Literatura	18
2.2 O transporte de cargas no Brasil	24
2.3 Revisão dos estudos aplicados	28
3 METODOLOGIA	33
3.1 Estrutura teórica	34
4 RESULTADOS	42
4.1 Resultados macroeconômicos	42
4.2 Resultados setoriais	50
4.3 Resultados de emissão	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O transporte de cargas é uma atividade milenar e intrínseca ao desenvolvimento econômico de qualquer sociedade. Embora a partir de meados do século XX as cadeias logísticas conectem mercados em escala global, durante grande parte da história as barreiras naturais, as limitações de comunicação e os elevados custos de deslocamento restringiram significativamente o alcance do comércio. As redes comerciais foram determinantes não apenas para moldar o desenvolvimento das sociedades, mas também para a disseminação de conhecimento e cultura. Independentemente de serem mercadores a cavalo ou camelo atravessando a Rota da Seda, comerciantes cruzando o Saara ou navegadores em rotas marítimas, todos eles transportavam não apenas mercadorias, mas também ideias, costumes, estilos de vida e religiões (ROBINSON, 2024).

Graças ao desenvolvimento técnico dos transportes e das comunicações, o fenômeno conhecido como globalização pode se concretizar, e o mundo do século XXI é diferente daquele habitado pelos mercadores de especiarias que cruzavam a Ásia. A substituição das caravanas a cavalo pelo trem e das galés pelos navios cargueiros barateou o custo de transportes e abriu avenidas de expansão lucrativas para a periferia do mundo. A criação de cadeias de produção mundiais favoreceu o acesso de países de baixa renda aos produtos industrializados e permitiu a industrialização tardia de muitos deles, com graus variados de sucesso (MONTESINOS; CONNORS; GWARTNEY, 2020).

A atual organização econômica mundial, marcada pela forte dependência dos transportes e pela crescente integração de mercados geograficamente distantes, tem provocado um aumento significativo no consumo de combustíveis. Embora estes desempenhem papel central no desenvolvimento econômico das sociedades, a queima de combustíveis fósseis no setor de transportes constitui uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE) (SEEG, 2023). A literatura econômica reconhece essa relação como um trade-off entre crescimento econômico e conservação ambiental, na medida em que o avanço produtivo e tecnológico frequentemente ocorre às custas dos ecossistemas, em razão das externalidades negativas associadas às atividades humanas. Entre essas externalidades, as emissões de GEE assumem papel de destaque no debate contemporâneo, visto que têm sido amplamente identificadas como um dos fatores responsáveis pelo aumento da temperatura média global e pela intensificação de diversos efeitos adversos (NUNES et al., 2023).

No setor de transportes, uma das políticas possíveis para mitigar esse conflito consiste no aumento da eficiência do uso de combustíveis (IEA, 2019a). Ganhos de eficiência permitem realizar mais trabalho com a mesma quantidade de combustível, mantendo constante o volume de emissões. Essa dinâmica rompe com a dicotomia tradicional entre crescimento econômico e sustentabilidade, ao mesmo tempo em que eleva o excedente produtivo da economia por meio da redução dos custos de transporte.

Por este motivo, esforços têm sido feitos para compreender o impacto das políticas de eficiência de combustíveis, inclusive possíveis efeitos adversos, sobre as economias. Diante deste cenário, o presente trabalho procura contribuir para o entendimento do tema e se destaca em meio à literatura corrente por lançar mão de um modelo de Equilíbrio Geral Computável Nacional (EGC) para investigar a magnitude do impacto sobre a economia e o meio ambiente simultaneamente. O foco do estudo recai sobre a economia nacional brasileira e quatro de seus principais modais para o transporte de cargas, o Ferroviário, Rodoviário, Aquaviário e Aeroviário.

O modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) permite separar com precisão os segmentos de transporte público e privado, além de captar as alterações decorrentes de melhorias na eficiência desses setores. Sua estrutura proporciona uma base sólida para avaliar de que forma choques externos se refletem nos resultados econômicos e setoriais do país. O modelo também integra um componente específico para mensuração das emissões, possibilitando analisar o efeito de políticas sobre os gases de efeito estufa. Assim, essa abordagem permite compreender como os ganhos em eficiência energética afetam o comportamento de agentes econômicos.

Além deste primeiro capítulo introdutório, a presente monografia é composta por mais quatro capítulos. O segundo capítulo aborda os principais estudos teóricos e empíricos estudados para este trabalho. O terceiro apresenta em detalhes a metodologia utilizada e o choque cujos resultados são explorados no quarto capítulo. O quinto e último capítulo tece uma conclusão e apresenta as conclusões finais a respeito desta monografia.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, ECONOMIA E POLÍTICAS

No ano de 2030, as projeções estimam que a população humana global atinja a marca de 8.5 bilhões de pessoas (ONU, 2022). Uma população maior aumentará a demanda mundial por serviços de saúde que melhorem a qualidade e a duração da vida, bem como a demanda por recursos naturais essenciais: alimentos, ração animal, fibras para vestuário e habitação, água limpa e principalmente energia.

Para satisfazer essa crescente demanda a oferta de bens e serviços terá de aumentar de forma proporcional, ao mesmo tempo que são demandados mais recursos para melhorar a qualidade de vida do contingente populacional já existente. No entanto, a forma como os recursos naturais vêm sendo utilizados e explorados nas últimas décadas tem colocado em risco a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres e comprometido a disponibilidade futura de alguns desses recursos, que podem tornar-se escassos a longo prazo, seja por sua natureza finita ou por práticas de uso inadequadas (OCDE, 2009).

Apesar de sua natureza finita e potencial risco para a segurança energética global, os combustíveis de origem fóssil ainda contribuem para a maior parte do consumo de combustível para transportes. Uma das possíveis explicações para isso é que, dadas as condições de mercado observadas nos últimos anos, os biocombustíveis não demonstram competitividade em termos de preço. A biomassa não alimentar é um produto de baixa densidade e atualmente de baixo valor. O desenvolvimento de sistemas de bioeconomia requer a articulação da produção, transporte, processamento e uso de matéria-prima de biomassa e, portanto, não é competitivo em comparação com combustíveis fósseis energeticamente densos, cujos processos de transformação foram desenvolvidos ao longo de décadas e são perfeitamente controlados (WOHLFAHRT et al., 2019).

Os combustíveis fósseis se beneficiam de uma economia de escala historicamente construída, devido aos processos maduros inicialmente desenvolvidos sem restrições ambientais e por causa da lei dos retornos decrescentes (PRIEFER et al., 2017). A relativa falta de lucratividade dos sistemas de bioeconomia nos mercados, especialmente em comparação aos sistemas baseados em combustíveis fósseis, pode ser explicada, em parte, pela exclusão das externalidades negativas — significativas no caso dos combustíveis fósseis

— nas análises econômicas utilizadas (SZÉKÁCS, 2017; OLSSON et al., 2018). Além disso, como os sistemas de bioeconomia devem, além disso, atender às expectativas de sustentabilidade, é muito difícil avaliar sua lucratividade apenas com ferramentas contábeis de lucratividade relacionadas ao mercado (margens líquidas baseadas em custos diretos e preços (WOHLFAHRT et al., 2019).

Olsson *et al.* (2018) destacam o fato de que, em relação aos sistemas de bioeconomia, uma diferença deve ser feita entre valor de mercado e valor inerente para informar adequadamente os tomadores de decisão e potenciais investidores. O critério de lucratividade de mercado com relação aos sistemas fósseis, excluindo externalidades negativas, parece ser irrelevante para os sistemas de bioeconomia, uma vez que esses sistemas são desenvolvidos sob ímpeto político para sustentabilidade ambiental ou soberania energética. Há, portanto, uma necessidade de indicadores que reflitam propriedades mais fundamentais do que oferta e demanda, e a análise de eficiência energética tem de incluir o custo ambiental da emissão de gases poluentes (OLSSON et al., 2018).

Reduzir e substituir o uso de combustíveis fósseis, finitos e não renováveis, está entre os desafios mais críticos em transformar os padrões de consumo de energia (IEA, 2014). Diante da perspectiva de escassez de recursos petroquímicos no longo prazo, espera-se que as principais fontes de produtos químicos, incluindo os combustíveis líquidos para o transporte, sejam derivadas de alguma forma de biomassa (LANGEVELD et al., 2010). Devido ao custo inicial elevado de novas tecnologias, a inércia regulatória e a dependência de combustíveis tradicionais criam barreiras que dificultam a adoção de soluções mais eficientes e sustentáveis por parte dos mercados. Diante desse cenário, as políticas públicas são ferramentas que podem fornecer incentivos econômicos, estabelecer regulamentações e estimular a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias energéticas mais limpas e orientadas à eficiência dos recursos energéticos.

Este capítulo está estruturado em três seções. A primeira discorre sobre os principais estudos teóricos, nos quais são abordados temas como eficiência energética, trade-off ambiental e externalidades. Por seu turno, a segunda apresenta um panorama das principais políticas relacionadas à eficiência energética em combustíveis e biocombustíveis. Por fim, a terceira realiza uma revisão dos estudos aplicados, expondo e discutindo alguns resultados.

2.1 Revisão de Literatura

A crise energética do petróleo na década de 1970 evidenciou os perigos geopolíticos da dependência de um combustível não-renovável e de posse exclusiva daqueles territórios que possuem grandes reservas petrolíferas (ISSAWI, 1978). Além disso, a forte correlação entre o uso destes combustíveis e a intensificação dos desequilíbrios climáticos relacionados ao efeito estufa aumentou a preocupação geral dos países com a construção de uma economia mundial baseada nos combustíveis fósseis (SIDDIK et al., 2021). Nesse sentido, oportunidades para reduzir o consumo de combustíveis por meio de práticas de eficiência energética e transição para fontes de energias limpas e renováveis têm sido o objeto de uma variedade de estudos, teóricos e empíricos em diferentes áreas do conhecimento.

Para Can *et al.* (2010), inexistente uma definição universalmente aceita de eficiência energética. A definição mais usada é a de que Eficiência Energética (EE) se refere ao uso da mesma quantidade de energia para realizar uma quantidade maior de trabalho, porém para Federici *et al.* (2003) é muito improvável que um sistema complexo como o transporte seja descrito por uma relação linear entre o recurso de entrada e o serviço de saída. Ao invés disso, é necessário se apoiar numa série de indicadores que enxergam o problema de maneiras diferentes para quantificar mudanças na eficiência (PATTERSON, 1996). Indicadores de eficiência energética são usados para estimar qual é a significância das melhorias de eficiência energética na redução do consumo de energia. Eles são definidos como a proporção do uso de energia por unidade de atividade, como energia por valor agregado, litro de gasolina por km dirigido, entre outros. É o progresso ao longo do tempo desses indicadores em comparação com a hipótese de nenhuma mudança que permita estimar a mudança na eficiência energética (CAN et al., 2010).

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional (s.d.), os principais indicadores de eficiência energética para o setor de transportes são: (1) energia consumida por passageiro-quilômetro (p.km) ou tonelada-quilômetro (t.km); (2) energia consumida por veículo-quilômetro (v.km) e (3) energia consumida por assento-quilômetro ou metro cúbico-quilômetro. Em revisão sobre a eficiência energética rodoviária na União Europeia, a ANP (2014) destacou o potencial de alcance de maiores níveis de eficiência e destacou as principais ações que podem ser tomadas neste sentido: substituição de modais transportes, redução do consumo específico de veículos leves e pesados, encorajamento da aquisição de veículos mais limpos, incentivo a mudanças nos hábitos dos motoristas, entre outros.

Os benefícios do aumento da EE para a economia e meio-ambiente são diversos. Segundo Schutze, A., Holz, R., & Assunção, J. (2022), o melhoramento do uso de combustíveis possui impactos ambientais e econômicos potenciais, sendo os principais: (1) redução da necessidade da expansão da oferta de energia; (2) redução das emissões dos gases de efeito estufa; (3) redução do custo de energia; (4) maior competitividade e produtividade e (5) estímulo para atividade econômica e geração de emprego.

Sobre a redução da necessidade da expansão da oferta de energia, a International Energy Agency (IEA, 2021) considera a EE como um “first fuel”. O termo se refere à prioridade que a agência dá ao aumento da eficiência como forma de transição energética, pois fornece algumas das opções de mitigação de CO₂ mais rápidas e econômicas, ao mesmo tempo em que reduz as contas de energia e fortalece a segurança energética. A agência considera que a EE é a maior medida para evitar a demanda de energia no Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050, juntamente com as medidas intimamente relacionadas de eletrificação, mudança comportamental, digitalização e eficiência de materiais.

No ano de 2023 o Brasil emitiu cerca de 2,3 bilhões de toneladas de GEE segundo dados do SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). O setor de transportes foi responsável por 9,69% dessas emissões, o equivalente a mais de 223 milhões de toneladas no ano e um aumento de 262% desde 1990. A maior parte dessas emissões vêm da queima de combustíveis fósseis (SEEG, 2023)

O cálculo das emissões de CO₂ no setor de transportes baseia-se no consumo de energia, especificamente de combustíveis. A utilização mais eficiente desses combustíveis, ou até mesmo a adoção de combustíveis alternativos, já é uma prática em alguns países desenvolvidos para reduzir suas emissões totais de gases estufa. No Brasil, o setor de transportes é responsável pela maior parte das emissões de CO₂, representando 46% do total, de acordo com a publicação da International Energy Agency (IEA, 2021) sobre as emissões de CO₂ do setor energético.

Além disso, a partir da virada do século, governos ao redor do mundo têm voltado sua atenção aos desafios que o uso de combustíveis fósseis impõe ao meio-ambiente, fato este evidenciado pelo grande número de países signatários de compromissos ambientais mundiais, como aqueles firmados na COP 28 e no acordo de Paris. Reduzir as emissões de Gases do efeito estufa (GEE) tem se tornado pauta governamental, mas muitas vezes encontra empecilhos em setores da sociedade que não desejam sacrificar crescimento econômico em

prol da transição energética. No entanto, conforme destacado pela IEA (2019a), a demanda interna por energia não precisa crescer na mesma proporção que a expansão da atividade econômica de um país. A EE permite que a mesma quantidade de energia disponível produza maior quantidade de bens e serviços. Esse impacto gera diversos efeitos, entre eles, o aumento do nível de emprego (IEA, 2019b).

Deste modo, Schutze, A., Holz, R., & Assunção, J. (2022) enfatizam que a redução dos custos de energia tem como consequência menores gastos para o provisionamento de serviços públicos. Dessa forma, a EE pode aumentar a eficiência do orçamento público, potencialmente liberando recursos para outras áreas de interesse social. Isso também é verdade a nível familiar, uma vez que o orçamento das famílias será menos onerado com o gasto com combustíveis.

A eficiência energética também pode ser analisada a partir de seu impacto na estrutura de custos das indústrias e na produtividade dos setores econômicos. Produtividade, neste contexto, refere-se à quantidade de produto gerado a partir de determinados insumos produtivos — como capital, mão de obra, energia, entre outros —, os quais representam custos para a atividade. No setor de transportes, que atua como atividade acessória a praticamente toda a indústria, o principal insumo energético é o combustível. A redução dos custos energéticos, portanto, pode liberar recursos que podem ser reinvestidos no próprio negócio, promovendo ganhos de eficiência que, por sua vez, podem se refletir em preços mais baixos para os consumidores finais.

Cambridge Econometrics, Ernst & Young e SQ Consult (2017) modelaram quatro cenários diferentes que avaliam metas aumentadas para a meta de eficiência energética da UE para 2030. A análise estima os impactos das melhorias na eficiência energética em vários níveis de ambição até 2030, em comparação com uma linha de base de 2007. Em termos de impacto no PIB, cada cenário modelado resultou em uma mudança positiva, variando de 0,1% de aumento no PIB no cenário menos ambicioso até 2,0% de aumento no cenário mais ambicioso de maior eficiência energética.

Além disso, nas últimas duas décadas, as preocupações com o esgotamento de combustíveis não renováveis e a poluição resultante levaram muitos países ao redor do mundo a realizar pesquisas em larga escala e custosas sobre energia renovável (KUMAR et. al 2021). Entende-se por combustíveis não renováveis aqueles que não são repostos em tempo hábil e previsível após sua utilização, cujas reservas se esgotam com o consumo gradual. Por

consequente, quando se trata de combustíveis renováveis, trata-se daqueles que são repostos após o consumo em determinado período, embora não sejam inesgotáveis (KANWAL et al., 2022).

A maior parte da energia consumida mundialmente ainda provém de combustíveis fósseis, o que contribui tanto para o aumento do preço do petróleo bruto quanto para a intensificação da emissão de gases de efeito estufa (BUNDSCHUH et al., 2021). Esse aumento nas emissões é um dos principais responsáveis pelo aquecimento global, atualmente uma das maiores preocupações ambientais. Diante desse cenário, torna-se fundamental promover o uso de fontes alternativas de energia, como os biocombustíveis, que oferecem menor impacto ambiental (ÓHÁISEADHA, 2020).

Biocombustíveis têm propriedades físicas e químicas inerentes que os tornam mais limpos do que a gasolina com a estrutura e composição na combustão (SIEGELMAN et al., 2019). Esses combustíveis produzem menos hidrocarbonetos não queimados durante a combustão, e as emissões de sua combustão têm menos atividade química para formar ozônio e outras substâncias tóxicas (SIEGELMAN et al., 2019). O uso de combustíveis alternativos também reduz a intensidade do aumento e acumulação de dióxido de carbono que causa o aquecimento global (BERGTHORSON; THOMSON, 2015).

Ademais, o aumento da diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis terão impacto na segurança energética — ou seja, na disponibilidade de energia em todos os momentos e em quantidades suficientes (IEA, 2019c). Este é um assunto crítico devido à distribuição desigual de recursos de combustíveis fósseis entre os países. A dependência de combustíveis importados deixa muitos países vulneráveis a qualquer possível interrupção no fornecimento; se isso acontecer, poderá resultar em dificuldades físicas e encargos econômicos, especialmente em países onde a proporção de importações de combustíveis fósseis em sua balança de pagamentos é relativamente alta (COELHO et al., 2005).

A produção de biocombustíveis abre novas oportunidades de mercado e ajuda a expandir produtos agrícolas e, portanto, novos canais de renda para os agricultores, ampliando a condição socioeconômica. Consequentemente, no futuro, a agricultura irá desempenhar um grande papel tanto na produção de alimentos quanto no fornecimento de energia (DATTA; HOSSAIN; ROY, 2019).

Globalmente, reduzir nossa dependência de combustíveis fósseis enquanto mantemos um ambiente seguro e saudável é uma alta prioridade (NASS; PEREIRA; ELLIS, 2007). Como uma fonte de energia sustentável e renovável, a bioenergia diminuirá o impacto do aumento dos preços do petróleo, abordará preocupações ambientais sobre poluição do ar e gases de efeito estufa enquanto melhora as oportunidades para agricultores e comunidades rurais (MOREIRA, 2006). Embora as considerações econômicas sejam primordiais para o suporte global de biocombustíveis, outros fatores como segurança energética, emissões de gases de efeito estufa, mudanças climáticas globais, questões de emprego e equidade rurais e poluição do ar local estão ajudando a impulsionar a revolução da bioenergia (MOREIRA, 2006).

O esforço mais recente do governo brasileiro para o fomento da produção de biocombustíveis é a lei Nº 14.993, de 8 de Outubro 2024, também chamada de Lei Combustível do Futuro, que tem como o objetivo promover a mobilidade sustentável de baixo carbono e consolidar o Brasil como líder da transição energética global (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025). Ela estabelece o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano. Um resumo das principais mudanças quantitativas encontra-se na Tabela 1. A lei prevê que o Brasil evite a emissão de 705 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) até 2037 e destrava investimentos que somam R\$260 bilhões, criando oportunidades que aliam desenvolvimento econômico com geração de empregos e respeito ao meio ambiente (BRASIL, 2024a).

Tabela 1 – Metas e projeções determinadas para os biocombustíveis na Lei 14.993/2024

Biocombustível	Quantificação	Projeção
SAF	Percentual anual mínimo de redução das emissões de GEE	1% a partir de 2027. Crescimento de 1% ao ano a partir de 2029, chegando a 10% em 2037.
Diesel Verde	Participação volumétrica mínima obrigatória	Limite de 3%. Permitida adição voluntária superior mediante comunicação à ANP.
Biometano	Meta de redução de emissões de GEE no mercado de gás natural	1% a partir de 2026. Não poderá exceder a 10% de redução das emissões.
Biodiesel	Percentual obrigatório, em volume, de adição de biodiesel ao óleo diesel	15% em 2025. Crescimento de 1% ao ano até chegar a 20% em 2030. Pode ser alterado para valores entre 13 e 25%.

Etanol	Percentual obrigatório, em volume, de adição de etanol anidro à gasolina C	Fixado em 27%. Pode ser alterado para valores entre 22 e 35%.
--------	--	---

Retirada de EPE, 2025

O Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) tem como objetivo incentivar a pesquisa, comercialização e produção do combustível sustentável de aviação (sigla em inglês SAF). No ano de 2023 o setor de transporte aéreo foi responsável por liberar na atmosfera mais de 9 milhões de toneladas de dióxido de carbono, sendo que as emissões só aumentam desde 2020 (SEEG, 2023). As metas da nova política preveem obrigar os operadores aéreos a reduzir as emissões de dióxido de carbono entre 1% a partir de 2027, alcançando redução de 10% em 2037 por meio da mistura do SAF ao combustível regular da aviação ou por outros meios alternativos, como aumento da eficiência energético-ambiental (BRASIL, 2024b).

Na área do Diesel Verde, o objetivo do PNDV é incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético do diesel verde na matriz energética brasileira. Ele busca auxiliar na transição energética da matriz brasileira e reduzir a dependência externa no diesel fóssil por meio da gradativa adoção da alternativa de combustível mais sustentável. O programa prevê que a participação volumétrica mínima obrigatória de diesel verde não poderá exceder o limite de 3%, porém é permitida a adição voluntária de diesel verde superior a esse limite, mediante comunicação à Agência Nacional do Petróleo (ANP) (EPE, 2025). Estas metas visam combater o aumento nas emissões do Diesel de petróleo, que de acordo com os dados mais recentes da SEEG (2022) atingiram alta histórica em 2022, com a liberação de mais de 125 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera.

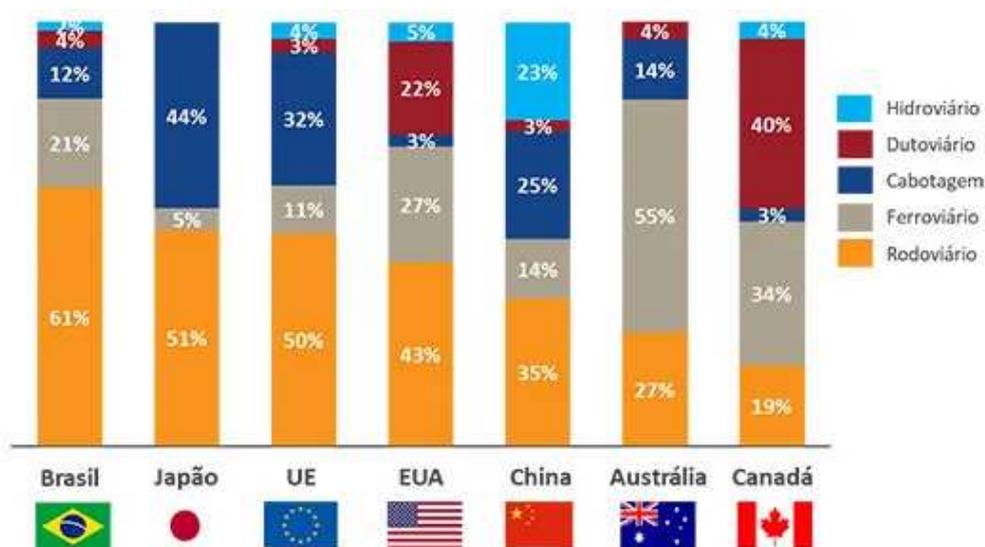
Além disso, a lei também altera a participação compulsória do Etanol e Biodiesel nas misturas com Gasolina e Diesel, respectivamente. O texto estabelece que a margem de mistura de etanol passará a ser de 22% a 27%, podendo chegar a 35% e alterando os limites anteriores de mínimo 18% e máximo 27,5% de etanol (BRASIL, 2024b). Importante ressaltar que o etanol pode também contribuir para a redução do preço da gasolina para o consumidor (EPE, 2025). Quanto ao biodiesel, misturado ao diesel de origem fóssil no percentual de 14% desde março de 2024, a partir de 2025 será acrescentado um ponto percentual de mistura anualmente até atingir 20% em 2030 (BRASIL, 2024b).

2.2 O transporte de cargas no Brasil

Este capítulo tem como objetivo apresentar um panorama da estrutura logística brasileira, discutindo suas principais características, desafios e implicações econômicas e ambientais, com ênfase no setor de transporte de cargas.

De acordo com dados do Institute of Logistics and Supply Chain (ILOS), aproximadamente 61% das cargas no Brasil foram transportadas por rodovias em 2019, considerando os Tonelada-quilômetro útil (TKU) como unidade de medida (ALVARENGA, 2020). No mesmo período, a participação dos demais modais foi significativamente menor: o transporte ferroviário respondeu por 21% do total movimentado, seguido pela cabotagem (12%), dutos (4%), hidrovias interiores (2%) e transporte aéreo, com menos de 1% da movimentação (ALVARENGA, 2020). Ao comparar com outros países podemos notar quão desbalanceada é a matriz brasileira. A figura 1 mostra um comparativo entre Brasil, Japão, os países da União Europeia, Estados Unidos, China, Austrália e Canadá.

Figura 1 – Distribuição de modais de transportes de carga por % de TKU



Fonte: (ALVARENGA, 2020).

Vemos uma utilização bem menor do transporte rodoviário de cargas em países como Canadá (19%), Austrália (27%) e China (35%). Em contraste, o transporte ferroviário, que possui maior eficiência para longas distâncias e grandes volumes (BOZOKY et al., 2014), responde por apenas 21% da matriz brasileira, enquanto representa 55% na Austrália, 40% no Canadá e 34% na China. Modais alternativos como a cabotagem, embora com potencial

competitivo no Brasil devido à extensa costa, ainda são subutilizados (12%), especialmente quando comparados ao Japão (44%) e à União Europeia (32%). A participação do transporte hidroviário e dutoviário também permanece limitada no país.

Além disso, não há como abordar a questão do transporte de carga no Brasil sem considerar o tema das emissões. Em 2023 cerca de 51% das emissões associadas à matriz energética brasileira foram provenientes dos transportes, o que corresponde a 23,2% das emissões totais de gases de efeito estufa do Brasil (MCTIC, 2022; EPE, 2024). Por ser uma matriz tão dependente do sistema rodoviário é natural se esperar que este modal e seus grandes caminhões movidos à diesel contribuem fortemente para o montante de emissões, porém é importante investigar sua eficiência relativa na liberação de GEE quando comparado a outros modais.

Uma maneira muito direta de mapear a eficiência relativa dos meios de transporte é comparar o consumo médio e o nível de emissão por tonelada-quilômetro útil (TKU) de carga transportada. O estudo de Villen *et al.* (2024) segue esta lógica, separando as mercadorias em quatro categorias para fins de análise: carga geral, granéis minerais, granéis agrícolas e granéis líquidos. Essa segmentação permite uma melhor compreensão das particularidades operacionais, dos modais mais adequados para cada tipo de carga e das demandas específicas de infraestrutura e manuseio.

Na categoria de carga geral, por exemplo, incluem-se alimentos e bebidas processadas, produtos manufaturados e outros bens; nos granéis minerais, encontram-se itens como minério de ferro, outros minerais e cimento; os granéis agrícolas abrangem produtos como soja, milho em grãos e farelo de soja; enquanto os granéis líquidos envolvem combustíveis líquidos, produtos químicos e petroquímicos. Essas informações podem ser melhor visualizadas na Tabela 2 que resume essas informações para os diferentes modos de transporte e tipos de cargas.

Tabela 2 - Emissões de CO₂ e consumo de combustível por modo de transporte e tipo de carga

Modo de transporte	Emissões (kg CO ₂ /mil TKU)				Fator de emissão (g CO ₂ /l)	Consumo médio (l/mil TKU)			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral		Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodoviário	59,2	37,3	57,2	54,4	2,37	25	15,7	24,1	23
Ferroviário	8,7	16,6	7,2	23,8	2,37	3,7	7	3	10
Cabotagem	4,4	4,4	4,8	9,1	2,95	1,5	1,5	1,6	3,1
Hidroviário	2,7	2,8	4,8	7,4	2,95	0,9	0,9	1,6	2,5

Fonte: VILLEN *et al.*, 2024, p. 13

A tabela mostra que o modo rodoviário é o menos eficiente no que tange à emissão de poluentes por mil TKU transportados. Mesmo o segundo modal menos eficiente, o ferroviário, emite de duas a oito vezes menos kg de CO₂ para transportar a mesma carga. No caso dos modais de cabotagem e hidroviário a diferença é ainda maior, sendo que o primeiro chega a emitir 13 vezes menos para transportar granéis minerais e o segundo 22 vezes menos.

No Brasil, os caminhões pesados são responsáveis por aproximadamente 27% das toneladas-km rodadas e 60% do consumo de energia do frete, segundo averiguação da EPE (2024). O relatório da Empresa de Pesquisa Energética aponta também algumas outras causas para a baixa eficiência do consumo energético no setor: (1) Tamanho e tipo dos caminhões utilizados; (2) Requisitos geográficos e específicos para o transporte de commodities; (3) Péssima qualidade das rodovias; (4) Idade dos veículos.

Esforços na direção da descarbonização da matriz de transportes brasileira são limitados pela alta dependência do setor rodoviário. Iniciativas mais ambiciosas podem considerar a migração para modais menos intensivos em carbono, como o aquaviário ou ferroviário. Porém, a mudança estrutural da malha de transportes demanda alto investimento e custos e segundo Villen *et al.* (2024) os esforços para redução das emissões devem considerar a manutenção da predominância do modal rodoviário no curto e médio prazo e se restringir às ações para aumentar a eficiência do uso deste modal como avanços tecnológicos, utilização de combustíveis verdes, ganhos de eficiência nos motores e melhorias na gestão de frota.

Quanto ao custo do transporte, O Ministério da Infraestrutura (INFRA S.A., 2021), através do PNL 2035 auferiu que no ano de 2017 o sistema de transportes teve um custo total de R\$ 435,53 bilhões para o transporte de cargas, cerca de 6,6% do PIB nacional. O estudo indica que o custo tende a aumentar nos próximos anos, porém a quantidade relacionada ao PIB tende a diminuir e isso se dá em grande parte pelo aumento da eficiência.

O custo médio de transportes por 1000 TKU revela quanto se gasta para transportar 1000 toneladas por um quilômetro da rede de transportes brasileira, sendo que em 2017 o país teve um custo de R\$209,11/1000 TKU. Em todos os cenários projetados pelo estudo há uma redução desse valor para 2035, que pode chegar a até R\$127,13/1000 TKU, uma redução de 39%, indicando que os investimentos em curso estão indo de encontro a um sistema de transportes mais eficiente.

Ademais, num mundo de tecnologias cada vez mais disruptivas e de rápida adoção é essencial vislumbrar as possíveis tendências para os transportes e logística que podem dominar o mercado nos próximos anos. A não observância dessas tendências pode prejudicar a competitividade brasileira, uma vez que outros países já estão redesenhando suas infraestruturas para se adequarem às novas dinâmicas (INFRA S.A., 2021).

Neste sentido, o PNL 2035 projeta o aumento da autonomia dos veículos em relação ao homem, a automação de diversas tarefas referentes à logística e a incorporação cada vez maior de análise de dados através do *Big Data* e de ferramentas de Inteligência Artificial. Estima-se que a aplicação integrada desse conjunto de tecnologias poderá resultar em um aumento de 3,15% na taxa de aproveitamento veicular no modal rodoviário e de 5% nos demais modais de transporte. Além disso, projeta-se uma redução nos custos de manutenção dos veículos da ordem de 18,9% no transporte rodoviário e de 30% nos demais modais. No que se refere à otimização de rotas, prevê-se uma diminuição de até 5% nos custos do transporte rodoviário, decorrente de processos de roteirização mais eficientes (INFRA S.A., 2021).

Na questão dos combustíveis, seguindo a agenda mundial de preocupação ambiental, ratificada pelos acordos de Paris e COP 22, a projeção é que os veículos se tornem cada vez mais eficientes, menos poluentes e consumirão menos combustíveis. Seguindo tendências internacionais, a principal fronteira de avanço tecnológico em direção a este objetivo será a

eletrificação da frota (INFRA S.A., 2021), mas sua adoção no Brasil ainda precisa superar desafios consideráveis como a necessidade de uma infraestrutura adequada para seu pleno funcionamento, os elevados custos de aquisição, a reduzida autonomia operacional, o prolongado tempo de recarga, bem como a incipiência do mercado secundário voltado à comercialização e reaproveitamento de baterias e demais componentes. E, portanto, sua adoção tende a ser lenta e gradual no país (SILVA; PIZZOLATO, 2022).

2.3 Revisão dos estudos aplicados

Este capítulo tem como objetivo revisar estudos empíricos nacionais e internacionais que investigam os efeitos de aumentos na eficiência energética no transporte de cargas, com ênfase nas implicações econômicas e ambientais. A análise busca identificar lacunas na literatura existente, especialmente no que tange à quantificação dos impactos de políticas públicas, dessa forma contribuindo para o estudo dos impactos da EE na economia brasileira.

O trabalho de Caxito, Schuck e Vasconcelos (2023) investiga a relação entre o consumo energético e as emissões de poluentes de veículos leves no Brasil por meio de análise estatística, utilizando dados do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE Veicular). O programa foi iniciado em 2008 em uma parceria entre o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e teve como objetivo endereçar a assimetria de informações para o consumidor acerca das diferentes performances energéticas dos veículos leves e incluir na decisão de compra o fator de eficiência de combustíveis.

Os resultados indicaram uma correlação positiva entre o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO₂), logo veículos mais eficientes energeticamente tendem a emitir menos CO₂. O estudo reforça a importância da etiquetagem veicular como ferramenta para informar consumidores e incentivar a produção de veículos mais eficientes, evidenciando a preferência do consumidor por veículos mais eficientes e que possam gerar impacto positivo na redução das emissões e dos custos de transporte.

Bartholomeu *et al.* (2016) buscaram medir o potencial de mitigação das emissões do transporte rodoviário de cargas através da adoção de medidas que melhorem o uso do

combustível ou promovam a substituição de combustíveis fósseis por meio do aumento da mistura de biodiesel ao diesel utilizando a Metodologia de linha base.

Os resultados obtidos pelos autores confirmam que o aumento da eficiência de combustíveis e a adoção de maiores misturas de biodiesel geram ganhos ambientais, porém com potenciais de mitigação de emissões muito diferentes. As estimativas concluíram que um incremento de 10% na eficiência energética da frota rodoviária em relação aos níveis médios adotados resulta numa redução de 9,6% nas emissões de CO₂. Portanto, a adoção de medidas que resultem na redução do consumo médio em 0,5 km/l poderia reduzir as emissões de GEE em 19,23%.

Por sua vez, os autores apontam que a queda do rendimento dos motores alimentados com maiores teores de biodiesel tem como consequência um aumento do consumo de combustível, o que impacta o saldo da mitigação de emissões, tornando-o bem menos expressivo. Os resultados estimaram que quando o teor de biodiesel aumenta de 3% (B3) para 50% (B50) apenas 4% das emissões são mitigadas. Até mesmo adotando o biodiesel puro (B100), o potencial de redução nas emissões é de apenas 8,71% em relação à linha de base.

Além disso, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), em sua nota técnica sobre a *Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2024-2033*, apresentou evidências empíricas relevantes sobre a evolução da eficiência energética no setor automotivo nacional. Embora o foco do estudo sejam os veículos leves, seus resultados destacam tendências que podem ser extrapoladas para o setor de transporte de cargas, especialmente no que diz respeito às políticas públicas e seus efeitos. A nota técnica aponta que os ganhos de eficiência energética acumulados ao longo dos últimos dez anos, resultado de iniciativas como o Inovar-Auto e a implementação do Rota 2030, totalizaram um incremento de cerca de 30% na eficiência média dos veículos vendidos. Tais avanços indicam o potencial da regulação governamental em induzir transformações tecnológicas com impacto direto na redução do consumo de energia e das emissões, o que pode ser replicado ou adaptado para o transporte de cargas pesadas.

Em trabalho aplicado, Magalhães e Domingues (2016) mediram o impacto do melhor uso da energia (entendido como melhora na eficiência energética) sobre a economia brasileira e o potencial de redução de emissões através de um modelo aplicado de equilíbrio geral dinâmico-recursivo. Os autores estabeleceram 3 cenários que diferenciavam de si pela

magnitude do impacto na EE, sendo um o valor projetado do ganho de eficiência (Cenário A), outro um cenário pessimista de não cumprimento das metas da política (Cenário B) e um último cenário otimista, com ganhos de eficiência além dos previstos (Cenário C).

Os resultados obtidos mostram que o aumento da eficiência energética para energias elétricas e não elétricas tem influência positiva sobre os indicadores econômicos como PIB, Consumo das Famílias e Exportações, ao mesmo tempo que reduz o total de emissões de forma a romper a lógica de correlação entre aumento do produto e deterioração da condição ambiental. Segundo os autores, um incremento na eficiência energética de 8,4% para fontes elétricas e 11,3% para fontes não elétricas gera um impacto positivo sobre o Produto Interno Bruto (PIB) quando comparado ao cenário de referência, resultando em um aumento acumulado de 1,62% até o ano de 2030, acompanhado por uma redução de 2,1% nas emissões totais de gases de efeito estufa (Cenário B). Em uma hipótese menos favorável, na qual as metas de eficiência energética não são plenamente atingidas (Cenário A), o crescimento do PIB seria de 0,85%, com uma diminuição nas emissões de 1,1%. Já no cenário mais otimista (Cenário C), projeta-se um crescimento acumulado de 2,21% no PIB até 2030, juntamente com uma redução de 4,3% nas emissões. Observa-se, portanto, que o aumento na eficiência energética tende a gerar ganhos econômicos, embora com retornos marginais decrescentes, sugerindo limitações estruturais na absorção desses ganhos pela economia. Em contrapartida, a redução das emissões apresenta um comportamento linear, reflexo tanto dos pressupostos adotados em cada cenário quanto dos impactos indiretos decorrentes da variação na atividade econômica.

Por sua vez, Tzeiranaki *et al.* (2023) avaliam o progresso da UE em termos de eficiência energética e redução das emissões de carbono no setor de transporte rodoviário, especialmente considerando os compromissos assumidos nos planos climáticos para 2030 e 2050. Utilizando dados em painel balanceado de 1995 a 2018, os autores observaram uma queda no consumo de energia por unidade normalizada de veículos, como automóveis, caminhões e veículos leves, o que é atribuído às políticas adotadas para promover eficiência e reduzir emissões.

Aplicando a técnica de decomposição *Logarithmic Mean Divisia Index* (LMDI), o estudo identifica que ganhos de eficiência energética induzidos por políticas foram cruciais para conter o crescimento do consumo quando comparado ao cenário sem políticas, mas não

foram suficientes para reduzir o consumo total de energia e as emissões do transporte rodoviário em 2018, em comparação com 2000.

Em uma análise para os modais de transporte brasileiros, Guimarães *et al.* (2014) traçam a evolução da eficiência energética para transportes de carga e passageiros, utilizando estatística descritiva para mapear os impactos da EE sobre o consumo total de energia. Seus resultados mostraram que de uma forma geral, o setor apresenta uma eficiência energética superior àquela listada como eficiência média nas referências internacionais, apesar do setor rodoviário de carga ter apresentado aumento no padrão de consumo energético.

Os autores também notam que a maior parte da economia energética alcançada por meio do aumento da eficiência advém do setor de transporte de passageiros, com este sendo responsável por 83% da economia gerada. Os autores concluem que a melhor estratégia para melhorar ainda mais os indicadores de eficiência seria por meio da transferência modal, uma vez que é improvável que surjam novos grandes ganhos de eficiência já que o consumo energético dos modos de transporte já apresenta valores próximos ao ótimo internacional e mostram uma tendência à estabilização.

O estudo concluiu sugerindo que novos trabalhos foquem em verificar o impacto das melhorias em eficiência energética na emissão de CO₂ decorrentes das atividades de transportes, que é justamente o que esta pesquisa propõe.

Ainda sobre os impactos da EE na redução das emissões é necessário destacar preocupações com o chamado “Efeito Rebote”. Este conceito não é estranho para a economia e foi pela primeira vez explorado pelo economista inglês William Stanley Jevons em seu livro *A Questão do Carvão*, de 1865. O autor teorizou que a elevação da eficiência energética na utilização de determinados recursos — como ocorre, por exemplo, com o uso de automóveis que consomem menos combustível por quilômetro rodado — tende a reduzir o custo associado ao serviço energético correspondente. No entanto, essa queda nos custos pode levar a mudanças na demanda por serviços de energia que anulam parte da economia alcançada na forma de efeitos rebote (JEVONS, 1865). Consequentemente, as previsões de economia de energia podem ser exageradas caso o efeito rebote não seja insignificante, o que por sua vez pode levar à alocação ineficiente de recursos para projetos de EE que são menos efetivos do que aparentam.

Neste sentido, Llorca e Jamasb (2017) analisam a eficiência energética e os efeitos de rebote do transporte rodoviário de carga em 15 países europeus durante o período de 1992 a 2012. Os autores utilizam uma abordagem econométrica baseada na estimativa de modelos de Análise de Fronteira Estocástica (AFE) para estimar funções de fronteira de demanda de energia. Os resultados obtidos mostram um ganho médio de eficiência de combustíveis de 88,8% e um efeito rebote de 3,8% para os países da amostra durante o período, o que leva a concluir que os resultados de EE são retidos em grande medida. O trabalho também aponta que o efeito rebote é maior em países com maior eficiência de combustível e melhor qualidade de logística.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa adota como principal instrumento analítico o modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC), uma abordagem que permite representar a economia como um sistema composto por múltiplos mercados inter-relacionados, nos quais os preços e quantidades são simultaneamente determinados por meio do comportamento maximizador dos agentes econômicos (HADDAD, 2004; PEROBELLI, 2004). Trata-se de uma ferramenta fundamentada em princípios microeconômicos e estruturada a partir de um sistema de equações simultâneas, que busca capturar os efeitos de políticas econômicas sobre variáveis agregadas e setoriais, preservando a coerência entre os diferentes agentes e mercados (DOMINGUES, 2002).

A origem do modelo EGC remonta às discussões teóricas em torno da possibilidade de cálculo de alocações de recursos Pareto-ótimas, com base nos sistemas comportamentais formulados a partir do equilíbrio walrasiano (HADDAD, 2004). Em termos operacionais, o modelo é construído a partir de uma base de dados contábil consistente — geralmente uma matriz de contabilidade social (MCS) — que representa, em determinado período, as interações entre setores produtivos, famílias, governo e o resto do mundo.

Há duas principais tradições metodológicas no desenvolvimento de modelos EGC. A primeira, associada à escola norueguesa-australiana e representada pelos trabalhos pioneiros de Johansen (1960), estrutura-se a partir de um sistema de equações linearizadas, sendo os resultados expressos em termos de taxas de crescimento. A segunda, de origem americana, é baseada nas contribuições de Scarf (1967, 1973), adotando um sistema de equações não linearizadas, o que possibilita uma maior fidelidade à modelagem dos comportamentos econômicos e das restrições tecnológicas (PROQUE, 2019).

No presente estudo, emprega-se um modelo de Equilíbrio Geral Computável com dinâmica recursiva, o qual permite considerar a evolução dos impactos econômicos ao longo do tempo em resposta a alterações exógenas de políticas públicas. Essa abordagem incorpora mecanismos intertemporais que ajustam o sistema em períodos sucessivos, refletindo mudanças na acumulação de capital, nas decisões de investimento e nos efeitos distributivos (DIXON; RIMMER, 2002).

O modelo utilizado é o BIM-RD, que constitui uma versão nacional adaptada do modelo ORANI, desenvolvido por Dixon *et al.* (1982). Baseado na metodologia de Johansen, esse modelo opera com equações linearizadas e apresenta seus resultados na forma de taxas de crescimento. Trata-se de um modelo brasileiro de Equilíbrio Geral Computável (EGC) multiperíodo, concebido com o objetivo de avaliar os efeitos econômicos decorrentes da aplicação de diferentes instrumentos de política pública no contexto da economia nacional a partir do ano de 2015 (BETARELLI JUNIOR, 2022a, 2022b, 2023; BETARELLI JUNIOR; PEROBELLI; VALE, 2015).

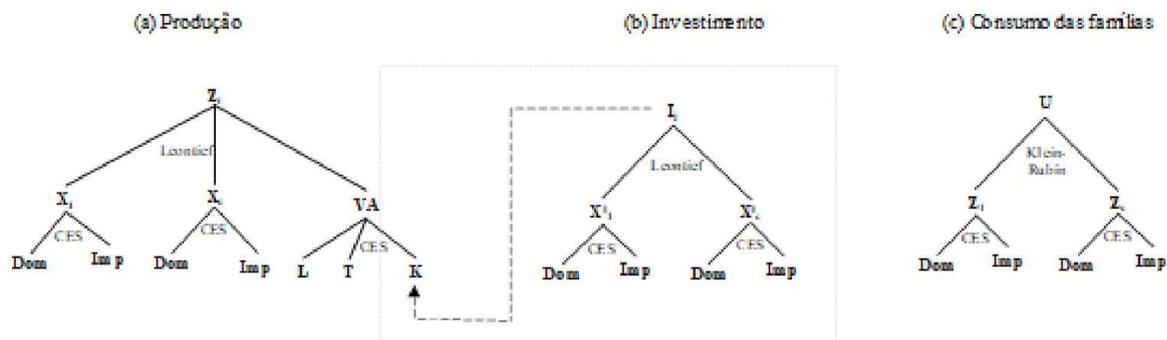
3.1 Estrutura teórica

Os agentes econômicos, em um ambiente de mercado competitivo, são modelados por meio de um sistema de equações cujo comportamento pressupõe a minimização de custos e a aceitação de preços como dados, o que implica em lucros econômicos nulos (HORRIDGE, 2000). Simultaneamente, a função de produção se desdobra em duas dimensões: a demanda por insumos e fatores de produção, e a composição dos bens produzidos, ambas interligadas pelo nível de atividade de cada setor econômico.

A alocação da oferta setorial ocorre por meio de uma função de agregação do tipo Elasticidade Constante de Transformação (CET), a qual permite que os setores direcionem sua produção para os mercados – interno ou externo – com base nos preços relativos dos bens, favorecendo aqueles com maior rentabilidade. Essa flexibilidade na alocação da oferta confere aos setores multi produtores a capacidade de maximizar suas receitas ao priorizar os mercados mais vantajosos, o que pode resultar, por exemplo, na preferência pelo atendimento ao mercado interno em detrimento das exportações (PEROBELLI *et al.*, 2017).

No que se refere à demanda dos produtores, esta é representada por funções do tipo Leontief, que indicam proporções fixas de insumos, e por funções de elasticidade de substituição constante (CES – *Constant Elasticity of Substitution*), conforme ilustrado na Figura 2 (DIXON *et al.*, 1982).

Figura 2 - Estrutura teórica aninhada



Fonte: Betarelli Junior et al. (2020)

Na Figura 2a, observa-se que, no primeiro nível da estrutura de produção, as indústrias são responsáveis pela fabricação de um ou mais bens a partir da combinação de diversos insumos intermediários (X_i) e fatores primários (V_i). Essa combinação ocorre em proporções fixas, conforme definido por uma função do tipo Leontief, resultando na produção de um bem final (Z_i).

No segundo nível da hierarquia produtiva, os componentes utilizados derivam de uma função do tipo CES (*Constant Elasticity of Substitution*), o que implica uma substituição imperfeita entre insumos ou fatores de produção. Essa substituição ocorre em função das características específicas de cada insumo e das variações nos preços relativos entre os produtos domésticos (D_i) e importados (I_i), conforme o modelo proposto por Armington (1969).

O valor agregado, por sua vez, é obtido a partir de combinações não perfeitas entre os fatores primários de produção: trabalho (L_i), terra (T_i) e capital (K_i). Essa estrutura de produção em dois níveis, com funções aninhadas, é caracterizada por BETARELLI JUNIOR et al. (2020) como:

$$Z_i = \left(\frac{X_i}{a_i^X}, \frac{V_i}{a_i^V} \right) \quad (1)$$

variável Z_i denota o produto; os termos a_i^X e a_i^V a eficiência produtiva de cada fator; X_i os insumos intermediários e V_i é o valor adicionado, respectivamente caracterizados como:

$$X_i = \left[\sum_{i=1}^s \delta_{s,i} X_{s,i}^{-\rho} \right]^{\frac{-1}{\rho}} \quad \forall s = (D, I) \quad (2)$$

tal que:

$$V_i = \left[\sum_{i=1}^f \delta_{f,i} V_{f,i}^{-\rho} \right]^{\frac{-1}{\rho}} \quad \forall f = (L, T, K_F, K_H) \quad (3)$$

em que δ é um parâmetro que satisfaz $\sum_{i=1}^f \delta_{f,i} = 1$ ou $\sum_{i=1}^s \delta_{s,i} = 1$ e ρ expressa um parâmetro de substituição entre os fatores X_i e V_i . A formulação teórica da estrutura produtiva é uniforme entre os diferentes setores econômicos, diferenciando-se apenas quanto aos parâmetros das elasticidades de substituição e às proporções utilizadas de insumos e fatores primários (BETARELLI JUNIOR et al., 2020).

Na Figura Xb, a demanda por bens de investimento é representada por meio de uma função do tipo Leontief, a qual combina insumos em proporções fixas para gerar novas unidades de capital. Esse processo estabelece um vínculo direto entre o investimento e o estoque de capital, conforme o mecanismo dinâmico de acumulação que opera em cada período $t+1$ (HORRIDGE, 2012):

$$K_{i,t+1} = (1 - \varphi_i)K_{i,t} + I_{i,t} \quad (4)$$

Sendo $K_{i,t}$ estoque de capital disponível para o setor i no período t , e φ_i a taxa de depreciação, considerada constante ao longo do tempo, a quantidade de capital no ano-base é determinada de forma exógena. Ademais, conforme HORRIDGE (2012), a alocação de investimentos no modelo segue duas regras fundamentais, conforme também descrito por CHEN (2019):

$$G_i = \frac{I_{i,t}}{K_{i,t}} = F(E_i) \quad (5)$$

$$G_i = Q_i \cdot G_i^{Tend} \cdot \frac{(M_i)^{\xi_i}}{Q_i - 1 + (M_i)^{\xi_i}} \quad (6)$$

de maneira que na eq. (3) a razão investimento/capital ou taxa bruta de crescimento de capital no próximo período estão positivamente relacionados com as taxas de retorno esperadas (E_i); e na eq. (4) as taxas de retorno esperadas convergem para as taxas de retorno reais por meio de um mecanismo de ajuste parcial (CHEN, 2019), com $M_i = E_i/R_i^{Normal}$, tal que $R_{j,i}^{Normal}$ é a taxa de retorno normal do capital para o investidor i ; G_i^{Tend} é a tendência de crescimento dos estoques de capital, $Q_{j,i}$ é a relação investimento/capital (máxima/tendência); e ξ_i denota a elasticidade do investimento.

O comportamento da demanda das famílias, representado na Figura Xc, é modelado por meio de uma função do tipo Klein-Rubin, também conhecida como Stone-Geary, que agrupa as commodities em um sistema linear de gastos (*Linear Expenditure System* – LES). Nesse modelo, a renda familiar é alocada, em parte, para a aquisição de bens de subsistência — considerados necessidades básicas —, enquanto o excedente é destinado ao consumo de “bens de luxo”, cuja demanda é sensível às variações na renda (PROQUE, 2019). A função LES é formalmente definida por:

$$U(Z_1, \dots, Z_c) = \sum_{i=1}^c S_i^{Lux} \ln \ln (Z_i - Z_i^{Sub}) \quad (7)$$

em que Z_i denota a demanda total pelo produto i ; Z_i^{Sub} a demanda das famílias que consideram o produto i como um bem necessário; $(Z_i - Z_i^{Sub})$ é a demanda das famílias que consideram o produto i como um bem de luxo, logo, ela varia de acordo com a renda; e S_i^{Lux} representa a participação orçamentária do bem de luxo i em relação aos gastos totais em bens de luxo.

Independentemente da restrição orçamentária, toda a parcela da renda não destinada ao consumo de bens de subsistência é integralmente alocada à aquisição de bens de luxo (PROQUE, 2019). Por essa razão, a função LES é classificada como não-homotética ou quase-homotética, pois apenas as quantidades demandadas que excedem os níveis mínimos de subsistência variam proporcionalmente à renda disponível. Nesse contexto, a participação dos

gastos com bens essenciais tende a aumentar em situações de queda de renda e a diminuir à medida que a renda cresce (BETARELLI JUNIOR et al., 2020; BURFISHER, 2016).

No que se refere à demanda por exportações, adota-se a hipótese de pequena economia aberta, segundo a qual as variações no comércio exterior brasileiro não exercem influência significativa sobre os preços internacionais. Dessa forma, a demanda externa por bens tradicionais é inversamente relacionada ao preço médio das exportações em moeda estrangeira, sendo a taxa de câmbio tratada como exógena.

O consumo do governo também é considerado exógeno no modelo, e os estoques se acumulam de acordo com as variações na produção. No mercado de trabalho, o ajuste ocorre com defasagem entre o crescimento real dos salários e a oferta nacional de emprego. Assim, ainda que o nível de emprego esteja momentaneamente acima de sua tendência devido a choques de política econômica, a taxa real de salários tende a se deslocar progressivamente para cima em relação ao seu nível tendencial (HORRIDGE, 2012).

A dinâmica recursiva do modelo decorre da incorporação de parâmetros como a elasticidade do investimento (ξ_i), a elasticidade do emprego em relação ao salário real, e a elasticidade associada à entrada e saída de empresas no mercado. Com isso, o modelo não apenas utiliza a solução inicial como referência, mas também é capaz de gerar projeções intertemporais com base na trajetória dinâmica do sistema (BETARELLI JUNIOR; PEROBELLI; VALE, 2015).

3.2 Baseline e Política

A especificação do fechamento em modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) é um elemento fundamental, pois define o ambiente econômico no qual a simulação será conduzida (DIXON; RIMMER, 2002). Esses modelos costumam ser estruturados de forma que o número de equações seja inferior ao número de variáveis, o que exige a definição exógena de algumas delas para viabilizar a solução do sistema. Assim, a diferença entre o número de variáveis e equações representa o conjunto de variáveis exógenas, que são aquelas sobre as quais incidem os choques nos distintos cenários de simulação (PROQUE, 2019).

Nos modelos de EGC com dinâmica recursiva, são possíveis quatro tipos distintos de fechamento: histórico, de decomposição, prospectivo e de política (BETARELLI JUNIOR, 2013; PROQUE, 2019). Cada tipo de fechamento define quais variáveis são mantidas exógenas ou endógenas, conforme o objetivo analítico da simulação.

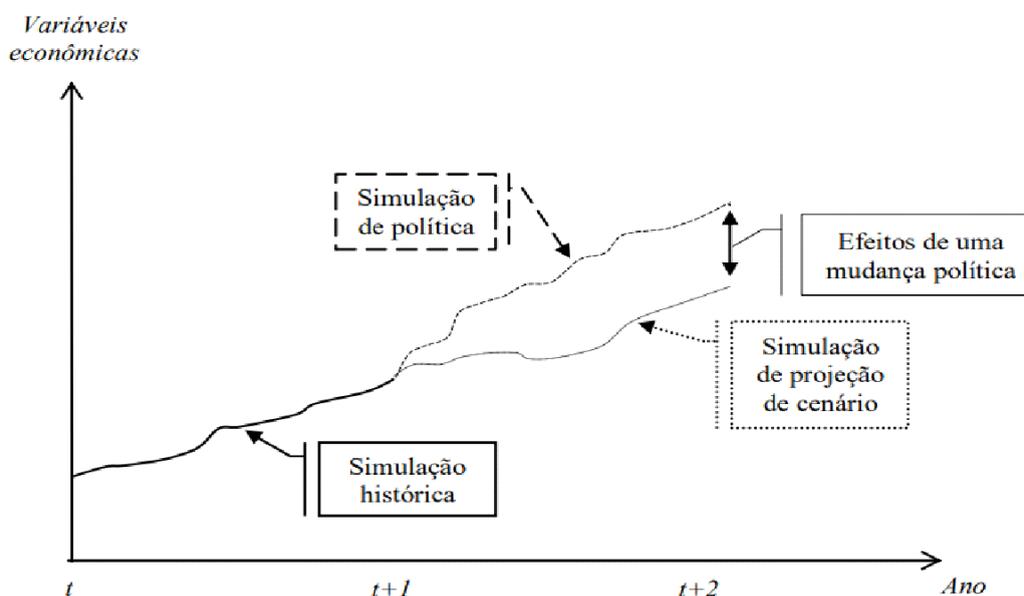
Dois tipos de ambientes econômicos são comumente utilizados em simulações com modelos de Equilíbrio Geral Computável: o cenário de referência e o cenário de política. O primeiro, também chamado de cenário-base ou contrafactual, representa a trajetória esperada da economia na ausência de intervenções, funcionando como um caminho de controle. A partir dele, é possível mensurar os desvios gerados por choques de política econômica aplicados em simulações subsequentes (DIXON; RIMMER, 2002).

Já o cenário de política incorpora os efeitos de uma medida específica, como alterações tributárias, tarifárias ou de investimento público. Os impactos da política analisada são então obtidos pela comparação entre esse cenário e o cenário de referência, revelando como a economia brasileira teria evoluído caso a política em questão não tivesse sido implementada.

A Figura 3 apresenta, em sua primeira sequência, o cenário denominado baseline, no qual não são consideradas alterações na política pública em análise. Esse cenário é construído com base em informações previamente disponíveis — tanto históricas quanto projeções básicas para os períodos futuros. A sequência subsequente ao cenário de referência incorpora as mudanças de política propostas.

Dessa forma, as variações observadas nas variáveis econômicas, quando comparadas à trajetória da baseline, representam os impactos líquidos das políticas simuladas, permitindo isolar os efeitos atribuíveis exclusivamente à intervenção considerada (DIXON; RIMMER, 2002).

Figura 3 – Simulações em modelos EGC dinâmicos



Fonte: Betarelli Junior et al. (2020)

A simulação histórica consiste na atualização dos coeficientes do modelo do período (t) para os valores observados no período ($t + 1$), de modo a representar o comportamento efetivo da economia brasileira nesse intervalo. Essa abordagem permite que a base de dados original seja ajustada para refletir os desenvolvimentos recentes da economia. No entanto, quando os dados empíricos deixam de estar disponíveis — como ocorre, por exemplo, a partir do ano de 2025 nesta dissertação —, recorre-se à simulação de projeção de cenários (*forecast simulation*), que tem por objetivo construir uma trajetória futura da economia brasileira (BETARELLI JUNIOR, 2013; DIXON; RIMMER, 2002; PROQUE, 2019).

Nesse contexto, enquanto a simulação histórica atualiza a base do modelo com dados reais, a simulação de cenários avalia os efeitos potenciais de choques de política econômica em períodos futuros. Isso permite analisar os desdobramentos das mudanças políticas com base em desvios em relação ao cenário de referência (*baseline*) (DIXON; RIMMER, 2002; PROQUE, 2019).

As soluções geradas pelo modelo podem ser definidas em diferentes intervalos temporais, como mensais, trimestrais ou anuais, dependendo da estrutura e dos objetivos da simulação. No método de soluções recursivas, parte-se de expectativas estáticas ou adaptativas, em que a solução de cada período depende não apenas das condições atuais, mas

também dos resultados obtidos em períodos anteriores (DIXON; RIMMER, 2002; PROQUE, 2019).

Como os modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) operam com preços relativos, é necessário selecionar uma variável de preço que funcione como numerário, ou seja, como unidade de conta comum no sistema. Nesta dissertação, optou-se por utilizar a taxa de câmbio como numerário, a qual é mantida exógena em todas as simulações realizadas. Dessa forma, as variações nominais dos preços das demais variáveis econômicas são expressas em relação à taxa de câmbio, permitindo a análise coerente dos efeitos relativos entre os preços (DIXON; RIMMER, 2002).

Diante da preocupação com o melhor uso dos recursos energéticos e com o aumento das emissões de GEE na atmosfera no contexto da Lei Combustível do Futuro a simulação aqui proposta pretende fornecer conclusões para endereçar estes dois desafios por meio de choques na eficiência do uso de combustíveis no transporte de carga nos principais modais da matriz de transportes brasileira. O cenário escolhido foi um impacto de -1% na demanda intermediária de combustíveis a cada ano por 10 anos a partir de 2025. No modelo utilizado, o *Brazilian Intersectoral Model with Recursive Dynamic* (BIM-RD), a demanda por fatores primários na forma percentual é expressa pela equação:

$$prim_{i,r} - aprim_{i,r} = x_{i,r} \quad (8)$$

Ou

$$prim_{i,r} = x_{i,r} + aprim_{i,r} \quad (9)$$

Portanto, variações positivas de eficiência de um determinado setor representam choques negativos em $aprim_{i,r}$, uma vez que menos fatores primários são requeridos para atender o mesmo nível de produção. A variável $aprim_{i,r}$ é exógena nos fechamentos de cenário e política e, portanto, a mesma é utilizada para as quatro simulações desta pesquisa. Considerando que a política analisada possui efeitos que se desdobram temporalmente, a simulação realizada com o módulo de dinâmica recursiva possibilita a avaliação dos impactos tanto no curto quanto no longo prazo. Os resultados obtidos possibilitam uma análise de cada modal, de um grupo deles ou de todos simultaneamente, possibilitando a comparação do impacto da maior eficiência entre os meios de transporte de carga no que tange à redução de custos e emissões.

4 RESULTADOS

Esta monografia analisa os efeitos do choque de eficiência energética previamente mencionado sob duas perspectivas: a econômica, na qual serão abordadas as variáveis macroeconômicas, incluindo PIB, investimento, salários e exportações; em seguida, para os setores produtivos. A segunda perspectiva busca medir o impacto ambiental do choque por meio do resultado das emissões. Todos os resultados são avaliados em termos de variação percentual relativa ao cenário base.

4.1 Resultados macroeconômicos

As projeções econômicas do choque na redução do uso de combustíveis denotam desvios percentuais em relação ao cenário base da economia, acumulados anualmente. A Tabela 3 fornece os desvios acumulados (%) decorrentes dos choques no uso de combustíveis nos modais Ferroviário, Rodoviário, Aquaviário e Aeroviário. A análise do comportamento dessas variáveis tem como objetivo fornecer uma visão abrangente sobre os resultados derivados da implementação das simulações.

A implementação de políticas de eficiência energética foi induzida através de choques de redução direta no consumo de combustíveis fósseis nos modais selecionados, o que geraria economias para as empresas transportadoras. Espera-se que essa redução nos custos de transporte refletiria na diminuição das tarifas de frete praticadas, especialmente em mercados concorrenciais, com capacidade para aumentar a rentabilidade das transportadoras ou beneficiar diretamente os setores que demandam transporte, como indústria, agricultura e comércio. Dessa forma, ganhos econômicos imediatos seriam derivados da redução das despesas com combustíveis e da melhora na eficiência operacional, o que aumentaria a capacidade financeira para investimentos adicionais na modernização das frotas e tecnologias.

Além disso, dado que os custos logísticos constituem parcela significativa do preço final dos produtos em economias altamente dependentes do modal rodoviário como o Brasil, a redução dos custos operacionais no transporte de cargas poderia ter impacto relevante na redução do nível geral de preços. Preços finais mais baixos proporcionam ganhos de

bem-estar social, principalmente em segmentos populacionais mais sensíveis a variações nos preços dos bens essenciais.

Há também a relevância do canal fiscal de efeitos da política. Ao promover a eficiência energética, espera-se uma redução no volume total de combustíveis consumidos pelo setor de transporte, o que poderia gerar uma diminuição na arrecadação tributária associada ao consumo desses combustíveis. Isso poderia gerar a necessidade de ajustes fiscais compensatórios ou realocações tributárias para outras bases, tais como tributos ambientais sobre emissões ou estímulos fiscais a tecnologias limpas. Portanto, é importante observar os efeitos fiscais do choque, para assegurar a sustentabilidade das contas públicas ao longo do tempo.

A Tabela 3 mostra um resumo dos efeitos dos choques nos quatro modais - Transporte Ferroviário (TFerro), Rodoviário (TRodo), Aquaviário (TAqua) e Aeroviário (TAereo) - assim como o efeito total, sobre os principais agregados macroeconômicos no ano de 2035.

Tabela 3 – Efeitos sobre as principais variáveis macroeconômicas

Variáveis	Unidade	TFerro	TRodo	TAqua	TAereo	Total
		2027-2035	2027-2035	2027-2035	2027-2035	
PIB	Var. %	0	0.09	0	0.02	0.12
Investimento	Var. %	0.01	0.22	0.01	0.07	0.32
Consumo das Famílias	Var. %	0.01	0.13	0.01	0.04	0.19
Exportações	Var. %	0	-0.08	-0.01	-0.06	-0.15
Importações	Var. %	0.01	0.07	0.01	0.02	0.1
Emprego Agregado	Var. %	0	0.02	0	0.01	0.02
Salário Real	Var. %	0.01	0.16	0.01	0.05	0.23
Estoque de Capital	Var. %	0	0.05	0	0.01	0.08
Receita de tarifas do governo	Var. R\$ Mi.	5.07	77.36	7.25	43.16	132.84
Deflator do PIB	Var. %	0.01	0.13	0.02	0.09	0.25
Remuneração média do capital	Var. %	0.01	0.15	0.02	0.1	0.27
Termos de Troca	Var. %	0	0.07	0.01	0.06	0.13
Nível de Atividade ou Valor Adicionado	Var. %	-0.15	-3.65	-0.08	4.5	0.62
Utilidade das Famílias	Var. %	0.09	2.1	0.66	0.66	3.52
Renda Real das Famílias	Var. %	0.06	1.36	0.07	0.42	1.91
Renda total das empresas	Var. %	0.01	0.2	0.02	0.11	0.34
Renda do Governo	Var. %	0.01	0.18	0.02	0.1	0.3
Receita Tributária	Var. %	0.01	0.14	0.01	0.08	0.24
Investimento por setor usuário	Var. %	0.27	2.97	0.44	13.1	16.78
Estoque de Capital, pesos de remuneração do capital	Var. %	-0.06	-1.98	-0.07	4.25	2.14
Demanda final por exportações	Var. %	1.69	-1.67	0.11	-1.01	-0.88

Fonte: Resultados do Estudo

Observa-se que todos os choques analisados resultariam em um aumento da renda real das famílias em comparação ao cenário de referência da economia brasileira até 2035 (*business-as-usual*), com destaque para o modal Rodoviário. O efeito líquido dos quatro choques combinados corresponderia a um desvio positivo da renda em aproximadamente 1,91% no longo prazo. Entre os modais, o transporte Rodoviário apresentaria o maior impacto sobre essa variável, respondendo por cerca de 71% do efeito agregado, ou seja, 1,36 pontos percentuais do total.

Ainda conforme a Tabela 3, para os quatro choques o deflator implícito do PIB, que representa uma referência geral dos custos e preços internos na economia, aumentaria em relação ao cenário base. O efeito líquido dos choques, em conjunto, corresponderia a um

desvio positivo do deflator em aproximadamente 0,25% no longo prazo. Este resultado poderia ser atribuído a múltiplos mecanismos: a redução dos custos nos setores de transporte aumenta a eficiência e a atividade econômica, o que geraria expansão da demanda agregada e pressionaria preços de fatores produtivos, especialmente em mercados com oferta relativamente inelástica no curto prazo. Além disso, a reestruturação do mix de insumos e os efeitos indiretos sobre outros setores produtivos também contribuiriam para a elevação do nível geral de preços. É importante ressaltar que o deflator do PIB reflete a variação média dos preços de toda a produção da economia, de modo que os impactos setoriais poderiam se propagar de maneira ampla, o que resultaria em elevação do índice mesmo diante de ganhos de eficiência em setores específicos.

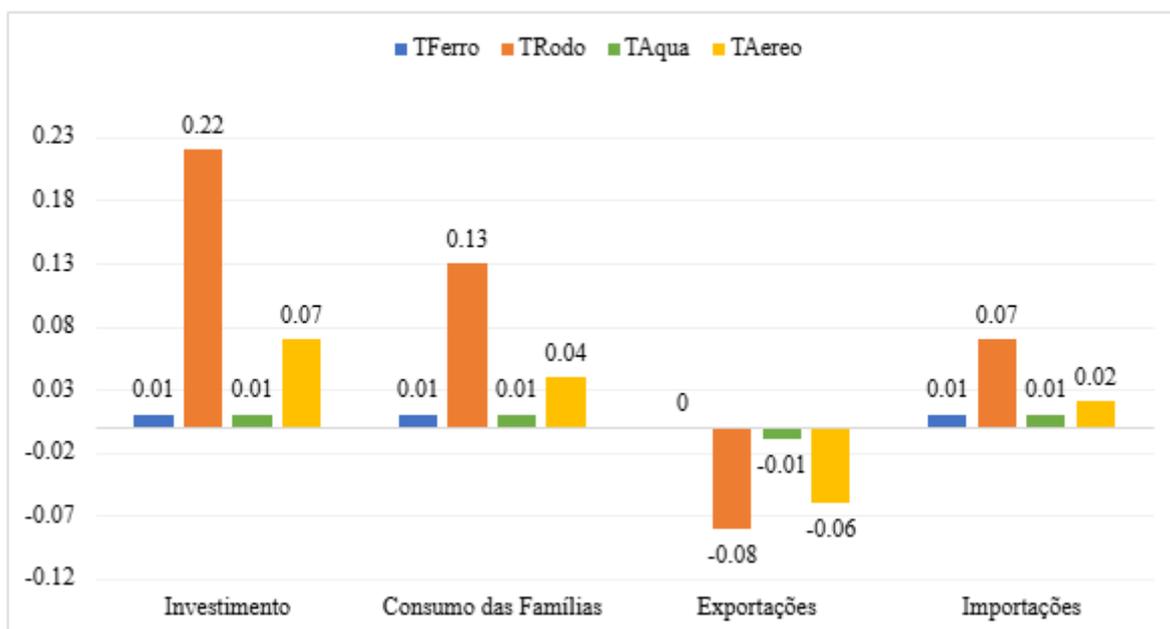
Os quatro choques provocariam um crescimento do PIB até 2035. O efeito líquido seria um acréscimo acumulado de aproximadamente 0,12% no PIB brasileiro em relação ao cenário de referência. O maior responsável pelo crescimento seria o modal rodoviário, que representaria cerca de 75% do efeito líquido sobre o crescimento da economia brasileira. Este resultado não é surpreendente, já que como já foi abordado este modal é predominante na matriz de transportes. O impacto poderia ser atribuído à redução dos custos de produção e transporte, ao aumento da competitividade setorial, e aos efeitos multiplicadores decorrentes da interligação dos setores de transporte com as demais cadeias produtivas

É possível identificar a contribuição relativa dos componentes da demanda para o crescimento que explicariam o comportamento do PIB. Sob a ótica do dispêndio, o Gráfico 1 mostra o impacto dos choques para algumas das variáveis de demanda. Por meio dela é possível aferir que as mudanças do PIB seriam majoritariamente impulsionadas pelo consumo das famílias e investimento, ao passo que a balança comercial sofreria variações negativas.

A análise dos choques mostra que o aumento da eficiência energética nos modais de transporte levaria a uma redução líquida de 0,88 pontos percentuais na demanda por exportações da economia brasileira. Esse efeito ocorreria principalmente porque o modelo considera uma função de demanda externa que reage negativamente aos aumentos dos preços internos, capturados pelo deflator do PIB, o qual reflete a variação média dos preços domésticos. Assim, à medida que os preços internos sobem, verifica-se uma relação inversa entre o deflator e o volume exportado, reduzindo a competitividade internacional dos produtos brasileiros. Esse mecanismo se intensificaria com a melhora relativa de 0,13% nos termos de

troca, pois o aumento dos preços de exportação eleva o valor unitário negociado, mas limita o volume exportado devido à sensibilidade da demanda internacional aos preços. Além disso, a elevação dos preços relativos domésticos incentivaria os consumidores nacionais a optar por produtos importados, o que provoca um aumento das importações.

Gráfico 1 – Efeitos dos choques sobre indicadores macroeconômicos



Fonte: Resultados do estudo.

O aumento do investimento indicaria que, diante do choque de eficiência energética nos modais de transporte, as empresas responderiam positivamente às novas oportunidades de expansão, motivadas por um ambiente mais produtivo e competitivo. No entanto, a avaliação das simulações revela efeitos heterogêneos sobre o investimento, a remuneração do capital e o estoque de capital, tanto em termos agregados quanto setoriais.

O investimento agregado apresentaria um crescimento de 0,32% em relação ao cenário base, com destaque para o modal rodoviário, cuja contribuição individual seria de 0,22%. O modal aeroviário também registraria impacto positivo, de 0,07%. Os modais ferroviário e aquaviário, por sua vez, exibiriam efeitos marginais, próximos de zero. O aumento do investimento nos dois primeiros modais indicaria que, diante do choque de eficiência energética, as empresas responderiam positivamente às novas oportunidades de expansão, motivadas por um ambiente mais produtivo e competitivo.

Por sua vez, a remuneração média do capital seguiria a dinâmica do investimento e cresceria 0,27% no total, com predomínio do modal rodoviário (0,15%) e participação relevante do aeroviário (0,10%). Beneficiados pelo ganho de eficiência, esses setores mostrariam maior capacidade de absorver capital e gerar retorno, o que atrairia mais investimentos e realocaria recursos de modais menos responsivos ou menos rentáveis diante do choque.

Já o estoque de capital mostraria variação mais modesta (0,08% no total), o que se explicaria pelo caráter cumulativo dessa variável, que responderia de maneira mais lenta aos incrementos do investimento. Mais uma vez, o modal rodoviário lideraria o resultado (0,05%), seguido de longe pelo aeroviário (0,01%), com impactos praticamente nulos nos demais modais.

Apesar do crescimento agregado do estoque de capital ponderado pela remuneração do capital (2,14%), o resultado esconderia uma forte assimetria entre os modais: enquanto o modal aeroviário apresentaria elevação de 4,25%, os modais ferroviário, rodoviário e aquaviário registram quedas (-0,06%, -1,98% e -0,07%, respectivamente). Essa assimetria indicaria um movimento de realocação de capital em direção ao setor aeroviário, que se tornaria significativamente mais rentável após o choque. Esse movimento indica que a economia não apenas ampliaria o volume de investimentos, mas também direcionaria de forma eficiente o capital para setores com maior potencial de valorização, o que contribuiria para o aumento da produtividade e para o fortalecimento do potencial de crescimento econômico no médio e longo prazo.

Além disso, os choques de eficiência energética nos diferentes modais de transporte resultariam em ganhos para as famílias e para o mercado de trabalho brasileiro, embora a magnitude e a origem desses ganhos variem conforme o modal. Como já mostrado, a renda real das famílias aumentaria 1,91% em relação ao cenário base, reflexo direto da maior eficiência produtiva, da redução dos custos de transporte e da valorização do salário real (0,23%). Ademais, a desagregação por faixas de renda, conforme apresentado na Tabela 4, evidencia que os impactos seriam relativamente mais significativos para os estratos de menor renda, sugerindo um caráter distributivo favorável dessas intervenções.

Tabela 4 – Efeitos dos choques sobre a renda real das famílias

Famílias	TFerro	TRodo	TAqua	TAereo
Família 1	0.006	0.145	0.007	0.035
Família 2	0.007	0.156	0.007	0.04
Família 3	0.007	0.155	0.008	0.041
Família 4	0.007	0.15	0.008	0.041
Família 5	0.006	0.144	0.007	0.041
Família 6	0.006	0.139	0.007	0.042
Família 7	0.006	0.127	0.007	0.04
Família 8	0.005	0.122	0.006	0.043
Família 9	0.005	0.115	0.006	0.046
Família 10	0.005	0.108	0.006	0.049

Fonte: Resultados do Estudo

Além disso, o salário real se elevaria a despeito do aumento do nível geral de preços para o consumidor, o que sugeriria que os repasses para o trabalhador advindos dos ganhos de produtividade superariam a elevação dos preços, mas também é importante adicionar que embora o deflator do PIB capte o aumento médio dos preços, bens ou serviços específicos poderiam ficar relativamente mais baratos, o que poderia contribuir para a elevação do salário real de algumas famílias desde que o preço de sua cesta de consumo aumente menos que proporcionalmente aos aumentos dos salários.

Este aumento dos salários reais teria como consequência a expansão da restrição orçamentária das famílias, que passariam a consumir mais (0,19%) em relação ao cenário base. Este aumento refletiria na melhoria geral do nível de utilidade das famílias. Este indicador de bem-estar agregado registraria um aumento expressivo de 3,52%. Esse resultado evidencia que os choques de eficiência energética promoveriam ganhos de bem-estar, distribuídos tanto pelo aumento do consumo quanto pela ampliação do acesso a bens e serviços mais baratos e de melhor qualidade.

Os resultados desagregados da Tabela 5 demonstram o aumento da utilidade das famílias decorrente dos choques de eficiência energética. Eles se espalhariam de forma ampla pela sociedade, mas com intensidades variadas entre as famílias. O modal rodoviário exerceria o papel de liderança, responsável pela maior parte do ganho de utilidade em todos os grupos analisados, com valores que oscilam de 0,166% para a Família 10 a 0,247% para a

Família 3. Esse padrão sugeriria que todas as famílias, independentemente de sua posição na distribuição de renda, seriam beneficiadas pelos avanços na eficiência desse modal.

Tabela 5 – Efeitos dos choques sobre a utilidade das famílias

Famílias	TFerro	TRodo	TAqua	TAereo
Família 1	0.01	0.233	0.011	0.055
Família 2	0.011	0.219	0.012	0.063
Família 3	0.011	0.247	0.012	0.065
Família 4	0.011	0.209	0.012	0.066
Família 5	0.01	0.229	0.011	0.065
Família 6	0.01	0.222	0.011	0.067
Família 7	0.009	0.202	0.01	0.064
Família 8	0.008	0.195	0.01	0.069
Família 9	0.007	0.176	0.009	0.072
Família 10	0.007	0.166	0.009	0.076

Fonte: Resultados do Estudo

Os ganhos proporcionados pelos modais ferroviário e aquaviário, apesar de positivos, manteriam-se em patamares baixos e bastante próximos entre as famílias, o que indicaria um efeito marginal e relativamente uniforme desses modais sobre o bem-estar. Por outro lado, o modal aeroviário mostraria leve tendência de impacto crescente sobre a utilidade das famílias conforme se avança para os grupos de maior renda, passando de 0,055% para a Família 1 até 0,076% para a Família 10. Esse resultado sugeriria que a eficiência no transporte aéreo tende a beneficiar proporcionalmente mais as famílias de renda mais alta, possivelmente devido a um padrão de consumo e mobilidade que se incorporaria com mais intensidade a esse serviço.

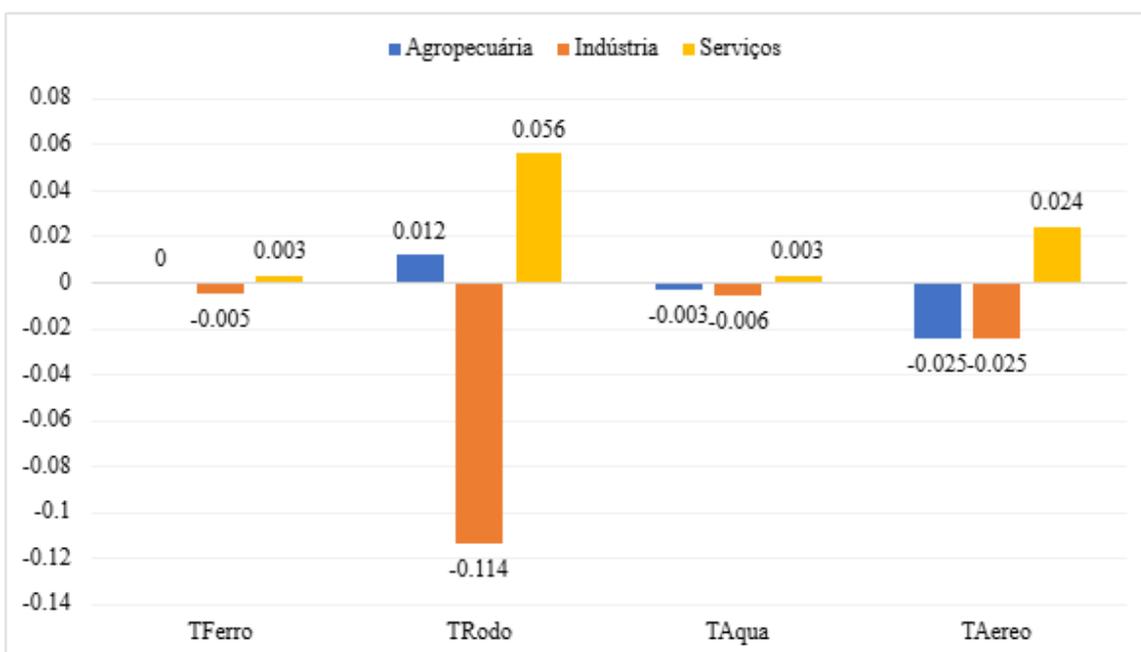
No mercado de trabalho, o impacto sobre o emprego agregado apareceria de forma moderada (0,02%), indicando que, apesar do avanço tecnológico, a maior eficiência não implicaria em destruição líquida de empregos. Pelo contrário, o aumento da produção e da demanda agregada poderia compensar possíveis substituições de mão de obra. O crescimento do salário real, mais robusto do que o do emprego, reforça a ideia de que o ganho de produtividade permitiria valorizar o fator trabalho, transferindo parte dos ganhos de eficiência para os trabalhadores.

Quanto à receita do governo, as simulações mostraram incrementos positivos tanto para a renda do governo quanto para a arrecadação tributária em todos os modais. Novamente o destaque iria para os modais rodoviário e aeroviário, que registrariam aumentos de 0,18% e 0,10% e 0,14% e 0,08% respectivamente para a renda e receita tributária. Novamente, os modais ferroviário e aquaviário mostrariam resultados muito pouco expressivos, de modo a serem marginalmente próximos de zero. Da mesma forma, seria possível observar o aumento das receitas tarifárias do governo, que aproveitariam do maior crescimento dos transportes rodoviário e aeroviário já explicados para a arrecadação.

4.2 Resultados setoriais

A seção anterior focou em elucidar o impacto dos choques de eficiência no uso de combustíveis sobre as principais variáveis macroeconômicas da economia brasileira. Por sua vez, esta seção complementar analisa o comportamento da produção em alguns setores chave para simulações realizadas. O Gráfico 2 apresenta o impacto acumulado dos quatro choques nos 3 grandes setores da economia: Agropecuária, Indústria e Serviços. As barras do gráfico ilustram o desvio do nível de atividade ou valor adicionado do setor após os choques percentualmente em relação ao cenário base.

Gráfico 2 – Efeitos dos choques sobre os 3 grandes setores da economia



Fonte: Resultados do estudo.

Ao mesmo tempo, a Tabela 6 detalha melhor alguns dos maiores impactos dos choques entre setores e produtos. Como é possível observar, a produção agregada da agropecuária apresentaria queda marginal (-0,017%), porém ao analisar o setor de forma mais desagregada vemos que haveria um impacto negativo em culturas importantes e com cadeias logísticas mais integradas a transportes de longa distância como cana de açúcar (-0,183%), soja (-0,162%), algodão (-0,174%) e milho (-0,135%). O arroz, mais voltado ao consumo interno, teria impacto negativo menor (-0,06%).

O modal rodoviário, dominante no escoamento da produção agrícola no Brasil, exerceria papel duplo. Por um lado, ele ofereceria um efeito positivo para a agropecuária agregada (+0,012%) – refletindo a redução do custo do frete e o barateamento do acesso aos mercados consumidores e exportadores. Contudo, para certas culturas, o choque rodoviário seria negativo (por exemplo, -0,153% para cana e -0,081% para soja). Por sua vez, o modal aeroviário teria impacto negativo para todas as culturas analisadas, ainda que estas não sejam grandes usuárias do modal aéreo. Esse resultado seria indício do efeito de encadeamento indireto, em que a valorização dos preços internos (captados pelo aumento do deflator do PIB) prejudicaria a competitividade das cadeias exportadoras e deslocaria recursos dentro da economia, de forma a aumentar custos relativos de insumos e mão de obra.

Já no setor secundário, a indústria apresentaria retração (-0,15%). A indústria extrativa (-0,535%) seria bastante impactada, especialmente no modal rodoviário (-0,438%), pois depende da logística para exportação de minério. Curiosamente, o próprio minério de ferro exibiria comportamento misto: positivo no ferroviário (+0,029%) e negativo nos demais. Isso revela que, para produtos altamente dependentes do transporte ferroviário (eficiente no transporte de commodities pesadas), o choque positivo no modal TFerro ainda conseguiria compensar parcialmente as pressões negativas globais.

Por sua vez, setores intensivos em combustíveis fósseis, como refino de petróleo (-1,316%), diesel B (-2,584%), outros refinados (-1,126%), naftas (-0,41%), e óleo combustível (-0,342%) teriam queda de produção em todos os modais, mas especialmente no rodoviário. O mecanismo seria: a eficiência energética reduziria a demanda por combustíveis e derivados, pressionando negativamente a cadeia do refino e, por conseguinte, a própria indústria extrativa (petróleo/gás). O efeito seria ainda maior no caso do combustível de aviação (-2,668%), puxado por uma queda no segmento aeroviário (-2,574%). Ao mesmo

tempo, o aumento da eficiência favoreceria soluções alternativas ao combustível fóssil, como mostra o desvio de +6,368% nos Combustíveis Sustentáveis de Aviação (CSA). Como evidenciado pelo crescimento do investimento e da remuneração do capital no modal aéreo, recursos produtivos seriam atraídos para segmentos com maior potencial de valorização. Isso se refletiria não só no aumento da produção de CSA, mas também em ganhos relativos de produtividade e rentabilidade no setor aéreo como um todo.

O choque de redução de demanda na indústria petroquímica é o principal fator para a perda do nível de atividade da indústria nacional. Porém, setores menos expostos à matriz fóssil ou com demanda mais elástica a custos logísticos mostram resiliência ou ganhos, como alimentos (+0,117%), principalmente via modal rodoviário (+0,11%), e gasoalcool (+0,091%). Esses setores captam a transferência dos ganhos de eficiência logística para os custos de produção, que reduzem preços finais e estimulam a demanda.

Tabela 6 – Efeitos dos choques sobre setores e produtos

Setores	TFerro	TRodo	TAqua	TAereo	Total
	2027-2035	2027-2035	2027-2035	2027-2035	2027-2035
Produção					
Agropecuária	0.000	0.012	-0.003	-0.025	-0.017
Cana de Açúcar	-0.009	-0.153	-0.006	-0.016	-0.183
Soja	-0.006	-0.081	-0.009	-0.067	-0.162
Algodão	-0.007	-0.086	-0.01	-0.071	-0.174
Milho	-0.005	-0.06	-0.008	-0.061	-0.135
Arroz	-0.001	-0.005	-0.006	-0.048	-0.06
Indústria	-0.005	-0.114	-0.006	-0.025	-0.15
Indústria Extrativa	-0.014	-0.438	-0.014	-0.07	-0.535
Minério de Ferro	0.029	-0.106	-0.011	-0.073	-0.161
Alimentos	0.006	0.11	0.001	0.000	0.117
Refino de Petróleo	-0.057	-1.104	-0.04	-0.115	-1.316
Combustível de aviação	-0.007	-0.087	0.000	-2.574	-2.668
Gasóilcool	0.001	0.042	0.008	0.04	0.091
Naftas para petroquímica	-0.018	-0.304	-0.011	-0.076	-0.41
Óleo Combustível	-0.001	-0.013	-0.301	-0.027	-0.342
Diesel B	-0.125	-2.419	-0.043	0.003	-2.584
Outros Refinos	-0.05	-0.951	-0.033	-0.093	-1.126
Etanol e outros biocombustíveis	-0.024	-0.432	-0.015	-0.038	-0.509
Combustível sustentável de aviação	-0.009	-0.042	-0.005	6.424	6.368
Serviços	0.003	0.056	0.003	0.024	0.086
Construção Civil	0.012	0.199	0.01	0.063	0.284
Transporte de cargas	-0.002	0.029	0.028	-0.01	0.045
TFerro	0.026	0.009	-0.004	-0.018	0.013
TRodo	0.002	0.054	-0.001	0	0.055
TAqua	-0.014	-0.23	0.376	-0.067	0.065
TAereo	-0.002	-0.009	-0.001	1.3	1.288
Eletr. Comunicações	0.008	0.134	0.008	0.046	0.195
Transporte de passageiros	0.005	0.193	0.007	0.007	0.211

Fonte: Resultados do Estudo

De modo geral, o setor de serviços seria o mais beneficiado pelo choque, com alta na produção agregada (+0,086%). O impacto positivo seria distribuído entre os modais, com ênfase para o rodoviário (+0,056%) e contribuição significativa do aeroviário (+0,024%). Os mecanismos que explicam os resultados da simulação sobre este setor estão intimamente ligados com o aumento do salário real e da renda das famílias, ambos documentados na subseção anterior, que elevariam a demanda por serviços em geral, sejam eles de consumo final ou mobilidade, o que impacta diretamente na utilidade e bem-estar.

Entre as atividades que seriam mais favorecidas dentro do setor de serviços estariam a construção civil (+0,199%), eletrocomunicações (+0,195%) e transporte de passageiros (+0,211%). No Transporte de cargas (+0,0045%) as mudanças parecem ser modestas quando positivas, mas vale destacar o bom desempenho do Transporte Aquaviário (+0,376%) e também do Aeroviário (+1,3%). No caso de TAqua, é interessante observar que o crescimento no modal seria acompanhado por uma queda no rodoviário, o que poderia indicar um efeito substituição entre os dois.

Pelo lado do investimento, a Tabela 7 nos mostra os desvios percentuais da variável de investimento por setor em relação ao cenário base. Na tabela foram destacados os principais setores mais impactados positivamente ou negativamente.

Tabela 7 – Setores beneficiados/prejudicados pela ótica do Investimento

	Setores	TFerro	TRodo	TAqua	Total
Setores Beneficiados	Outras Lavouras	0.081	1.381	0.076	4.505
	Arroz	0.008	0.205	0.01	3.732
	Milho	0.01	0.197	0.01	2.796
	Algodão	0.009	0.197	0.01	2.795
	Cana de açúcar	0.008	0.197	0.01	2.793
	Soja	0.009	0.196	0.01	2.793
	Bovinos	0.064	1.071	0.055	1.522
	Leite	0.045	0.855	0.042	1.194
	Suínos	0.024	0.798	0.036	1.029
	Aves	0.022	0.579	0.023	0.751
Setores Prejudicados	Transporte Rodoviário	-0.029	-0.514	0.053	-0.208
	Transporte Dutoviário	-0.023	-0.369	-0.021	-0.482
	Transporte de Passageiros	0.002	0.013	-0.546	-0.485
	Transporte Aquaviário	-0.032	-0.486	-0.02	-0.658
	Transporte Aéreo	-0.058	-1.041	-0.03	-1.169
	Armazenamento	-0.064	-1.22	-0.037	-1.431
	Aeroporto	-0.078	-1.466	-0.037	-1.739
	Serviços Administrativos	-0.104	-1.86	-0.086	-2.327
	Pesquisa e Desenvolvimento	-0.012	-0.164	0.008	-5.019
	Serviços Diversos	-0.267	-4.693	-0.114	-5.081

Fonte: Resultados do Estudo

Nota-se um contraste quando comparada à variável de atividade dos setores. Os setores que mais experimentariam expansão em seus investimentos seriam primeiramente aqueles ligados à atividade agropecuária, como o Arroz (+3,73%), Milho (+2,80%), Algodão (+2,80%), Cana-de-açúcar (+2,79%) e Soja (+2,79%). Este aumento poderia ser explicado pela elevação do consumo das famílias e aumento da renda real, que ampliaria o mercado para alimentos. O choque no modal aeroviário parece que criaria uma expectativa de ganhos logísticos ou de valorização dos ativos agrícolas. Além disso, o investimento rodoviário relevante (+0,19 a +1,38% nos grandes cultivos), reforçaria o papel do transporte rodoviário no escoamento eficiente da produção agrícola. De forma análoga, a pecuária seria particularmente beneficiada pelo ambiente de investimento propiciado pelos ganhos de renda e consumo doméstico, com crescimento nos setores Bovinos (+1,52%), Leite (+1,19%) e Suínos (+1,03%).

Os desvios mais baixos de investimento, por outro lado, seriam concentrados nos setores de infraestrutura, logística tradicional e serviços diversos. Seriam observados desvios negativos nos setores Serviços Diversos (-5,08%), Pesquisa e Desenvolvimento (-5,01%), Serviços Administrativos (-2,33%), Aeroportos (-1,73%), Armazéns (-1,43%), Transporte Aéreo (-1,17%) e Transporte Aquaviário (-0,66%). A principal hipótese desse efeito jaz na redução da demanda direta por serviços tradicionais, em parte por racionalização e ganhos de eficiência que reduziriam a necessidade de serviços de apoio e intermediação. Em aeroportos, armazéns e logística tradicional, a elevação da eficiência reduziria a necessidade de investimentos em infraestrutura extensiva, pois a mesma demanda é atendida com maior produtividade. Ao mesmo tempo, serviços de pesquisa e P&D ligados a tecnologias tradicionais ou intermediárias perderiam espaço para setores inovadores mais integrados às novas cadeias produtivas (biocombustíveis, alta tecnologia agrícola, etc.).

A queda de investimento em transporte aéreo (-1,17%) contrastaria com o aumento expressivo nos combustíveis sustentáveis de aviação e subsectores ligados à inovação logística. Esse paradoxo se explicaria porque o modal aéreo tradicional sofre ajuste estrutural, enquanto o novo segmento (CSA/SAF) recebe capital. O setor apresentaria um desvio positivo de +1,725% em relação ao cenário base. Isso indicaria transição dentro do próprio modal, com modernização e mudança de perfil dos ativos.

4.3 Resultados de emissão

Esta seção completa as análises acima através da investigação dos resultados de emissões totais de dióxido de carbono obtidos através das simulações. Como produtos de quase toda atividade econômica humana, os efeitos gerados pela liberação de gases do efeito estufa hoje estão entre as principais preocupações ambientais de especialistas e amplamente discutidos em encontros globais sobre o clima, inclusive com o estabelecimento de metas e compromissos de redução de emissões.

Este trabalho aponta o aumento da eficiência do uso de combustíveis como uma alternativa para a redução das emissões de GEE que não sacrifica o crescimento econômico, porém, é importante ter em mente o chamado Efeito Rebote, que chama atenção para o fato de

que a redução nos custos de produção na economia gerados pelo barateamento dos fretes pode vir a aquecer mais a economia e aumentar a atividade ao ponto onde o efeito líquido da política sobre as emissões é positivo, não negativo. Neste sentido, a Tabela 8 resume os dados de emissões de dióxido de carbono medidos em ktCO_{2e} (quilotoneladas de dióxido de carbono equivalente) e também em variação percentual em relação ao volume de emissões do ano base (2015).

A aplicação dos choques nos modais Ferroviário, Rodoviário, Aquaviário e Aeroviário teriam um efeito de -0,681% nas emissões totais de CO_{2e} associadas ao consumo de combustíveis, o que corresponde a uma queda acumulada de aproximadamente 10.058 ktCO_{2e} no período de 2027 a 2035.

O principal canal de redução identificado nos resultados diz respeito ao modal rodoviário, que apresentaria a maior queda absoluta nas emissões: cerca de 8.675 ktCO_{2e}, o que representaria uma redução de 0,587% em termos relativos. Essa magnitude decorreria da elevada participação desse modal no consumo de combustíveis fósseis, especialmente Diesel B, cuja emissão acumulada cairia em mais de 6.460 ktCO_{2e}. A substituição de insumos fósseis por fontes mais limpas ou o simples uso mais eficiente de combustível por quilômetro transportado contribuiria diretamente para esse resultado.

Por outro lado, os efeitos sobre o modal aeroviário seriam mais ambíguos. Embora os resultados mostrem uma redução nas emissões provenientes do uso de combustível de aviação (-6,53%, ou -720 ktCO_{2e}), observaria-se um crescimento marginal nas emissões relacionadas ao uso de combustíveis alternativos, como os biocombustíveis do tipo SAF (Sustainable Aviation Fuels). Esses aumentos seriam pequenos em termos absolutos, mas refletiriam a substituição parcial de fontes fósseis por fontes renováveis. Ainda que tais biocombustíveis possam ter pegadas de carbono inferiores, sua produção e uso também geram emissões, que passaram a ser capturadas no modelo. Assim, o efeito líquido no modal aeroviário seria uma queda de 0,059% nas emissões, ou -866 ktCO_{2e}, indicando que os ganhos de eficiência e adoção de combustíveis alternativos superariam os efeitos compensatórios.

Os modais ferroviário e aquaviário, por sua vez, seguiriam o comportamento que apresentaram no resto do estudo e experimentariam mudanças modestas, tanto em termos relativos (-0,028% no ferroviário e -0,007% no aquaviário) quanto em termos absolutos (-415

ktCO₂e noo ferroviário e -102 ktCO₂e no aquaviário). Nesse contexto, os resultados indicariam que os modais já relativamente eficientes apresentariam ganhos marginais adicionais com choques de eficiência energética.

Por fim, deve-se destacar que, embora o resultado agregado seja ambientalmente favorável, os efeitos adversos não seriam desprezíveis. Em alguns casos, como no aumento de emissões ligadas à atividade econômica indireta (+559 ktCO₂e), percebe-se a ocorrência do efeito rebote indireto.

Tabela 8 – Efeitos sobre emissões de CO2e por combustível

Combustíveis	TFerro		TRodo		TAqua		TAereo		Efeito Líquido	
	2027-2035		2027-2035		2027-2035		2027-2035		2027-2035	
	Var.%	Valor acumulado (ktCO2e)	Var.%	Valor acumulado (ktCO2e)						
ExplFlo	0	0.03	0.01	0.95	0	-0.04	-0.003	-0.327	0.006	0.62
Carvão Mineral	0.002	0.52	0.059	12.87	0	-0.08	0.002	0.454	0.063	13.76
Combustível de Aviação	0	0	-0.01	-1.1	0	0	-6.53	-720.226	-6.54	-721.33
Gasoolcool	-0.037	-26.37	-0.58	-412.75	0.004	2.5	0.026	18.74	-0.587	-417.88
Nafta Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo Combustível	-0.046	-10.26	-0.941	-207.96	-0.019	-4.09	-0.004	-0.838	-1.01	-223.15
Diesel B	-0.216	-321.59	-4.343	-6461.22	-0.031	-46.55	-0.004	-6.094	-4.595	-6835.46
Outros Refinos	-0.017	-82.41	-0.365	-1750.61	-0.009	-41.82	-0.034	-163.995	-0.425	-2038.84
Etanol B	-0.23	-18.48	-4.661	-375.13	-0.042	-3.36	0.005	0.423	-4.927	-396.55
SAFCan2GATJ	0	0	-0.01	0	0	0	1.3	0.263	1.29	0.26
SAFCan1GATJ	0	0	-0.01	0	0	0	1.3	0.131	1.29	0.13
SAFEuc2GATJ	0	0	-0.01	0	0	0	1.3	0.263	1.29	0.26
SAFPalmHEF	0	0	-0.01	-0.01	0	0	1.3	0.789	1.29	0.78
SAFVegOHEF	0	0	-0.01	-0.01	0	0	1.3	0.657	1.29	0.65
Atividade econômica indireta	0.006	43.11	0.074	519.83	-0.001	-8.2	0.001	4.17	0.079	558.91
Total	-0.028	-415.45	-0.587	-8675.15	-0.007	-101.63	-0.059	-865.59	-0.681	-10057.83

Fonte: Resultados do Estudo

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta monografia teve como objetivo analisar os impactos do aumento da eficiência energética dos transportes sobre a economia e as emissões de gases do efeito estufa. As projeções desses efeitos econômicos podem ajudar a melhor compreender as consequências de avanços técnicos e políticas que melhorem o manejo e utilização de combustíveis na matriz de transportes brasileira visando ganhos de eficiência. Para chegar a tal resultado a presente monografia utiliza de 4 simulações, uma para cada um dos modais onde o choque foi aplicado: Transporte Ferroviário, Rodoviário, Aquaviário e Aeroviário. A magnitude do choque foi de 1% ao ano por 10 anos, até 2035.

Para atender à demanda da pesquisa foi utilizado um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) de dinâmica recursiva, que abrange um módulo fiscal derivado de uma Matriz de Contabilidade Social (MCS) e possui um módulo de emissão de CO₂ na estrutura teórica. Esta abordagem oferece a possibilidade de estudar os efeitos dos choques de eficiência energética ao longo dos anos em comparação com um cenário de referência e gerar resultados macroeconômicos e setoriais para o estudo de variáveis de interesse. Além disso, dada a estrutura do modelo as quatro simulações podem ser comparadas e somadas para calcular o efeito líquido dos choques para todos os quatro modais simultaneamente.

Ao analisar os resultados das simulações no âmbito macroeconômico, os impactos mais fortes do aumento da eficiência recairiam sobre o bem estar e a renda das famílias de todos os estratos. Essas evidências seriam fortalecidas pelo aumento do salário médio real dos trabalhadores à despeito do aumento na inflação, o que indicaria que o crescimento na remuneração do trabalho mais que compensaria o aumento do nível de preços. Este aumento dos salários teria como consequência a expansão da curva de restrição orçamentária das famílias, que passariam a consumir mais. Este aumento no consumo seria o principal impulsionador para o crescimento do PIB no período.

O aumento do nível geral de preços contribuiria para a redução nas exportações brasileiras, uma vez que se tornam menos competitivas no cenário internacional devido à sensibilidade da demanda externa aos preços. Além disso, a inflação elevaria os preços relativos dos bens domésticos e incentivaria os consumidores nacionais a optarem por produtos importados, o que provocaria um aumento das importações.

No lado das empresas, o investimento agregado apresentaria crescimento no período, assim como a remuneração do capital, com destaque para os modais rodoviário e aeroviário, que seriam mais capazes de atrair investimentos e gerar retorno do que os outros dois.

Por sua vez, os setores mais beneficiados pelos choques seriam aqueles prestadores de serviços. Os mecanismos que explicam este resultado positivo estão intimamente ligados com o aumento do salário real e da renda das famílias, que elevariam a demanda por serviços em geral, o que impactaria diretamente a utilidade e o bem estar. A redução dos custos de transporte e mobilidade favoreceria setores como construção civil, eletrocomunicações e transporte de passageiros.

A indústria apresentaria perdas agregadas em sua produção, puxadas pelos setores produtores ou dependentes de combustíveis fósseis como o refino de petróleo. A eficiência energética reduziria a demanda por combustíveis e derivados, de forma a pressionar negativamente a cadeia de refino e a indústria extrativa. Ao mesmo tempo, observaria-se um favorecimento a alternativas sustentáveis em biocombustíveis, com destaque para os Combustíveis Sustentáveis de Aviação.

Quanto ao investimento setorial, os setores que mais experimentariam expansão nos investimentos seriam aqueles ligados à atividade agropecuária. Os desvios mais baixos, por outro lado, se concentrariam nos setores de infraestrutura e logística, que frente a uma redução nos custos de transporte diminuiria a necessidade de melhoramentos e pesquisa na otimização de rotas e processos.

No que tange às emissões, todas as simulações geraram variação negativa em relação ao cenário base para a produção de dióxido de carbono, o que indicaria que o efeito rebote não é grande o suficiente para compensar a economia de emissões gerada pelo aumento da eficiência.

Como era de se esperar, o principal canal de redução observado seria o modal rodoviário, graças à sua predominância na matriz de transportes brasileira e à dependência do Diesel B. Por outro lado, os efeitos do modal aeroviário seriam mais ambíguos, pois embora as emissões fósseis se reduzissem, haveria um crescimento marginal daquelas emissões relacionadas a combustíveis alternativos. Os modais ferroviário e aquaviário, por sua vez,

seguiriam o comportamento mais modesto que apresentaram ao longo do estudo também para as emissões, com mudanças marginais tanto em termos relativos quanto absolutos. Neste sentido, os resultados indicam que estes dois últimos modais podem ser relativamente eficientes e apresentarem ganhos marginais em choques dessa natureza.

Em síntese, a análise da eficiência energética no setor de transportes revela um cenário complexo e dinâmico para o Brasil. As projeções realizadas apontam estímulos à atividade econômica guiadas predominantemente pelo aumento do consumo e investimentos, ao mesmo tempo que impactariam negativamente a competitividade internacional dos produtos brasileiros. As dinâmicas setoriais, por sua vez, indicam ganhos nos setores de serviços que elevam o bem estar médio das famílias e uma contração na indústria puxada pela retração da demanda na indústria petroquímica. Na esfera ambiental, os resultados mostram que o impacto nas emissões de GEE é negativo, o que indicaria que seria sim possível quebrar a dicotomia clássica entre meio ambiente e economia por meio do aumento da eficiência.

O uso de um modelo de Equilíbrio Geral Computável dinâmico compõe uma inovação na discussão do tema, ao produzir resultados de fácil interpretação e que podem apoiar pesquisas posteriores. No entanto, vale ressaltar a limitação inerente à ausência de uma análise regional, pois a diversidade da estrutura de transportes entre os estados brasileiros teria diferente impacto sobre os resultados. Trabalhos futuros podem se aproveitar e expandir as discussões no tema usando as mesmas ferramentas para incluir uma análise regional a fim de identificar possíveis gargalos de eficiência. Ademais, também seria possível expandir a discussão sobre o uso alternativo de biocombustíveis e os impactos da adoção de políticas como o Combustível do Futuro sobre as mesmas variáveis discutidas aqui.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, Henrique. Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos. Rio de Janeiro: ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain, 21 ago. 2020. Disponível em: <https://ilos.com.br/matriz-de-transportes-do-brasil-a-espera-dos-investimentos/>. Acesso em: 29 maio 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Eficiência energética no setor de transportes da União Europeia. Rio de Janeiro: ANP, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/notas-e-estudos-tecnicos/estudos-tecnicos/arquivos/2014/estudo-tematico-1-2014-spd.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025.
- BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas. **Journal of Transport Literature**, v. 10, n. 3, p. 15–19, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/2238-1031_jtl.v10n3a3. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2238-1031_jtl.v10n3a3. Acesso em: 29 maio 2025.
- BETARELLI JUNIOR, A. A.; FARIA, W. R.; GONÇALVES MONTENEGRO, R. L.; BAHIA, D. S.; GONÇALVES, E. Research and development, productive structure and economic effects: assessing the role of public financing in Brazil. **Economic Modelling**, v. 90, p. 235–253, 1 ago. 2020.
- BERGTHORSON, J. M.; THOMSON, M. J. A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1393–1417, 2015. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008594>. Acesso em: 29 maio 2025.
- BOZOKY, M. J.; OLIVEIRA, A. A. P.; DELIBERADOR, L. R.; FORMIGONI, A.; JACUBAVICIUS, C. Análise do modal ferroviário no transporte de soja do Centro-Oeste aos portos. **INOVAE – Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation**, v. 2, n. 1, p. 50–61, 16 maio 2014. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/349>. Acesso em: 7 mar. 2023.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Estudo EEMU 1: cálculo e monitoramento da eficiência energética da mobilidade urbana. Brasília: MDR, [s.d.]. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEMOB/ArquivosPDF/eficiencia/publicacoes/estudoeemu1calculoemonitoramentodaeficienciaenergeticadamobilidadeurbana.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025.
- BRASIL. Presidente Lula sanciona Lei do Combustível do Futuro para promover a mobilidade sustentável. Brasília: Palácio do Planalto, 8 out. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/10/presidente-lula-sanciona-lei-do-combustivel-do-futuro-para-promover-a-mobilidade-sustentavel>. Acesso em: 29 maio 2025.

BRASIL. Senado Federal. Lei que incentiva 'combustíveis do futuro' é sancionada com vetos. Brasília: Senado Federal, 10 out. 2024b. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/10/10/lei-que-incentiva-combustiveis-do-futuro-e-sancionada-com-vetos>. Acesso em: 29 maio 2025.

BUNDSCHUH, J.; KACZMARCZYK, M.; GHAF FOUR, N.; TOMASZEWSKA, B. State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: present and future prospects. **Desalination**, v. 508, 2021. Art. 115035. ISSN 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916421001065>. Acesso em: 29 maio 2025.

CAMBRIDGE ECONOMETRICS; ERNST & YOUNG; SQ CONSULT. The macro-level and sectoral impacts of energy efficiency policies. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2017-07/the_macro-level_and_sectoral_impacts_of_energy_efficiency_policies_0.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

CAXITO, F.; SCHUCK, A.; VASCONCELOS, A. M. de. Eficiência energética e emissão de poluentes de veículos leves etiquetados pelo PBE veicular. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, p. 13834–13846, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i8.2624. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2624>. Acesso em: 29 maio 2025.

COELHO, S. T.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P. Biofuels – advantages and trade barriers. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Suani-Coelho/publication/239615871_Biofuels_-_Advantages_and_Trade_Barriers/links/00463538f0d3c2bd2b000000/Biofuels-Advantages-and-Trade-Barriers.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

DE LA RUE DU CAN, S.; SATHAYE, J.; PRICE, L.; McNEIL, M. Energy efficiency indicators methodology booklet. Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/6tz8873z>. Acesso em: 29 maio 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional: relatório síntese 2024 (ano base 2023). Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 16 set. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Demanda de energia dos veículos leves: 2024–2033. Nota Técnica NT EPE-DPG-SDB-2023-04. Brasília, DF: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-694/NT-EPE-DPG-SDB-2023-04_Demanda_Ve%C3%ADculos_Leves_2024-2033.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota de esclarecimentos – EPE: Combustível do futuro. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-873/topico-745/Nota%20de%20Esclarecimentos%20-%20EPE_Combust%C3%A0Dvel%20do%20Futuro.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

FEDERICI, M.; ULGIATI, S.; VERDESCA, D.; BASOSI, R. Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems: the case of Siena, Italy. **Ecological Indicators**, v. 3, n. 3, p. 155–169, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(03\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(03)00040-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X03000402>. Acesso em: 29 maio 2025.

GUIMARÃES, V. A.; D'AGOSTO, M.; LEAL JUNIOR, I.; SILVA, M.; DECASTRO, J.; FRANCA, L. Análise da evolução da eficiência energética no setor de transporte brasileiro. In: **Transporte em Transformação: vencedores do Prêmio CNT – Produção Acadêmica 2013**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 23–41. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285923735_Analise_da_evolucao_da_eficiencia_en_ergetica_no_setor_de_transporte_brasileiro. Acesso em: 29 maio 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy efficiency. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/energy-efficiency>. Acesso em: 29 maio 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy efficiency is the first fuel – and demand for it needs to grow. 2019a. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/energy-efficiency-is-the-first-fuel-and-demand-for-it-needs-to-grow>. Acesso em: 29 maio 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Multiple benefits of energy efficiency 2019. Paris: IEA, 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency-2019>. Acesso em: 29 maio 2025. Licença: CC BY 4.0.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Multiple benefits of energy efficiency 2019. Paris: IEA, 2019c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency-2019>. Acesso em: 29 maio 2025. Licença: CC BY 4.0.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. World energy outlook 2014. Paris: IEA, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2014>. Acesso em: 29 maio 2025. Licença: Creative Commons BY 4.0.

INFRA S.A. – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. Plano Nacional de Logística 2035: relatório executivo. Brasília, DF: Infra S.A., 2021. Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/planejamento/plano-nacional-de-logistica/plano-nacional-de-logistica-2035/relatorios/>. Acesso em: 29 maio 2025.

ISSAWI, Charles. The 1973 oil crisis and after. **Journal of Post Keynesian Economics**, v. 1, n. 2, p. 3–26, 1978. DOI: 10.1080/01603477.1978.11489099.

JEVONS, W. S. The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation and the probable exhaustion of our coal-mines. London: Macmillan and Co., 1865.

KANWAL, S.; MEHRAN, M. T.; HASSAN, M.; ANWAR, M.; NAQVI, S. R.; KHOJA, A. H. An integrated future approach for the energy security of Pakistan: replacement of fossil fuels with syngas for better environment and socio-economic development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 156, 2022. Art. 111978. ISSN 1364-0321. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111978>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121012429>. Acesso em: 29 maio 2025.

KUMAR, A.; CHOUDHARY, S. Energy requirement, resources and future management: a review. **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, v. 59, n. 11, p. 779–784, 2021.

Disponível em:

<https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/58620/1/IJPAP%2059%2811%29%20779-784.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025.

LANGVELD, J. W. A.; DIXON, J.; JAWORSKI, J. F. Development perspectives of the biobased economy: a review. **Crop Science**, v. 50, supl. 1, p. S-142–S-151, 2010. DOI:

<https://doi.org/10.2135/cropsci2009.09.0529>. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2135/cropsci2009.09.0529>. Acesso em: 29 maio 2025.

LLORCA, M.; JAMASB, T. Energy efficiency and rebound effect in European road freight transport. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 101, p. 98–110, 2017. ISSN 0965-8564. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.002>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856416307856>. Acesso em: 29 maio 2025.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono? **Economia Aplicada**, v. 20, n. 3, p. 273–310, 2016. Disponível em: <https://revistas.usp.br/ecoa/article/view/124395>. Acesso em: 29 maio 2025.

MCTIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 6. ed. Brasília, DF: MCTIC, 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025.

MONTESINOS, Hugo; CONNORS, Joseph; GWARTNEY, James. The Transportation-Communication Revolution: 50 Years of Dramatic Change in Economic Development. *Cato Journal*, Washington, DC, v. 40, n. 1, p. 153-198, Winter 2020. DOI: 10.36009/CJ.40.1.9. Disponível em:

<https://www.cato.org/cato-journal/winter-2020/transportation-communication-revolution-50-years-dramatic-change-economic>. Acesso em: 1 ago. 2025.

MOREIRA, J. R. Brazil's experience with bioenergy. In: HAZELL, P.; PACHAURI, R. K. (ed.). **Bioenergy and agriculture: promises and challenges**. Focus 14. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 2006. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/5055925_Bioenergy_and_agriculture_promises_and_challenges. Acesso em: 29 maio 2025.

NASS, L. L.; PEREIRA, P. A. A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop Science**, v. 47, n. 6, p. 2228, 2007. DOI: 10.2135/cropsci2007.03.016. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/43263498_Biofuels_in_Brazil_An_Overview.

Acesso em: 29 maio 2025.

NUNES, L. J. R. et al. The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on Greenhouse Gas Emissions and Global Warming. *Environments*, v. 10, n. 4, art. 66, 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 29 maio 2025.

OLSSON, O. et al. Time to tear down the pyramids? A critique of cascading hierarchies as a policy tool. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 7, n. 2, e279, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.279>. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.279>. Acesso em: 29 maio 2025.

OLSSON, O. et al. Time to tear down the pyramids? A critique of cascading hierarchies as a policy tool. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 7, n. 2, e279, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.279>. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.279>. Acesso em: 29 maio 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Population. Disponível em: <https://www.un.org/en/global-issues/population>. Acesso em: 29 maio 2025.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO – OCDE. The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda. Paris: OECD Publishing, 2009. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2009/04/the-bioeconomy-to-2030_g1gha07e/9789264056886-en.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

ÓHÁISEADHA, C.; QUINN, G.; CONNOLLY, R.; CONNOLLY, M.; SOON, W. Energy and climate policy—an evaluation of global climate change expenditure 2011–2018. *Energies*, v. 13, n. 18, p. 4839, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184839>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/18/4839>. Acesso em: 29 maio 2025.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? Concepts, issues and methodological issues. *Energy Policy*, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0301421596000171>. Acesso em: 29 maio 2025.

PRIEFER, Carmen; JÖRISSEN, Juliane; FRÖR, Oliver. Pathways to shape the bioeconomy. *Resources*, v. 6, n. 1, p. 10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources6010010>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/6/1/10>. Acesso em: 29 maio 2025.

ROBINSON, Emily. Influence of trade routes on cultural exchange in the Silk Road era. *European Journal of Historical Research*, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 1–13, 2024. Disponível em: <https://www.ajpojournals.org/journals/index.php/EJHR/article/download/2333/3031/8815>. Acesso em: 1 ago. 2025.

SCHUTZE, A.; HOLZ, R.; ASSUNÇÃO, J. Eficiência energética (EE) no Brasil e no mundo: mecanismos das políticas de EE em unidades consumidoras intensivas de eletricidade. Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative, 2022. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2023/01/230109-REL-GIZ-Mecanismos-de-EE.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025.

SIEGELMAN, R. L. et al. Challenges and opportunities for adsorption-based CO₂ capture from natural gas combined cycle emissions. **Energy & Environmental Science**, v. 12, n. 7, p. 2161–2173, 2019. Disponível em:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c9ee00505f>. Acesso em: 29 maio 2025.

SIDDIK, Md. Abubakkor; ISLAM, Md. Tariqul; ZAMAN, A. K. M. Mostafa; HASAN, Md. Mahmudul. Current status and correlation of fossil fuels consumption and greenhouse gas emissions. **International Journal of Energy, Environment and Economics**, Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, v. 28, n. 2, p. 103–118, 2021. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/357323190_Current_Status_and_Correlation_of_Fossil_Fuels_Consumption_and_Greenhouse_Gas_Emissions. Acesso em: 3 jun. 2025.

SILVA, A. C. A. C. da; PIZZOLATO, N. D. Using electric vehicles for freight transport: purposes and challenges to do an implementation in Brazil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, e01832, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210183r2vu2022L3OA>.

Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210183r2vu2022L3OA>. Acesso em: 20 maio 2025.

SZÉKÁCS, A. Environmental and ecological aspects in the overall assessment of bioeconomy. **Journal of Agricultural and Environmental Ethics**, v. 30, p. 153–170, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9651-1>. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10806-017-9651-1>. Acesso em: 29 maio 2025.

TSEMEKIDI TZEIRANAKI, S.; ECONOMIDOU, M.; BERTOLDI, P.; THIEL, C.; FONTARAS, G.; CLEMENTI, E. L.; FRANCO DE LOS RIOS, C. The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector.

Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 170, art. 103623, 2023. ISSN 0965-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103623>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856423000435>. Acesso em: 29 maio 2025.

VILLEN, F. B. et al. Descarbonização no transporte de cargas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. [5]–55, set. 2024. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/26087?&locale=pt_BR. Acesso em: 29 maio 2025.

WOHLFAHRT, J. et al. Characteristics of bioeconomy systems and sustainability issues at the territorial scale: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 898–909, 2019. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.385>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619319274>. Acesso em: 29 maio 2025.