

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

AMANDA LEONE RODRIGUES

IMPACTOS ECONÔMICOS E DESCARBONIZAÇÃO DAS PRÁTICAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DO SETOR FERROVIÁRIO DE CARGA NO BRASIL

JUIZ DE FORA

2026

AMANDA LEONE RODRIGUES

IMPACTOS ECONÔMICOS E DESCARBONIZAÇÃO DAS PRÁTICAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DO SETOR FERROVIÁRIO DE CARGA NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial a obtenção do título de Mestra em Economia. Área de concentração: Economia.

Orientador: Prof. Dra. Rosa Livia Gonçalves Montenegro
Coorientador: Prof. Dr. Admir Antonio Betarelli Junior

JUIZ DE FORA

2026

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

Leone Rodrigues, Amanda.

IMPACTOS ECONÔMICOS E DESCARBONIZAÇÃO DAS PRÁTICAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SETOR FERROVIÁRIO DE CARGA NO BRASIL / Amanda Leone Rodrigues.

-- 2026.

113 p.

Orientador: Rosa Livia Gonçalves Montenegro

Coorientador: Admir Antonio Betarelli Junior

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Economia. Programa de Pós-Graduação em Economia, 2026.

1. Transporte ferroviário. 2. Eficiência energética. 3. Emissões de CO2. 4. Equilíbrio geral computável. I. Gonçalves Montenegro, Rosa Livia, orient. II. Betarelli Junior, Admir Antonio, coorient. III. Título.

Amanda Leone Rodrigues

Impactos econômicos e descarbonização das práticas de eficiência energética do setor ferroviário de carga no Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Economia Aplicada. Área de concentração: Economia

Aprovada em 18 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Dr.ª Rosa Lívia Gonçalves Montenegro - Orientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Weslem Rodrigues Faria

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr.ª Aline Souza Magalhães

Universidade Federal de Minas Gerais

Juiz de Fora, 04/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Rosa Lívia Gonçalves Montenegro, Professor(a)**, em 18/02/2026, às 15:57, 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 19/02/2026, às 14:14, 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 **ALINE SOUZA MAGALHAES, Usuário Externo**, em 20/02/2026, às 15:44, 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-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2858173** e o código CRC **E7478F74**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e à espiritualidade que iluminam meu caminho e me sustentam diariamente. À minha família, deixo meu agradecimento mais profundo. À minha mãe, por todo o amor e apoio incondicional. Aos meus irmãos, Isabelle e Marcio, por serem meus grandes exemplos de determinação, coragem e garra. Vocês são meu alicerce, minha referência e a razão de eu querer ir cada vez mais longe. Agradeço também ao Pedro, meu namorado, pelo companheirismo e pela paciência, especialmente nos períodos em que precisei equilibrar múltiplas responsabilidades. Sua presença, incentivo e compreensão tornaram esse caminho mais leve.

Agradeço, de maneira especial, à minha orientadora, professora Dra. Rosa Lívia Gonçalves Montenegro, pela condução segura, paciente e rigorosa ao longo de todo o processo de pesquisa. Sua dedicação, disponibilidade, sensibilidade acadêmica e elevado padrão de exigência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação como pesquisadora. Agradeço igualmente ao meu coorientador, professor Dr. Admir Antonio Betarelli Junior, pelas valiosas contribuições, pelas sugestões sempre precisas e pela generosidade em compartilhar seu conhecimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora, registro meu reconhecimento pela qualidade da formação oferecida, que foi decisiva para ampliar minha visão crítica e fortalecer meu repertório analítico.

Agradeço à MRS Logística, cujo ambiente profissional, pautado pelo compromisso com a sustentabilidade e a inovação, constituiu uma importante fonte de inspiração para a definição do tema e das questões investigadas nesta dissertação. Registro um agradecimento especial à minha ex-gestora Luiza, que confiou em mim desde o início na decisão de conciliar as atividades corporativas e acadêmicas. Agradeço às minhas gestoras atuais, Larissa e Nathalia, por permitirem que eu continue percorrendo esse caminho que é tão importante para mim.

Registro meu agradecimento à FAPEMIG pelo fomento ao projeto de pesquisa que possibilitou o desenvolvimento do modelo utilizado como base metodológica desta dissertação.

RESUMO

As transformações decorrentes da transição energética e das demandas por descarbonização têm reposicionado o setor de transportes no debate sobre desenvolvimento econômico sustentável. No Brasil, embora as ferrovias desempenhem papel estratégico no escoamento de commodities e nos corredores logísticos, sua operação permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis. Ao longo das últimas décadas, o setor ferroviário passou por um processo de modernização, marcado por ganhos de produtividade, expansão de corredores logísticos e crescente adoção de métricas de desempenho. Nesse cenário, a eficiência energética ferroviária emerge como um instrumento relevante para mitigar emissões associadas ao consumo de diesel, reduzir custos operacionais e ampliar a competitividade do transporte de cargas. Dessa forma, esta dissertação avalia os impactos econômicos, energéticos e ambientais de trajetórias alternativas de eficiência energética no transporte ferroviário de carga no Brasil até 2040. Para isso, emprega-se um modelo de equilíbrio geral computável, em versão dinâmica recursiva, que reconhece o padrão de demanda, custos e estrutura produtiva das empresas concessionárias do setor ferroviário de carga. A desagregação na estrutura de dados do modelo foi derivada de diversas fontes de informações estatísticas secundárias, especialmente de bases físico-financeiras das principais concessionárias ferroviárias. Assim, esses novos aspectos do modelo conferem a capacidade de realizar simulações de dois cenários de intensificação da eficiência energética, representativos de trajetórias graduais e mais intensas de ganho de eficiência ao longo do horizonte de análise. Os respectivos cenários são formulados como choques intrassetoriais graduais de eficiência energética, associados à redução progressiva do consumo específico de diesel pelas concessionárias ferroviárias, permitindo avaliar seus efeitos cumulativos sobre indicadores macroeconômicos, estrutura produtiva, organização setorial e emissões de CO₂. Os resultados indicam que ganhos graduais de eficiência energética geram reduções expressivas de consumo de combustível e emissões, combinadas a impactos positivos, ainda que moderados, sobre produto, investimento e bem-estar, além de promoverem uma reorganização intrassetorial e intersetorial favorável a cadeias intensivas em logística ferroviária. A abordagem integra aspectos operacionais, energéticos e climáticos, contribuindo para o debate em curso sobre políticas relacionadas à transição para uma matriz de baixo carbono no setor ferroviário de carga.

Palavras-chave: Transporte ferroviário. Eficiência energética. Emissões de CO₂. Equilíbrio geral computável.

ABSTRACT

The transformations driven by the energy transition and decarbonization imperatives have repositioned the transport sector within the debate on sustainable economic development. In Brazil, although railways play a strategic role in the flow of commodities and along major logistics corridors, their operation remains strongly dependent on fossil fuels. Over recent decades, the sector has undergone a process of modernization, marked by productivity gains, the expansion of logistics corridors, and the increasing adoption of performance metrics. In this context, railway energy efficiency emerges as a relevant instrument to mitigate emissions associated with diesel consumption, reduce operating costs, and enhance the competitiveness of freight transport. Accordingly, this dissertation evaluates the economic, energy, and environmental impacts of alternative trajectories of energy efficiency in Brazilian freight rail transport through 2040. To this end, a computable general equilibrium model, in a recursive dynamic version, is employed, which explicitly represents the demand patterns, cost structures, and productive organization of freight railway concessionaires. This disaggregation in the model's database is derived from multiple sources of secondary statistical information, particularly physical and financial data from the main railway concessionaires. These features enable the simulation of two energy-efficiency intensification scenarios, representing gradual and more ambitious trajectories of efficiency gains over the analysis horizon. The scenarios are specified as gradual intrasectional energy-efficiency shocks associated with the progressive reduction in specific diesel consumption by railway concessionaires, allowing the assessment of their cumulative effects on macroeconomic indicators, productive structure, sectoral organization, and CO₂ emissions. The results indicate that gradual energy-efficiency gains generate substantial reductions in fuel consumption and emissions, combined with positive—albeit moderate—impacts on output, investment, and welfare, while also promoting intrasectional and intersectoral reorganization in favor of logistics-intensive production chains. The approach integrates operational, energy, and climate dimensions, contributing to the ongoing debate on policies and corporate strategies related to the transition toward a low-carbon matrix in the freight railway sector.

Keywords: Freight rail transport. Energy efficiency. CO₂ emissions. Computable general equilibrium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Anomalia da temperatura média global por década (1850–2009), em relação à média do período de referência 1961–1990	14
Figura 2 – Tendência global das emissões de gases de efeito estufa do transporte (1990–2019)	18
Figura 3 – Comparação das matrizes de transporte de cargas (2020).....	21
Figura 4 – Mapa da malha ferroviária brasileira sob concessão (2024)	26
Figura 5 – Consumo médio anual consolidado – Vale Logística (EFC + EFVM).....	33
Figura 6 – Consumo médio consolidado por período quinquenal (EFC + EFVM).....	34
Figura 7 – Evolução da eficiência energética da Rumo.....	36
Figura 8 – Consumo médio consolidado por período quinquenal (Rumo Logística).....	37
Figura 9 – Evolução da eficiência energética da MRS Logística	38
Figura 10 – Consumo médio consolidado por período quinquenal – MRS Logística (2006–2020).....	39
Figura 11 – Evolução da eficiência energética da VLI Logística (FCA).....	42
Figura 12 – Consumo específico médio quinquenal da VLI Logística (FCA).....	42
Figura 13 – Principais estruturas aninhadas do modelo.....	56
Figura 14 – Variação percentual do investimento, emprego e oferta agregados do setor ferroviário de carga – cenário regular.....	86
Figura 15 - Variação percentual do investimento, emprego e oferta agregados do setor ferroviário de carga – cenário otimista	86
Figura 16 - Variação percentual acumulada do investimento, do emprego e da oferta agregada no setor ferroviário de carga – cenário regular	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução das emissões globais de gases de efeito estufa por setor (1995–2020) ..	15
Tabela 2 – Matriz de transporte comparando países e regiões de grande extensão territorial .	21
Tabela 3 – Produção de Transporte Ferroviário de carga por subgrupo de mercadoria (milhares de TU, 2006 – 2024).....	27
Tabela 4 – Evolução da produção ferroviária, em TKU (2006–2024)	29
Tabela 5 – Variações reais (%) dos principais indicadores econômicos para o cenário de baseline (2016 – 2040).....	73
Tabela 6 – Resultados intrasetoriais das concessionárias ferroviárias no cenário de eficiência energética de 1,5% a.a. (2040).....	78
Tabela 7 - Efeito da política de eficiência energética sobre o TKU por grupos de mercadorias (milhões de TKU em 2040)	81
Tabela 8 - Efeito da política de eficiência energética sobre o TKU por produto (milhões de TKU em 2040)	82
Tabela 9 – Resultados intrasetoriais das concessionárias ferroviárias no cenário de eficiência energética de 3% a.a. (2040).....	84
Tabela 10 - Variação percentual da oferta, exportações e importações dos principais produtos no cenário de eficiência energética de 1,5% a.a. (2040).....	88
Tabela 11 - Variação percentual da oferta, exportações e importações dos principais produtos no cenário de eficiência energética de 3,0% a.a. (2040).....	89
Tabela 12 – Efeitos macroeconômicos agregados da política de eficiência energética ferroviária (2026–2040).....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação final dos produtos e setores econômicos do modelo	58
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO_{2e} – Dióxido de Carbono Equivalente

CGE – Computable General Equilibrium (Equilíbrio Geral Computável)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – International Energy Agency

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MIP – Matriz Insumo-Produto

MCS – Matriz de Contabilidade Social

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PAS – Pesquisa Anual de Serviços

PIB – Produto Interno Bruto

PNL – Plano Nacional de Logística

RFFSA – Rede Ferroviária Federal S.A.

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

TKU – Tonelada-Quilômetro Útil

tCO_{2e} – Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	EMISSÕES, SERVIÇOS FERROVIÁRIOS DE CARGA E ECONOMIA	13
2.1	Um panorama sobre as emissões de carbono (CO ₂).....	13
2.2	O setor ferroviário de carga no Brasil	25
2.3	Alguns Estudos aplicados anteriores	44
3	METODOLOGIA	54
3.1	Principais aspectos da estrutura teórica do modelo	56
3.2	Notas sobre a calibragem dos dados	59
3.2.1	Usos e custos de diesel pelos concessionários ferroviários	66
4	ANÁLISE DE POLÍTICA E PROJEÇÕES	72
4.1	Resultados	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
6	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas tornaram-se, desde o início do século XXI, um dos principais condicionantes da reorganização dos sistemas produtivos, energéticos e logísticos em escala global (UNFCCC, 2022). Em 2022, a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) superou 420 partes por milhão (ppm), isto é, cerca de 420 moléculas de CO₂ a cada um milhão de moléculas de ar, o nível mais elevado dos últimos 800 mil anos, enquanto a temperatura média global atingiu aproximadamente 1,1°C acima dos níveis pré-industriais, aproximando-se do limite de 1,5°C estabelecido no Acordo de Paris (WMO, 2021; IPCC, 2023). Nesse contexto, setores intensivos em combustíveis fósseis, especialmente energia, transportes e indústria, permanecem no centro dos debates internacionais sobre mitigação, uma vez que respondem conjuntamente por mais de 70% das emissões globais de gases de efeito estufa (IEA, 2023). O setor de transportes, em particular, foi responsável por cerca de 15% das emissões globais de CO₂ em 2022 e consumiu aproximadamente 30% da energia final mundial (IPCC, 2022; IEA, 2023).

No Brasil, embora a matriz energética primária apresente elevada participação de fontes renováveis, cerca de 45% da oferta interna de energia em 2022, proporção muito superior à média da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), essa vantagem relativa não se reflete plenamente no setor de transportes (EPE, 2023). Nesse segmento, aproximadamente 75% da energia consumida teve origem em derivados de petróleo, sobretudo óleo diesel e gasolina (EPE, 2024). A estrutura da matriz de transporte reforça esse padrão, isto é, apesar de contar com uma extensa rede ferroviária para o escoamento de commodities, o país manteve forte dependência do modal rodoviário. Ademais, a participação das ferrovias permaneceu em torno de 15% da produção total em toneladas-quilômetro útil (TKU) entre 2000 e 2022 (ANTT, 2023; CNT, 2021). Por outro lado, ainda que o transporte ferroviário seja movido quase integralmente a diesel, o seu consumo específico de combustível por unidade transportada é inferior ao do modal rodoviário, sobretudo em fluxos consolidados e longas distâncias, em razão de propriedades físicas de tração e ganhos de escala (SIMS et al., 2014; EPE, 2023).

A estrutura do transporte ferroviário de cargas no Brasil decorre da reconfiguração institucional realizada entre 1996 e 1998, quando a malha então administrada pela Rede Ferroviária Federal

S.A. (RFFSA) foi transferida à iniciativa privada por meio de contratos de concessão com vigência de 30 anos, legitimados pela Lei nº 8.987/1995 e regulados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (RESENDE; SOUSA; CERQUEIRA, 2009; POMPERMAYER; CAMPOS NETO; SOUSA, 2012). Entre 1997 e 2019, o volume transportado passou de aproximadamente 150 para mais de 400 bilhões de toneladas-quilômetro útil (TKU), especialmente em função do escoamento de minério de ferro e grãos destinados à exportação (ANTT, 2020; CNT, 2021).

Desde meados da década de 2010, o setor ferroviário de carga brasileiro intensificou a adoção de métricas operacionais e ambientais em seus relatórios corporativos, com divulgação sistemática de indicadores de produção (TU/TKU), consumo energético e emissões diretas de CO₂ (MRS LOGÍSTICA, 2022; RUMO S.A., 2023; VLI LOGÍSTICA, 2022; VALE S.A., 2022). Embora os resultados específicos variem entre concessionárias, verifica-se um padrão de melhora gradual na eficiência energética do modal, impulsionado por investimentos em modernização tecnológica, renovação de locomotivas, automação de tração e gestão analítica de combustível. Exemplos recentes incluem a redução do consumo específico de diesel na MRS Logística — de 2,509 L/kTKB em 2019 para 2,474 L/kTKB em 2024 — e a queda de 4% no consumo de diesel e de 3,3% nas emissões específicas de GEE reportadas pela Rumo S.A. em seu último ciclo (MRS LOGÍSTICA, 2024; RUMO S.A., 2023). A respectiva trajetória empresarial converge com a formulação de políticas públicas nacionais de descarbonização, dentre as quais se destacam o RenovaBio (Lei nº 13.576/2017), o Plano Nacional de Logística 2035 (PNL 2035) e o debate sobre o Modelo Brasileiro de Comércio de Emissões (MBCE), que posicionam a eficiência energética como elemento central nas estratégias de mitigação de emissões do setor de transportes (CNPE, 2019; PNL, 2021; SENADO FEDERAL, 2023).

Dessa maneira, a partir do problema de pesquisa apresentado, esta dissertação avaliará os efeitos econômicos e a descarbonização associados aos ganhos anuais de eficiência energética no transporte ferroviário de cargas no Brasil até 2040. Projeta-se um cenário prospectivo em referência para uma série histórica de ganhos de eficiência energética observados no período 2015 – 2020. O foco analítico recai sobre a eficiência energética entendida como a redução do consumo específico de diesel e lubrificantes por unidade produzida, decorrente de melhorias operacionais, gerenciais e tecnológicas graduais, compatíveis com a trajetória histórica observada no setor ferroviário brasileiro. Cabe sublinhar que esta pesquisa não examina substituições abruptas de matriz energética nem mudanças no teor dos combustíveis. Na

verdade, a dissertação avaliará os efeitos econômicos associados a ganhos progressivos de eficiência no uso de insumos energéticos fósseis.

Para acomodar este problema de pesquisa, este estudo recorre a um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC), em estrutura dinâmica recursiva, calibrado com a Matriz Insumo-Produto (MIP) para o ano de 2015 do IBGE (2022) e complementado com dados físico-financeiros das principais concessionárias ferroviárias para o período 2015–2020. A contribuição metodológica específica da dissertação reside na forma como os ganhos de eficiência energética ferroviária são operacionalizados economicamente. Em particular, o trabalho constrói choques de eficiência a partir da redução do consumo físico de diesel e lubrificantes, expressos em metros cúbicos por unidade produzida, e de suas derivações sobre os custos energéticos, permitindo traduzir melhorias operacionais observáveis em impactos econômicos consistentes no modelo. A estratégia apresentada diferencia a dissertação da literatura aplicada, na qual a eficiência energética é frequentemente representada de maneira agregada ou como mudança técnica exógena, sem explicitação direta dos mecanismos operacionais e dos volumes físicos de consumo energético (BURNIAUX; TRUONG, 2002; BECKMAN, 2010; COLMENARES, 2019; SAUNDERS, 2021).

Com base na estrutura exibida, são simuladas duas trajetórias de ganhos de eficiência energética no transporte ferroviário, representadas por cenários com diferentes intensidades de redução do consumo específico de diesel ao longo do horizonte 2026–2040. Esses cenários refletem, respectivamente, uma trajetória regular, alinhada ao comportamento histórico recente do setor, e uma trajetória mais intensa, que pressupõe aprofundamento dos mesmos mecanismos operacionais e gerenciais. Em todos os casos, os choques de eficiência são implementados de forma progressiva e cumulativa, permitindo avaliar seus efeitos dinâmicos no longo prazo.

A análise dos resultados é conduzida em três níveis complementares. No plano macroeconômico, avaliam-se os efeitos agregados sobre produto, preços, investimento, consumo, mercado de trabalho e setor externo. No plano intersetorial, examina-se a propagação dos ganhos de eficiência ferroviária para os demais setores da economia, por meio de encadeamentos produtivos, realocações de fatores e efeitos de substituição entre modais de transporte. Por fim, no plano intrassetorial, investigam-se as heterogeneidades entre as concessionárias ferroviárias, considerando os impactos diferenciados sobre produção, consumo energético, emissões e contribuição para o nível de atividade econômica.

Ao incorporar explicitamente a eficiência energética como variável central de análise, o trabalho amplia a aplicação de modelos de EGC à avaliação de políticas climáticas no setor de transportes no Brasil (BETARELLI; DOMINGUES; HEWINGS, 2020), aproximando essa ferramenta dos debates contemporâneos sobre mitigação de emissões, competitividade logística e uso eficiente de energia em sistemas de transporte intensivos em diesel (GURGEL; PALTSEV; BREVIGLIERI, 2019).

Do ponto de vista das implicações de política pública, a abordagem adotada permite avaliar o papel de ganhos incrementais de eficiência energética, frequentemente tratados como secundários frente a estratégias de substituição tecnológica, como instrumento relevante de mitigação de emissões no setor de transportes. Ao quantificar os efeitos econômicos e ambientais associados à redução progressiva do consumo específico de diesel no transporte ferroviário ao longo de um horizonte de longo prazo, até 2040, os resultados oferecem subsídios para o desenho de políticas voltadas à eficiência operacional, à modernização gradual da frota ferroviária e à incorporação de incentivos econômicos compatíveis com os compromissos climáticos nacionais e com o planejamento logístico de longo prazo.

Além desta introdução, a dissertação está organizada em mais quatro capítulos. O Capítulo 2 revisa a literatura teórica e empírica sobre transporte, eficiência energética, descarbonização e modelagem econômica. O Capítulo 3 apresenta a metodologia, detalhando a base de dados, as etapas de desagregação da MIP 2015, a construção da matriz de custos energéticos das concessionárias e a calibração do modelo EGC.

2 EMISSÕES, SERVIÇOS FERROVIÁRIOS DE CARGA E ECONOMIA

Esta seção sistematiza os fundamentos teóricos e empíricos que orientam o desenvolvimento da pesquisa. Em primeiro lugar, apresenta-se um panorama das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em escala global e nacional, com destaque para o papel estrutural do setor de transportes na dinâmica das emissões. Em seguida, discute-se a evolução e configuração do transporte ferroviário de carga no Brasil, abordando sua trajetória histórica, estrutura institucional, eficiência energética e os principais desafios e oportunidades associados à descarbonização do modal. Por fim, procede-se ao levantamento da literatura empírica relacionada a temas como transporte de carga, eficiência energética e uso de modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) na avaliação de políticas setoriais e ambientais. Essa organização permite integrar variáveis ambientais, produtivas e econômicas sob um arcabouço analítico coerente com os objetivos desta pesquisa.

2.1 Um panorama sobre as emissões de carbono (CO₂)

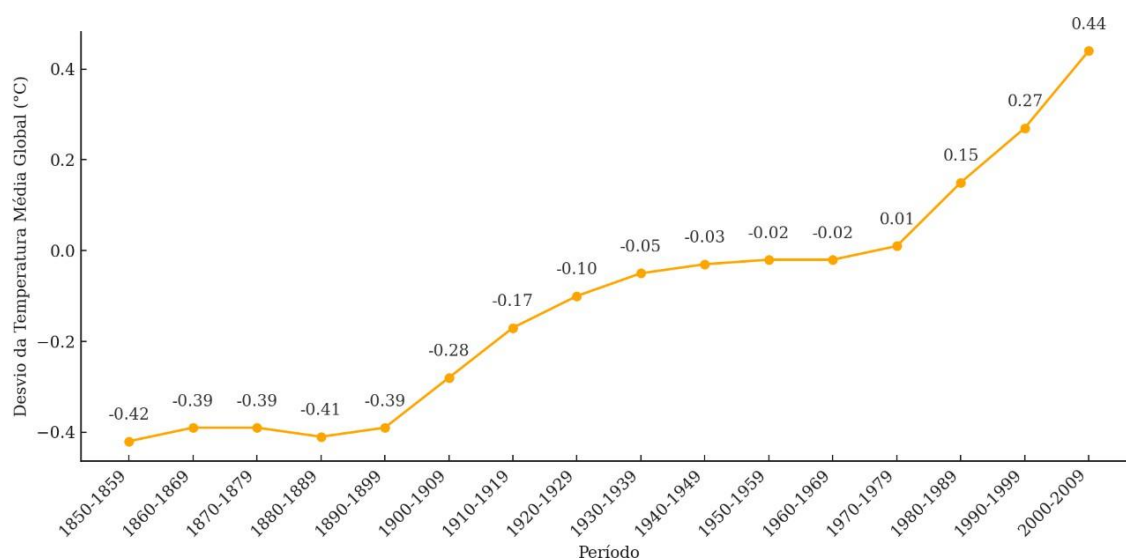
A intensificação das mudanças climáticas configura, nas primeiras décadas do século XXI, um dos maiores desafios globais, com implicações sistêmicas que extrapolam o campo científico e ambiental para se tornarem centrais nas agendas econômica, geopolítica e de segurança internacional (UNFCCC, 2022; WMO, 2021). Desde sua criação em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) consolidou, por meio de relatórios periódicos revisados por pares, evidências de que as atividades humanas, sobretudo a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, são a principal causa do aquecimento global observado desde meados do século XX, com impactos mensuráveis na temperatura média, no nível do mar e na frequência de eventos extremos, além de análises que integram dimensões sociais, econômicas e políticas da mitigação (IPCC, 2021; UNEP, 2022). A centralidade política desse tema expressa-se na convergência de instrumentos internacionais de governança climática, como o Acordo de Paris, e na formulação de metas nacionais de longo prazo, o que reforça a urgência de estratégias de transição energética e descarbonização em setores intensivos em emissões (IEA, 2023).

O *Sixth Assessment Report (AR6)* do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023)

identificou que a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) atingiu cerca de 420 partes por milhão (ppm) em 2022, o maior valor dos últimos 800 mil anos. Paralelamente, a temperatura média global já se encontra cerca de 1,1 °C acima do período pré-industrial, valor em princípio modesto, mas suficiente para provocar alterações profundas nos padrões climáticos, com intensificação de eventos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, chuvas torrenciais e incêndios florestais (UNEP, 2022; WORLD BANK, 2023).

Além disso, projeções recentes apontam que, mantida a trajetória atual de emissões, o limite de 1,5 °C poderá ser superado nas próximas duas a três décadas. Para evitar esse cenário, torna-se indispensável a adoção de transformações estruturais rápidas nos sistemas globais de energia, com forte reorientação para tecnologias de baixo carbono, maior eficiência energética e políticas climáticas robustas (IEA, 2023; UNFCCC, 2022). A Figura 1 ilustra a evolução da temperatura média global desde meados do século XIX até o início do século XXI, expressa como anomalia em relação à média do período de referência 1961–1990.

Figura 1 – Anomalia da temperatura média global por década (1850–2009), em relação à média do período de referência 1961–1990



Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC (2007).

Nota-se que, entre 1850 e aproximadamente 1950, predominam valores negativos, o que indica temperaturas inferiores à média do período de referência. A partir da segunda metade do século XX, verifica-se uma tendência consistente de aquecimento, intensificada nas últimas três

décadas analisadas, quando as anomalias se tornam positivas e crescentes, alcançando +0,44 °C no período 2000–2009. Esse padrão reflete o processo de aquecimento global documentado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021).

A magnitude do desafio pode ser observada na evolução das emissões globais por setor (Tabela 1). Observa-se que o setor de energia predomina com as emissões poluentes desde 1990, com trajetória ascendente e patamar atual superior a 35 GtCO₂e. Já os setores como agropecuária, processos industriais, resíduos e uso da terra e florestas apresentam participação menor em termos relativos, embora igualmente relevantes na composição global (IEA, 2024).

Tabela 1 – Evolução das emissões globais de gases de efeito estufa por setor (1995–2020)

Setor	1.995	2.000	2.005	2.010	2.015	2.020
Agricultura	5.189	5.251	5.459	5.662	5.830	6.029
Energia	24.913	26.925	31.201	34.825	36.682	35.882
Mudança no uso da terra e florestas	2.040	1.796	1.796	1.651	936	1.398
Processos industriais	1.251	1.357	1.750	2.232	2.619	3.093
Resíduos	1.583	1.584	1.558	1.630	1.738	1.869
Total	34.975	36.914	41.765	46.000	47.804	48.272

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Climate Watch* (World Resources Institute – WRI) (1995-2020).

O aquecimento global, portanto, não se configura como uma externalidade ambiental isolada, mas como um fenômeno sistêmico, interseccional e multidimensional, cujas ramificações atravessam todas as esferas da vida humana (SCHELLNHUBER; RAHMSTORF; WINKELMANN, 2016). Nesse contexto, a forma como diferentes países estruturam suas matrizes energéticas e de transportes torna-se elemento central das estratégias de mitigação.

No Brasil, a dinâmica setorial das emissões apresenta trajetória distinta do padrão observado em economias industrializadas. Historicamente, o setor de mudança de uso da terra e florestas (LULUCF) constituiu a principal fonte de emissões nacionais, associado sobretudo ao desmatamento na Amazônia e no Cerrado. Entre 2005 e 2020, estimativas do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) indicam redução expressiva das emissões ligadas à mudança de uso da terra, ao passo que o setor de energia passou a apresentar crescimento contínuo, impulsionado principalmente pela expansão da frota rodoviária e pelo aumento da geração termoelétrica fóssil (CLIMATE TRANSPARENCY, 2022; BANCO MUNDIAL, 2020; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023).

Paralelamente a essa reconfiguração setorial, o país assumiu compromissos climáticos crescentemente ambiciosos no âmbito do Acordo de Paris. A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e as sucessivas atualizações da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) consolidam a meta de reduzir as emissões de GEE em relação a 2005 e alcançar a neutralidade climática até 2050, articulando instrumentos de mitigação em setores-chave como energia, transportes, uso da terra e indústria (BRASIL, 2009; BRASIL, 2023; UNFCCC, 2023). Documentos de planejamento de longo prazo, como o Plano Nacional de Energia (PNE 2050) e estudos setoriais da EPE, reforçam que o cumprimento dessa trajetória de neutralidade depende de uma combinação entre expansão de fontes renováveis, ganhos de eficiência energética e reconfiguração da matriz de transportes (EPE, 2020; MME, 2022).

Nesse arranjo, o setor de transportes ocupa posição estratégica. De um lado, responde por parcela crescente das emissões energéticas nacionais, em virtude da elevada dependência de derivados de petróleo e da predominância histórica do modal rodoviário em fluxos de cargas e passageiros (IEA, 2021). De outro, constitui uma das principais frentes de mitigação de curto e médio prazo, dada a possibilidade de combinar tecnologias já disponíveis (melhorias de eficiência, biocombustíveis, eletrificação parcial) com mudanças estruturais na organização da logística e da mobilidade (IEA, 2020a; IEA, 2023). Assim, a agenda de descarbonização brasileira deixa de ser apenas uma questão de substituição de fontes na geração de energia e passa a envolver, de forma explícita, a reorganização do sistema de transportes.

É nesse ponto que o transporte ferroviário se destaca como aliado estrutural da trajetória de descarbonização. Em comparação ao rodoviário, a ferrovia apresenta menor intensidade energética e menores fatores de emissão por tonelada-quilômetro transportada, sobretudo em sistemas eletrificados ou conectados a matrizes elétricas de baixo carbono, como é o caso brasileiro (IEA, 2023; LITMAN, 2021). Ao permitir o deslocamento de cargas pesadas e de longo curso do modal rodoviário para o ferroviário, a expansão da participação da ferrovia na matriz nacional atua simultaneamente em duas frentes: reduz as emissões relativas do setor de transportes e aumenta a resiliência logística frente à volatilidade de preços de combustíveis fósseis.

Estudos prospectivos de planejamento indicam que cenários nos quais a participação ferroviária na matriz de cargas se aproxima de padrões observados em países de grande extensão territorial

— como Canadá, Rússia e Austrália — tendem a apresentar reduções significativas nas emissões específicas do transporte, mesmo em situações de crescimento da demanda agregada (OECD/ITF, 2021; IEA, 2023). No contexto brasileiro, o Plano Nacional de Logística e avaliações da EPE apontam que o aumento da participação da ferrovia para patamares próximos a 30% das toneladas-quilômetro poderia reduzir de forma relevante as emissões absolutas do setor, especialmente se combinado com medidas complementares de eficiência energética e combustíveis de menor intensidade carbônica (BALDWIN, 2016; CRIST, 2009; IEA, 2022).

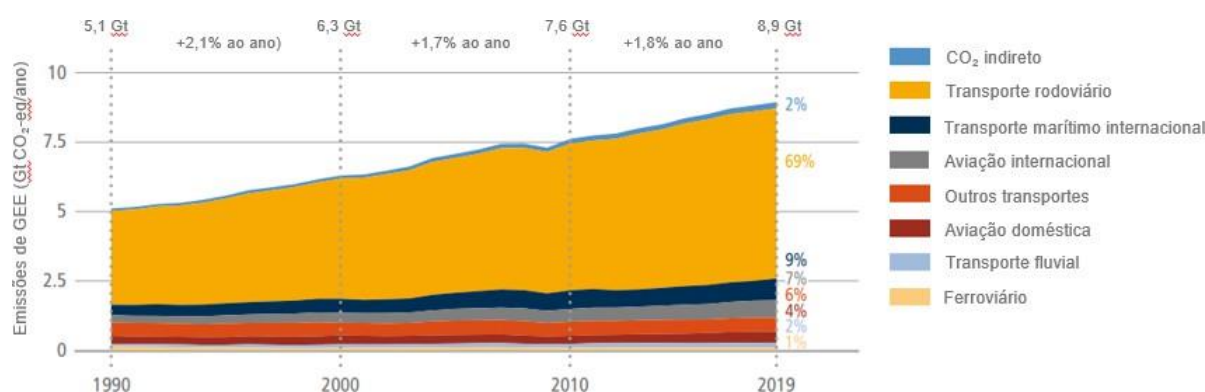
A literatura internacional sobre emissões do transporte reforça esse diagnóstico ao mostrar que, entre 1990 e 2019, as emissões globais de transporte passaram de 5,1 para 8,9 GtCO_{2e}, representando cerca de 15% das emissões totais de GEE e aproximadamente um quarto das emissões energéticas globais em 2019 (JARAMILLO et al., 2022). Esse crescimento foi mais rápido do que o observado em outros setores finais, com média anual de 1,8% desde 2010 (IEA, 2020a). A distribuição modal indica predominância do transporte rodoviário, responsável por cerca de 69% das emissões do setor em 2019, seguido pelo transporte marítimo (9%) e pela aviação internacional (7%) (IPCC, 2022). Embora residual em participação absoluta, o transporte ferroviário é reiteradamente apontado como vetor de mitigação em cenários de neutralidade, tanto pela sua eficiência energética quanto pelo potencial de se articular a matrizes elétricas renováveis (SIMS et al., 2014; LEE et al., 2022).

A Figura 2 sintetiza essa trajetória, mostrando a evolução das emissões de GEE no setor de transportes entre 1990 e 2019, com diferenciação por modal e destaque para o domínio persistente do transporte rodoviário no total agregado de emissões diretas. A análise comparativa confirma que o transporte rodoviário é o principal emissor do setor, responsável por cerca de 75% das emissões diretas globais em 2021, enquanto o transporte marítimo e a aviação internacional respondem em conjunto por aproximadamente 22% (IPCC, 2022; IEA, 2023a). Embora residual em participação absoluta, o transporte ferroviário apresenta potencial relevante de mitigação, especialmente em sistemas eletrificados e integrados a matrizes energéticas de baixa intensidade carbônica (SIMS et al., 2014; LEE et al., 2022).

Esse padrão evidencia que a mitigação das emissões no transporte não pode ser tratada de forma homogênea, exigindo estratégias diferenciadas por modal. Nesse contexto, ganham relevância medidas que combinam eletrificação progressiva de frotas, uso de combustíveis alternativos de

baixo carbono (biocombustíveis avançados, hidrogênio verde e e-fuels), ganhos de eficiência operacional e fortalecimento da integração intermodal em larga escala (IEA, 2023b; EUROPEAN COMMISSION, 2021; OECD/ITF, 2021). Tais medidas pressupõem, ainda, o uso de instrumentos econômicos como a precificação de carbono, capazes de sinalizar custos ambientais e reduzir incertezas associadas a investimentos em inovação tecnológica (IPCC, 2022; IEA, 2023b).

Figura 2 – Tendência global das emissões de gases de efeito estufa do transporte (1990–2019)



Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC (2022).

A análise da evolução do transporte de cargas em escala internacional permite compreender como essas transformações vêm sendo incorporadas aos sistemas logísticos globais. Observa-se que a expansão quantitativa do volume transportado foi acompanhada por uma reorganização qualitativa da produção, marcada pela dispersão geográfica das cadeias de suprimento e pelo aumento da dependência de redes multimodais integradas, apoiadas por tecnologias de rastreamento, digitalização e coordenação operacional (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2017; WORLD BANK, 2018; OECD/ITF, 2021). Nesse processo, a infraestrutura fixa — ferrovias, rodovias, portos e aeroportos — passa a ser compreendida como base territorial dos fluxos econômicos, enquanto os serviços de transporte garantem a circulação contínua de insumos e mercadorias em sistemas cada vez mais complexos (BUTTON, 2010; MALLIDIS; DEKKER; VLACHOS, 2012). Com isso, a eficiência logística passa a depender não apenas da disponibilidade de infraestrutura, mas também da capacidade de articulação intermodal, que permite combinar vantagens técnicas de cada modal em termos de tempo, custo e impacto energético (KORDNEJAD, 2014; EUROPEAN COMMISSION, 2021).

A literatura sobre economia dos transportes aponta que investimentos em infraestrutura afetam produtividade, acessibilidade e realocação espacial das atividades econômicas, operando tanto no curto prazo, por meio da demanda associada à formação bruta de capital fixo, quanto no longo prazo, com redução de custos logísticos e aumento da conectividade territorial (BANISTER; BERECHMAN, 2001; VENABLES, 2007; GRAHAM, 2007). Por outro lado, tais efeitos não são homogêneos no espaço: regiões com maior integração prévia tendem a absorver mais benefícios, podendo ampliar desigualdades quando não há governança territorial articulada (HOLL, 2007; CRESCENZI; RODRÍGUEZ-POSE, 2012).

Nesse contexto, o modal ferroviário ganha destaque nas análises comparativas entre os modais de transporte de carga. Estudos mostram que, em médias e longas distâncias, a ferrovia apresenta menor consumo energético e menores fatores de emissão em relação ao transporte rodoviário equivalente (IEA, 2023; LITMAN, 2021). Operações ferroviárias de carga apresentam consumo entre 0,6 e 0,9 MJ/t.km, enquanto caminhões pesados variam entre 2,5 e 3,5 MJ/t.km (IEA, 2023; EEA, 2021). Em termos de emissões diretas, sistemas ferroviários eletrificados alimentados por matrizes limpas tendem a registrar valores inferiores a 25 g CO₂/t.km, frente a médias acima de 60 g CO₂/t.km no transporte rodoviário (OECD/ITF, 2021; SCHRAMM; FLEISCHMANN, 2019).

Essa diferença é confirmada por análises de ciclo de vida (LCA), que incluem emissões de construção, manutenção e operação da infraestrutura. Mesmo quando consideradas as emissões da fase de implantação (trilhos, túneis, pátios), o saldo tende a ser favorável à ferrovia ao longo de sua vida útil em sistemas de alto volume (CHESTER; HORVATH, 2010; YUE et al., 2015; VACCARO et al., 2024). Elementos como tração elétrica, alta capacidade de carga, menor resistência ao rolamento e maior durabilidade dos ativos contribuem para os resultados técnicos observados (HEINOLD; LENZ; ROTHENGATTER, 2020; IEA, 2023). Do ponto de vista metodológico, os estudos sobre pegada ambiental do transporte distinguem análises *cradle-to-grave*, que contabilizam todas as etapas do ciclo de vida (extração de matérias-primas, fabricação, construção, operação e descarte), das análises *gate-to-gate*, centradas em etapas específicas, como a operação, com risco de subestimação quando isoladas do contexto sistêmico (CHESTER; HORVATH, 2010; YUE et al., 2015). Variáveis como ocupação média (fator de carga) e intensidade de carbono da eletricidade (gCO_{2e}/kWh) têm influência direta nos resultados, uma vez que trens mais carregados e alimentados por redes de baixa intensidade

carbônica apresentam menores impactos por unidade transportada (DALLA CHIARA; PELLICELLI, 2017; HEINOLD et al., 2018; YUE et al., 2015). Tais fatores explicam a variação entre cenários avaliados na literatura técnica, especialmente aqueles que combinam eletrificação, alta utilização da infraestrutura e fontes renováveis (CHESTER; HORVATH, 2010; DALLA CHIARA; PELLICELLI, 2017; DA FONSECA-SOARES et al., 2024; VACCARO et al., 2024).

A heterogeneidade estrutural dos modais de transporte pode ser observada nas matrizes nacionais. O transporte marítimo, embora o mais eficiente energeticamente em longas distâncias ($\approx 0,1$ MJ/t.km), responde por emissões absolutas elevadas devido ao uso de bunker fuel (KOU et al., 2025). O modal rodoviário, dominante em fluxos domésticos, apresenta baixo rendimento energético (2,5–3,5 MJ/t.km) e alta sensibilidade ao preço dos combustíveis (ZOU; CHAU, 2019). Já o transporte aéreo, ainda que marginal em volume, é o mais intensivo em energia e emissões, superando 10 MJ/t.km (LEE et al., 2021). Nesse quadro, ferrovias e hidrovias se destacam pela combinação entre capacidade de carga, eficiência energética e menores fatores de emissão por tonelada-quilômetro (IEA, 2023; OECD/ITF, 2021). As diferenças destacadas são sintetizadas na Tabela 2, que apresenta a distribuição modal em países e regiões de grande extensão territorial. Países como Rússia, Canadá e Austrália apresentam predominância ferroviária, enquanto Brasil, Argentina e Índia mantêm alta dependência do modal rodoviário. China e Estados Unidos apresentam estruturas mais equilibradas, com presença significativa de ferrovias e navegação interior.

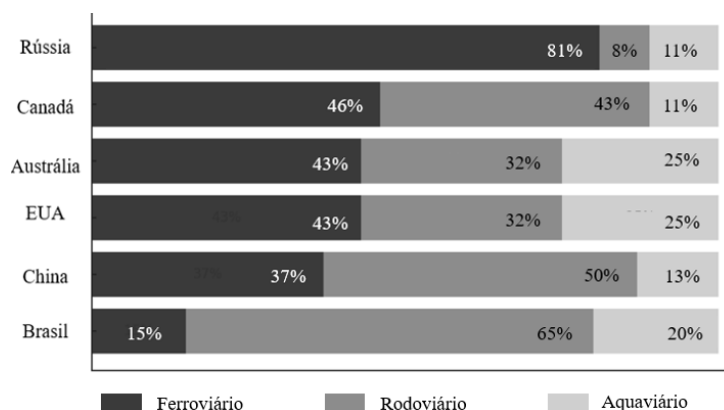
De forma complementar, a Figura 3 ilustra a participação relativa dos modais de transporte de carga em 2020, reforçando o padrão observado na Tabela 2. Observa-se a manutenção de um perfil em grande parte rodoviário no Brasil, com participação próxima a 65% das toneladas-quilômetro transportadas, contrastando com países como Estados Unidos, Rússia e Canadá, nos quais o modal ferroviário desempenha papel estrutural no escoamento de cargas de longa distância (IEA, 2023; OECD/ITF, 2021; BANCO MUNDIAL, 2023).

Tabela 2 – Matriz de transporte comparando países e regiões de grande extensão territorial¹

País	Rodoviário (%)	Ferrovário (%)	Aquaviário (%)	Dutoviário (%)
Brasil	57	24	17	3
Argentina	88	4	8	0
Índia	79	21	0	0
México	75	25	0	0
União Europeia	65	14	18	3
Japão	51	5	44	0
Estados Unidos	42	35	10	12
China	35	14	48	3
Austrália	28	58	14	0
Canadá	27	45	6	22
Rússia	6	61	2	31

Fonte: Elaboração própria a partir de OECD (2023).

Figura 3 – Comparação das matrizes de transporte de cargas (2020)



Fonte: Elaboração própria a partir de ANTT (2020).

Do ponto de vista evolutivo, contudo, a participação do modal ferroviário de carga no Brasil não apresentou expansão significativa nas últimas décadas, permanecendo relativamente estável ou mesmo declinante em determinados períodos, em contraste com a expansão observada em países que priorizaram investimentos contínuos em corredores logísticos e

¹ Os dados da tabela referem-se a diferentes anos conforme as fontes: Brasil (2019), Argentina (2020), Índia (2017), México (2018), União Europeia (2021), Japão (2018), Estados Unidos (2018), China (2018), Austrália (2017–2018), Canadá (2013–2018), Rússia (2018). Fontes: OECD (2018), Eurostat (2021), Resende e Cesar (2019e), ITF (2020).

infraestrutura intermodal. Entre 2000 e 2020, o crescimento da matriz rodoviária ocorreu de forma mais acelerada, associado à política histórica de priorização de rodovias, à capilaridade territorial do transporte rodoviário e ao menor custo político de sua expansão no curto prazo, o que limitou a capacidade de ganho estrutural de participação da ferrovia na matriz de transportes (OECD/ITF, 2021; IEA, 2023).

Esses padrões refletem a interação entre fatores geográficos, institucionais e regulatórios. Evidências empíricas indicam que países que investiram sistematicamente em corredores ferroviários integrados a terminais intermodais modernos registraram redução das intensidades energéticas e das emissões específicas no transporte de cargas, demonstrando que a configuração modal resulta sobretudo de decisões de política pública, e não de determinismos logísticos ou geográficos (EEA, 2021; IEA, 2023). Apesar das vantagens potenciais, o modal ferroviário enfrenta entraves estruturais relevantes.

O primeiro obstáculo refere-se ao elevado custo de capital associado à implantação e expansão da infraestrutura ferroviária, condicionado pela topografia, complexidade técnica e densidade populacional, o que amplia barreiras de entrada em países em desenvolvimento caracterizados por restrições fiscais e dependência de financiamentos de longo prazo via parcerias público-privadas ou organismos multilaterais (VICKERMAN, 2018). Outro desafio refere-se à predominância de locomotivas a diesel, que ainda respondem pela maior parcela da energia consumida no setor ferroviário em regiões como América Latina, América do Norte e África, em contraste com o avanço da eletrificação observado na Europa e em partes da Ásia (IEA, 2022). Tal dependência compromete o potencial de descarbonização do setor e expõe operadores à volatilidade dos preços internacionais do petróleo, com impactos diretos sobre custos operacionais e eficiência ambiental (OLIVEIRA; BRITO, 2024).

À luz desses obstáculos, e considerando os compromissos assumidos pelo Brasil de reduzir emissões e alcançar a neutralidade climática até 2050, a descarbonização do transporte ferroviário de carga deixa de ser apenas um co-benefício da expansão da malha e passa a configurar um eixo estruturante da política climática setorial. A literatura especializada converge na identificação de três vetores principais — não excludentes entre si — para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor ferroviário de carga: (i) ganhos de eficiência energética operacional, (ii) alteração da matriz de combustíveis e (iii) adoção de

tecnologias de tração de baixa emissão. Em conjunto, esses vetores traduzem, em termos tecnológicos e operacionais, o papel atribuído à ferrovia na trajetória brasileira rumo ao net zero (GONZÁLEZ-GIL; PALACÍN; BATTEN, 2013; UIC, 2019; ITF, 2021; IEA, 2023).

O primeiro vetor refere-se aos ganhos de eficiência energética operacional, entendidos como a redução do consumo de energia por unidade de transporte (energia/TKU), sendo este um dos indicadores mais relevantes do desempenho ambiental e econômico do setor ferroviário. A eficiência energética, tradicionalmente tratada como variável técnica, passou a ser compreendida também como variável sistêmica e comportamental, resultante da interação entre características dos equipamentos, organização da operação e práticas dos operadores (CAVALCANTI, 2005 apud EPE, 2007; LIIMATAINEN; PÖLLÄNEN, 2010). Estudos da Confederação Nacional de Transportes (CNT) indicam que pode haver uma redução média de 5% com a correta utilização dos veículos e com técnicas de condução econômicas (EPE, 2011). Portanto a eficiência energética pode ser alcançada de duas maneiras. A primeira é quando se executa a mesma atividade com um equipamento mais eficiente (característica técnica), este pode ser uma invenção ou uma nova tecnologia para uma empresa específica. A outra vertente considera o uso racional da energia, que se encaixaria no aspecto comportamental, como no caso do *eco-driving* e da condução econômica (EPE, 2011; BLAS et al., 2020).

Entre as principais estratégias associadas à eficiência energética operacional destacam-se a modernização de motores e locomotivas, a redução da resistência ao movimento do trem, a manutenção adequada dos materiais rodantes e da via permanente, o uso de sistemas inteligentes de gestão do tráfego e a disseminação de tecnologias de assistência ao condutor em tempo real (LUI; GOLOVITCHER, 2003 apud ABREU, 2013; REIS et al., 2013). Evidências empíricas apontam que tecnologias como sistemas de condução assistida e frenagem regenerativa podem reduzir significativamente o consumo energético, contribuindo para ganhos operacionais e ambientais simultaneamente (GONZÁLEZ-GIL; PALACÍN; BATTEN, 2013; UIC, 2019). Em termos relativos, o modal ferroviário caracteriza-se por menor intensidade energética quando comparado ao transporte rodoviário, configurando-se como alternativa estruturalmente mais eficiente para o transporte de grandes volumes de carga. No entanto, observa-se que, apesar dos ganhos em eficiência energética, o crescimento da produção ferroviária pode resultar em aumento das emissões absolutas, especialmente quando baseado em matriz energética em que ainda predomina a fonte fóssil, evidenciando a coexistência entre

menores intensidades de carbono e maiores volumes totais de emissão (UIC, 2022; CNT, 2023; TOLLIVER; LU; BENSON, 2013).

O segundo vetor corresponde à alteração da matriz de combustíveis, por meio da substituição progressiva de combustíveis fósseis por alternativas de menor intensidade de carbono, como biocombustíveis e combustíveis renováveis. Ainda que a eletrificação represente a alternativa mais limpa em termos estruturais, sua aplicação é condicionada por fatores econômicos e técnicos. Assim, soluções intermediárias têm sido adotadas, como o uso de biodiesel em diferentes proporções, embora esse processo demande atenção aos possíveis impactos indiretos associados à mudança de uso da terra e à produção agrícola (UIC, 2007; IEA, 2021; SPATARI et al., 2022).

O terceiro vetor envolve a adoção de tecnologias de tração de baixa emissão, como locomotivas mais eficientes, soluções híbridas e sistemas de recuperação energética, que permitem reduzir o consumo específico de combustível e elevar o aproveitamento energético do sistema como um todo. Contudo, sua implementação em larga escala é limitada por elevados custos de capital, desafios técnicos e riscos associados à obsolescência tecnológica, especialmente em sistemas ferroviários com infraestrutura consolidada e de grande extensão territorial (UIC, 2019; LIU et al., 2021).

Apesar do avanço dessas alternativas, a descarbonização do setor ferroviário enfrenta desafios estruturais relacionados à complexidade tecnológica, ao custo dos investimentos e à necessidade de coordenação institucional. Investimentos em soluções intermediárias podem gerar efeitos de lock-in tecnológico, retardando a transição para sistemas descarbonizados e exigindo planejamento estratégico de longo prazo (KLITKOU et al., 2015; CANTARELLI; MOLIN; VAN WEE, 2022). Esse conjunto de estratégias insere-se no arcabouço *Avoid-Shift-Improve*, no qual o setor ferroviário contribui tanto pelo deslocamento modal em relação ao transporte rodoviário quanto pela redução da intensidade carbônica associada à eficiência energética e à modernização tecnológica. No âmbito desse arranjo, a eficiência energética configura-se como eixo central para análises prospectivas voltadas à mitigação das emissões no transporte ferroviário, por sua capacidade de gerar reduções progressivas no consumo de energia e nas emissões associadas, mesmo sem alterações radicais na infraestrutura existente (ITF, 2021; IPCC, 2022).

2.2 O setor ferroviário de carga no Brasil

A formação do transporte ferroviário no Brasil está vinculada ao processo de integração territorial e à expansão da economia agroexportadora ao longo do século XIX. Até então, o transporte interno era limitado por infraestrutura precária, o que restringia o escoamento da produção em larga escala. Diante disso, a ferrovia surge como solução logística para conectar o interior produtivo aos portos, viabilizando a inserção do país no comércio internacional, especialmente por meio do transporte de commodities como café, açúcar, algodão e borracha (GREMAUD; VASCONCELLOS; TONETO JÚNIOR, 2017).

O marco institucional do setor foi a Lei nº 641/1852, que instituiu incentivos públicos para atrair capital privado, sobretudo britânico, viabilizando a construção das primeiras linhas, como a Estrada de Ferro Mauá e as ferrovias Santos–Jundiaí e D. Pedro II, consolidando a lógica radial porto–interior e uma estrutura tecnicamente heterogênea, marcada por múltiplas bitolas e forte dependência de tecnologia estrangeira (SAES, 1986; SILVEIRA, 2002; SANTOS, 2021).

Ao longo do século XX, essa estrutura fragmentada revelou vulnerabilidade financeira diante de crises econômicas e choques externos, o que levou o Estado a assumir papel crescente na gestão ferroviária, culminando na criação da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) em 1957. Embora tenha promovido a centralização do setor, a RFFSA enfrentou restrições fiscais, envelhecimento do material rodante e concorrência crescente com o transporte rodoviário, que passou a ser priorizado nas políticas públicas desde os anos 1950, aprofundando a perda de competitividade do modal ferroviário (GIAMBIAGI; CASTRO; HERMANN, 2016).

A inflexão desse quadro ocorre a partir da década de 1990, com a inclusão da RFFSA no Programa Nacional de Desestatização e a implementação do modelo de concessões ferroviárias, regulado pela ANTT a partir de 2001. O novo arranjo institucional promoveu o ressurgimento do setor, porém de forma seletiva, concentrando investimentos em corredores de alta densidade voltados ao transporte de commodities minerais e agrícolas e reforçando a lógica exportadora porto–hinterland (RESENDE; SOUSA; CERQUEIRA, 2009; ANTT, 2023; CNT, 2023).

Embora essa reconfiguração tenha ampliado a eficiência operacional e a produtividade logística, também acentuou desigualdades regionais e reduziu o papel da ferrovia no transporte doméstico de manufaturados. Assim, a retomada ferroviária contemporânea no Brasil insere-se em uma tendência internacional de revalorização do modal, associada à busca por eficiência energética e menor impacto ambiental, mas assume características próprias, fortemente orientadas à exportação de commodities e distantes do papel integrador originalmente atribuído às ferrovias no processo de formação territorial nacional (ARMSTRONG; PRESTON, 2011; GIAMBIAGI; ALÉM, 2011).

Figura 4 – Mapa da malha ferroviária brasileira sob concessão (2024)



Fonte: Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários – ANTF (2023).

Conforme ilustrado no mapa anterior (Figura 4), a MRS Logística opera cerca de 1.600 km de trilhos no Sudeste, conectando MG, RJ e SP aos portos de Santos, Itaguaí e Rio de Janeiro, com predominância de minério de ferro, produtos siderúrgicos e cargas industriais. A Rumo S.A., com mais de 14 mil km de extensão, integra o Centro-Oeste agrícola, em especial o Mato Grosso, aos portos de Santos e Paranaguá, além de trechos adicionais no Sul e em São Paulo. A VLI Logística, por meio da Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), administra aproximadamente 7.500 km que ligam Goiás, Minas Gerais e Bahia a portos do Espírito Santo, São Luís e Santos, com composição de carga distribuída entre grãos, combustíveis e produtos industriais. Já os

sistemas operados pela Vale (EFVM e EFC) são dedicados majoritariamente ao transporte de minério de ferro, com operação em corredores de alta capacidade técnica associados ao padrão *heavy-haul* (VALE, 2022; ANTT, 2023).

Embora dominado por grandes *players*, o setor inclui ainda concessionárias regionais e projetos em implantação, como a Ferrovia Norte-Sul, a Ferrovia de Integração Oeste–Leste (FIOL) e a Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO). Essas iniciativas visam ampliar a cobertura territorial e reduzir assimetrias históricas, mas enfrentam entraves persistentes de financiamento, licenciamento e integração logística. O cenário contemporâneo, portanto, combina ganhos expressivos de produtividade nos corredores de exportação com limitações ligadas à diversificação logística e à capilaridade territorial. Essa configuração institucional e espacial projeta-se diretamente sobre o perfil de cargas movimentadas, revelando o grau de especialização do modal. O resultado é uma matriz de transporte ferroviário de carga fortemente concentrada em *commodities*. A esse respeito, o minério de ferro consolidou-se como produto hegemônico em termos de tonelada-quilômetro útil (TKU), seguido por grãos e açúcar. Em menor escala aparecem combustíveis, insumos siderúrgicos e papel/celulose, enquanto a movimentação de contêineres, embora em crescimento, segue modesta frente a padrões internacionais.

A Tabela 3 reporta o predomínio absoluto do minério de ferro, que responde por mais de dois terços do volume transportado, mas também evidencia a ascensão dos grãos, sobretudo soja e farelo, como reflexo da interiorização do agronegócio no Centro-Oeste. Produtos como açúcar mantiveram participação estável, enquanto combustíveis, fertilizantes e papel/celulose oscilaram de forma mais moderada. Apesar do crescimento recente, a carga geral containerizada ainda representava menos de 3% do total em 2021, patamar muito inferior ao observado em países como China e Estados Unidos, onde supera 30%, o que revela a dificuldade estrutural da ferrovia brasileira em inserir-se em cadeias de maior valor agregado (ANTT, 2022; INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2023; UIC, 2022).

Tabela 3 – Produção de Transporte Ferroviário de carga por subgrupo de mercadoria (milhares de TU, 2006 – 2024)

Subgrupo de Mercadoria	2006–2010	2011–2015	2016–2020	2021–2024
Minério de Ferro	1.507.904	1.782.509	1.899.360	1.526.831

Adbos e Fertilizantes	26.896	22.123	30.479	24.046
Extração Vegetal e Celulose	22.300	28.425	42.024	48.469
Açúcar	35.572	55.184	67.648	60.468
Soja e Farelo de Soja	107.870	107.991	170.190	161.483
Carvão / Coque	52.285	56.403	51.935	37.419
Ind. Cimenteira e Const. Civil	24.378	17.090	9.944	8.252
Ind. Siderúrgica	89.638	78.129	75.321	60.090
Contêiner	14.039	15.369	19.867	23.246
Total Geral	1.880.882	2.163.223	2.367.768	1.950.304

Fonte: Elaboração própria a partir de SAFF/SIADE (2006–2024).

A trajetória recente em TKU agregado sintetiza de forma clara a evolução do setor ferroviário no Brasil. Desde o início das concessões, em 1997, o transporte ferroviário de cargas passou de cerca de 150 bilhões para mais de 400 bilhões de TKU em 2019, o que representa um crescimento acumulado de aproximadamente 160% em pouco mais de duas décadas (ANTT, 2020; ANTF, 2022). Esse dinamismo resultou da interação de três vetores principais: i) o avanço do agronegócio exportador, que ampliou substancialmente a demanda por transporte em longas distâncias; ii) a modernização do complexo minerador, que consolidou a vocação heavy-haul da malha; e iii) os investimentos das concessionárias em infraestrutura e frota, que permitiram ganhos expressivos de eficiência operacional (IPEA, 2018; ABDIB, 2023).

Por seu turno, a Tabela 4 apresenta a trajetória recente do transporte ferroviário de cargas ao comparar a produção em TKU das principais concessionárias entre 2006 e 2024. Observa-se a predominância contínua das ferrovias vinculadas à mineração, como a Estrada de Ferro Carajás (EFC) e a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), que, mesmo diante de oscilações, seguem entre as maiores responsáveis pelo transporte nacional devido à sua vinculação direta às cadeias de minério de ferro. Ao mesmo tempo, o crescimento expressivo da Rumo Malha Norte (RMN) e de outros trechos operados pela empresa evidencia a expansão do agronegócio e a consolidação do corredor Centro-Oeste como eixo estratégico para o escoamento de grãos.

Embora a participação ferroviária na matriz nacional de transporte de cargas permaneça inferior à observada em economias com forte tradição ferroviária, a evolução recente aponta para um reforço gradual do papel do modal em grandes fluxos de longa distância. Em 2020, aproximadamente 65% das cargas no Brasil foram movimentadas por rodovias, enquanto as ferrovias responderam por cerca de 15%, ante mais de 40% nos Estados Unidos e acima de 50%

na Rússia (CNT, 2021; INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2023; UIC, 2022). Esse contraste reflete um padrão histórico de predominância rodoviária, mas também evidencia o espaço de expansão futura da ferrovia, sobretudo em corredores de alta densidade já em operação.

Tabela 4 – Evolução da produção ferroviária, em TKU (2006–2024)

Concessionária	2006	2024	Varição
RMN	7,446	47,985	545%
RMP	2,232	9,765	338%
FCA	9,112	21,484	136%
EFC	76,724	163,701	113%
MRS	47,676	68,143	43%
FTC	0,183	0,242	32%
FNSTN	–	13,247	–
RMC	–	8,523	–
EFVM	73,44	51,412	–30%
RMS	18,423	12,978	–30%
FTL	0,678	0,601	–11%
RMO	1,432	0,101	–93%
EFPO	1,005	0,069	–93%
Total	238,353	398,253	67%

Fonte: Elaboração própria a partir de ANTT

A combinação entre especialização em *commodities* e expansão dos fluxos de longa distância produziu um efeito ambivalente do ponto de vista climático. Entre 1990 e 2019, as emissões associadas ao transporte ferroviário de carga no Brasil aumentaram de aproximadamente 2 para 6 milhões de toneladas de CO₂e (SEEG, 2023). O crescimento supracitado ocorreu em paralelo à forte expansão da produção em TKU — impulsionada, sobretudo, pelos corredores de minério de ferro e grãos, que respondem por mais de 80% da demanda física do setor — e apesar dos ganhos de eficiência energética obtidos com a modernização tecnológica, como tração distribuída, locomotivas de maior potência e digitalização operacional em sistemas como EFVM, MRS e Rumo Malha Norte (ANTT, 2023; EPE, 2022; CNT, 2023). Em outras palavras, o aumento do volume transportado sobre uma base energética ainda majoritariamente fóssil mais do que compensou as melhorias de desempenho por unidade de carga. Do ponto de vista relativo, a ferrovia mantém clara vantagem ambiental em relação ao rodoviário, emitindo em média de três a quatro vezes menos CO₂e por tonelada-quilômetro útil — cerca de 18 gCO₂/TKU contra mais de 80 gCO₂/TKU no transporte por caminhões (IEA, 2022; EPE, 2023).

No entanto, essa superioridade em intensidade de carbono não tem sido suficiente para gerar quedas nas emissões totais, em razão da baixa participação do modal na matriz de transporte de cargas (cerca de 15% em 2020, frente a mais de 40% nos Estados Unidos e 50% na Rússia) e da própria expansão dos fluxos pesados de commodities (CNT, 2021; UIC, 2022). Assim, o quadro atual combina, de um lado, ganhos cumulativos de eficiência energética e, de outro, aumento das emissões absolutas em função do crescimento da demanda.

Esse contexto ajuda a explicar a forma como as agendas empresariais de descarbonização vêm sendo organizadas no Brasil. Diante de uma matriz ainda fortemente rodoviária e de um crescimento contínuo da demanda ferroviária, as concessionárias passaram a concentrar esforços em torno da eficiência energética, buscando reduzir o consumo de diesel por TKU e, assim, conter o ritmo de crescimento das emissões ao mesmo tempo em que ampliam a capacidade logística (IEA, 2023; OECD/ITF, 2021).

Vale ressaltar que o consumo médio de diesel no setor ferroviário brasileiro situa-se em torno de 2,5 litros por mil TKU, valor inferior ao do modal rodoviário (10 a 15 litros por mil TKU), mas ainda acima dos *benchmarks* norte-americanos (\approx 1,5 litro por mil TKU), favorecidos por maior eletrificação, topografia mais linear e diversificação energética (UIC, 2022; AAR, 2023). No Brasil, a combinação de rampas acentuadas, gargalos urbanos e baixa eletrificação da malha — esta última alcançando apenas \sim 2%, em contraste com mais de 60% na Europa — eleva o esforço energético por eixo e sustenta a dependência do diesel (BNDES, 2017; EPL, 2021; OECD/ITF, 2021). Esse contexto ajuda a explicar a coexistência de emissões absolutas crescentes com intensidades de carbono relativamente baixas: a ferrovia reduz emissões relativas ao deslocar cargas do rodoviário, mas pode ampliar emissões totais quando expande fluxos em uma base energética predominantemente fóssil (UIC, 2022; CNT, 2023).

Nesse cenário, o desafio da descarbonização ferroviária depende de uma combinação de estratégias, como por exemplo: renovação da frota, ampliação da eletrificação, combustíveis alternativos, digitalização operacional e mudanças regulatórias que incorporem metas explícitas de eficiência (IEA, 2023; OECD/ITF, 2021). Concessionárias como MRS e Rumo vêm testando misturas elevadas de biodiesel (B20–B50) e diesel verde (HVO), com reduções de até 15% nas emissões sem substituição da frota (MRS, 2022; RUMO, 2022), mas enfrentam limitações técnicas como estabilidade térmica e desafios logísticos em longas distâncias (LEBEDEVAS et al., 2017). A Lei nº 14.993/2024 (Lei do Combustível do Futuro), ao estabelecer diretrizes

para combustíveis renováveis e hidrogênio de baixo carbono, pode ampliar o acesso a mecanismos de financiamento e créditos de descarbonização, ainda que de forma indireta (BRASIL, 2024; MME, 2024).

Em síntese, a eletrificação da malha ferroviária brasileira permanece um gargalo estrutural para a descarbonização do setor. Estudos do IPEA (2020) indicam que a eletrificação de corredores de alta densidade, como Carajás e Vitória–Minas, poderia reduzir em até 30% o consumo energético específico. Contudo, os elevados custos de implantação, estimados entre R\$ 10 e 12 milhões por quilômetro, limitam sua viabilidade econômica a operações do tipo heavy haul, restringindo sua difusão para o conjunto da malha nacional. Alternativas tecnológicas como locomotivas híbridas, sistema dual fuel e aplicações iniciais de hidrogênio em composições regionais surgem como possibilidades de transição no médio prazo (OECD/ITF, 2021; Silva, Macambira e Rocha, 2019), mas ainda enfrentam incertezas técnicas, regulatórias e de escala.

Diante dessas restrições, os avanços mais relevantes no curto e médio prazo têm ocorrido predominantemente por meio de ganhos incrementais de eficiência energética, associados à otimização operacional, à digitalização e à gestão inteligente do consumo de combustível. Soluções de menor custo relativo, como práticas de eco-driving, sistemas automatizados de controle de tração e manutenção preditiva, amplamente difundidos em plataformas como Trip Optimizer e EnergyMiser, têm demonstrado reduções de até 8% no consumo de diesel em ferrovias da Austrália e dos Estados Unidos (Schipper e Marie, 2013). No contexto brasileiro, a adoção crescente dessas tecnologias aponta para uma convergência entre eficiência econômica e mitigação de emissões, mesmo na ausência de mudanças estruturais na matriz energética (MRS, 2022; ANTT, 2023).

Essa ênfase em eficiência operacional é consistente com as diretrizes de planejamento setorial de longo prazo. O Plano Nacional de Logística 2035 (Ministério da Infraestrutura, 2022) projeta que a ampliação da participação ferroviária para cerca de 30% da matriz de transportes poderia reduzir em até 18% as emissões absolutas do setor. Tal resultado, entretanto, depende menos da adoção imediata de combustíveis alternativos e mais de uma expansão sistêmica da ferrovia como eixo estruturante da logística nacional, integrada a portos, terminais intermodais e à cabotagem. A fragmentação institucional e regulatória dessa articulação ajuda a explicar a heterogeneidade dos avanços observados entre concessionárias e regiões.

Nesse contexto, as estratégias empresariais de eficiência energética assumem papel central na compatibilização entre expansão logística e descarbonização, sobretudo em um ambiente de restrições tecnológicas e financeiras. Importa destacar que, ao longo da última década, os principais ganhos efetivamente observados no setor ferroviário brasileiro não decorreram de mudanças disruptivas na matriz energética ou na substituição de combustíveis, mas sim de melhorias incrementais na gestão operacional, no uso mais intensivo de ativos existentes e na racionalização do consumo de diesel por unidade transportada.

Cada operadora ferroviária tem desenvolvido trajetórias próprias de modernização operacional, refletindo diferenças nos corredores atendidos, no perfil das cargas transportadas e nos estágios de maturidade organizacional. Mais do que iniciativas isoladas, essas estratégias evidenciam a crescente internalização da eficiência energética como vetor estratégico de competitividade e sustentabilidade, ainda que apoiadas predominantemente em soluções de baixo custo relativo e rápida difusão. Entre os casos mais representativos, destaca-se a atuação da Vale S.A., cujas operações ferroviárias — concentradas na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e na Estrada de Ferro Carajás (EFC) — oferecem um exemplo paradigmático de como ganhos operacionais de eficiência, mesmo em um sistema intensivo em diesel, podem gerar reduções expressivas de consumo energético e emissões ao longo do tempo.

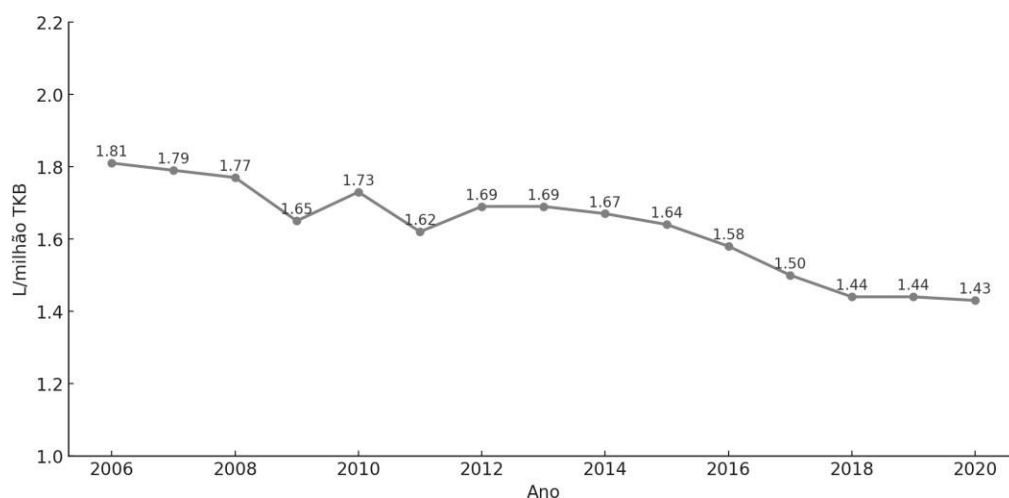
A Vale S.A. atua como a principal operadora de transporte ferroviário de carga pesada do país, operando dois dos mais relevantes corredores logísticos nacionais: a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e a Estrada de Ferro Carajás (EFC). As duas malhas concentram, em conjunto, mais de 40% do transporte ferroviário nacional medido em TKU e sustentam o fluxo de exportação de minério de ferro para o mercado global, sobretudo para a Ásia e Europa (ANTT, 2023; IBRAM, 2024).

Em razão dessa escala logística expressiva, as ferrovias da Vale se tornaram, ao longo dos últimos 15 anos, um campo privilegiado para a observação empírica de ganhos de eficiência energética operacional, com impactos diretos sobre o desempenho ambiental e competitivo da empresa. Diferentemente de estratégias baseadas em substituição imediata de combustíveis, a trajetória da Vale evidencia um processo gradual e cumulativo de redução do consumo específico, sustentado principalmente por melhorias de gestão, automação operacional e controle da tração.

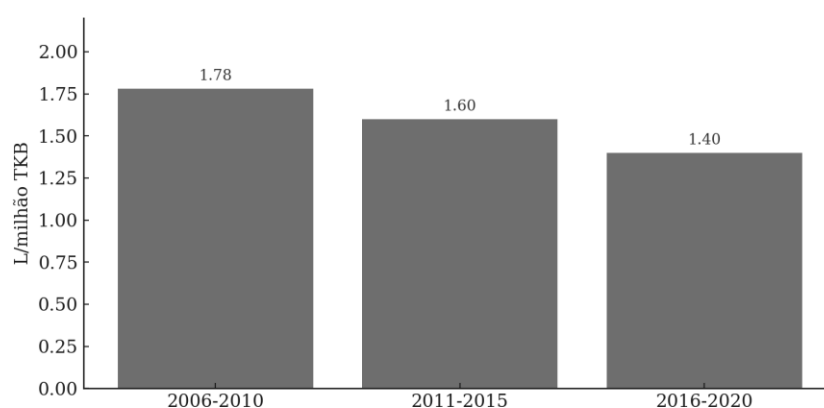
Até meados da década de 2010, a gestão energética nas malhas ferroviárias da Vale estava concentrada no incremento da produtividade operacional, com ênfase em maior carga por trem, redução de tempos ociosos e padronização de procedimentos de condução, sem integração explícita às metas climáticas corporativas. Locomotivas diesel-elétricas de alta potência constituíam a base tecnológica predominante, sobretudo na EFC, cuja topografia exigia elevada tração em trechos de rampa (VALE, 2015). Nesse período, a eficiência energética era monitorada de forma fragmentada, com base em medidas de consumo por viagem e indicadores associados majoritariamente a custos operacionais, e não a métricas sistemáticas de intensidade energética ou emissões.

É importante destacar que o avanço da eficiência energética observado nas ferrovias da Vale precede e independe, em grande medida, das iniciativas mais recentes de eletrificação e tração híbrida. A maior parcela da redução do consumo específico registrada ao longo das últimas duas décadas decorre de ganhos incrementais associados à digitalização das operações, à automação da condução, ao controle mais preciso da tração e à melhoria da gestão do uso de combustível por composição. Assim, embora a incorporação de novas tecnologias de tração represente um vetor complementar relevante, o núcleo dos ganhos de eficiência energética analisados nesta dissertação — e quantificados empiricamente — está associado a melhorias operacionais compatíveis com a base tecnológica existente, o que confere maior generalização aos resultados apresentados.

A série histórica (Figura 5) registra queda contínua no consumo específico de combustível, passando de cerca de 1,81 litro por milhão de TKB em 2006 para 1,43 litro/milhão TKB em 2020 — redução acumulada próxima de 21% no período. A Figura 6, por sua vez, consolida esses dados em médias quinquenais, evidenciando a convergência para valores inferiores a 1,5 litro/milhão TKB no quinquênio 2016–2020. Esse patamar posiciona a Vale como a única operadora ferroviária brasileira com eficiência comparável à de sistemas pesados na Austrália e no Canadá, onde indicadores similares já operam abaixo de 1,5 litro/milhão TKB (UIC, 2022; AAR, 2023).

Figura 5 – Consumo médio anual consolidado – Vale Logística (EFC + EFVM)

Fonte: Elaboração própria com base em dados do SAFF (ANTT, 2006–2020).

Figura 6 – Consumo médio consolidado por período quinquenal (EFC + EFVM)

Fonte: Elaboração própria com base em dados do SAFF (ANTT, 2006–2020).

Do ponto de vista ambiental, essa redução de consumo se traduz em mitigação direta de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo CO₂, dado o caráter fóssil do diesel ferroviário. Embora a ferrovia apresente emissões específicas significativamente inferiores ao modal rodoviário — em torno de 18 gCO₂/TKU contra mais de 80 gCO₂/TKU no rodoviário (IEA, 2022; EPE, 2023) —, sua relevância para a descarbonização depende da expansão integrada de eficiência e eletrificação. O desafio, entretanto, reside no fato de que menos de 2% da malha ferroviária nacional é eletrificada, enquanto nos principais países da OCDE esse percentual supera 60% (OECD/ITF, 2021; EPL, 2021). A eletrificação plena da EFC, segundo estimativas do IPEA (2020), poderia reduzir em até 30% o consumo energético específico da ferrovia, embora os custos de adaptação (R\$ 10–12 milhões/km) limitem sua viabilidade.

Nesse contexto, iniciativas como a introdução de locomotivas elétricas para manobras de pátio, sistemas híbridos bateria-diesel e testes com biocombustíveis avançados devem ser interpretadas como extensões marginais de uma trajetória já orientada à eficiência, e não como a origem dos ganhos observados. Essas experiências reforçam a direção estratégica da empresa, mas ainda representam parcela reduzida da frota e do consumo total de combustível.

Em síntese, a evolução da eficiência energética ferroviária da Vale revela um processo de transformação gradual, que migrou da busca por produtividade operacional para uma estratégia mais estruturada de descarbonização, ancorada principalmente em ganhos incrementais de eficiência. Trata-se de uma abordagem que articula automação embarcada, gestão dinâmica de energia e racionalização do consumo de diesel, com efeitos cumulativos relevantes sobre custos logísticos e emissões.

Embora o caso da Vale represente o estágio mais avançado dessa trajetória no setor ferroviário brasileiro, outras operadoras — como Rumo Logística, MRS Logística e VLI — têm adotado estratégias convergentes de eficiência energética, ajustadas a seus contextos operacionais e perfis de carga. Os parágrafos seguintes analisam essas experiências de forma comparativa, com foco nos indicadores de consumo específico e nos mecanismos operacionais que explicam as diferenças observadas entre concessionárias.

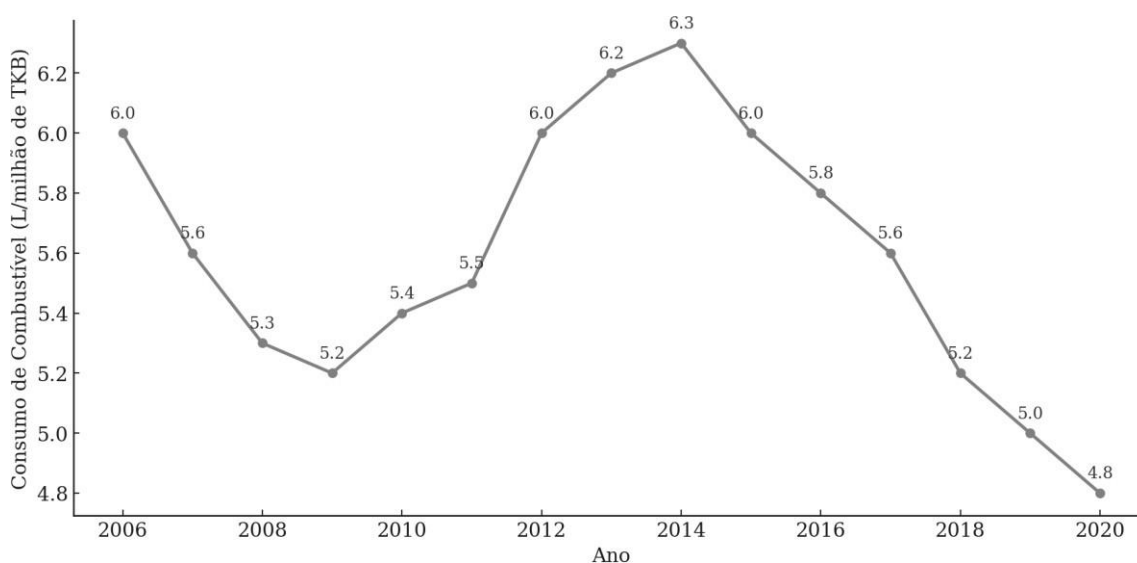
Entre 2015 e 2022, a Rumo Logística investiu mais de R\$ 2 bilhões na modernização de sua frota ferroviária, incorporando cerca de 200 locomotivas de alto rendimento, incluindo modelos das séries Evolution e AC44i. Essas locomotivas são equipadas com tração em corrente alternada (AC), sistemas de controle automático de potência, maior eficiência termodinâmica dos motores e capacidade de regeneração parcial de energia em regimes de frenagem, características associadas a ganhos expressivos de eficiência operacional (GE Transportation, 2015; Wabtec, 2021).

Esses avanços tecnológicos foram acompanhados por inovações de natureza predominantemente operacional, como a difusão de simuladores de eco-driving, sensores embarcados de telemetria e algoritmos de otimização da condução. Tais instrumentos permitiram maior padronização do comportamento dos maquinistas, melhor controle da potência aplicada ao longo do traçado e redução de desperdícios energéticos, contribuindo para a diminuição do consumo de diesel por tonelada transportada (Rumo Logística, 2022). A partir

de 2021, a companhia também iniciou testes com misturas elevadas de biodiesel (B20–B30) e avaliações do uso de hydrotreated vegetable oil (HVO) em rotas específicas, em consonância com as diretrizes do RenovaBio, embora essas iniciativas ainda representem parcela marginal do consumo total (MME, 2022).

A eficiência energética consolidada da Rumo foi estimada com base no consumo específico de combustível, medido em litros por milhão de tonelada-quilômetro bruto (L/milhão TKB), a partir dos dados anuais do Sistema de Acompanhamento da Fiscalização Ferroviária (SAFF/ANTT). Foram consideradas quatro malhas operadas pela empresa — Oeste (RMO), Paulista (RMP), Norte (RMN) e Sul (RMS) —, com exclusão da Malha Central (RMC) em razão de lacunas na série histórica após 2021. A Figura 7 sintetiza a evolução do indicador entre 2006 e 2020, evidenciando uma redução aproximada de 6,5 para 3,5 L/milhão TKB, o que corresponde a uma melhoria acumulada de cerca de 50% no período.

Figura 7 – Evolução da eficiência energética da Rumo

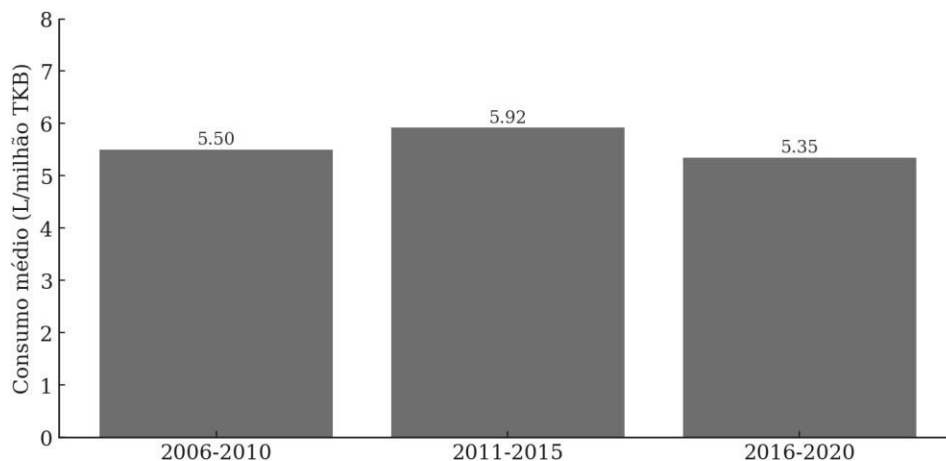


Fonte: Elaboração própria com base em SAFF/ANTT (2006–2020).

Ao agrupar os dados em médias quinquenais, observam-se três fases distintas de desempenho (Figura 8): (i) relativa estabilização entre 2006–2010, com consumo médio próximo a 5,9 L/milhão TKB; (ii) elevação moderada entre 2011–2015, associada à incorporação de novas malhas e à expansão do volume transportado; e (iii) redução acentuada entre 2016–2020, com média de 4,8 L/milhão TKB. Essa última fase reflete o impacto cumulativo da renovação da

frota, do aumento da capacidade por composição, da rebitolagem de trechos estratégicos e da padronização de práticas de condução econômica.

Figura 8 – Consumo médio consolidado por período quinquenal (Rumo Logística)



Fonte: Elaboração própria com base em SAFF/ANTT (2006–2020).

A queda contínua do consumo específico, superior a 25% entre os dois últimos quinquênios, indica o amadurecimento tecnológico e, sobretudo, operacional da Rumo, aproximando seus indicadores dos patamares observados em sistemas ferroviários de carga pesada nos Estados Unidos e no Canadá (AAR, 2023; UIC, 2022). Em 2023, a empresa reforçou esse posicionamento ao aderir à *Science Based Targets initiative* (SBTi), estabelecendo metas de redução absoluta de emissões de GEE compatíveis com o cenário de 1,5°C e vinculando indicadores de eficiência energética à remuneração variável de lideranças e equipes operacionais (Rumo Logística, 2023).

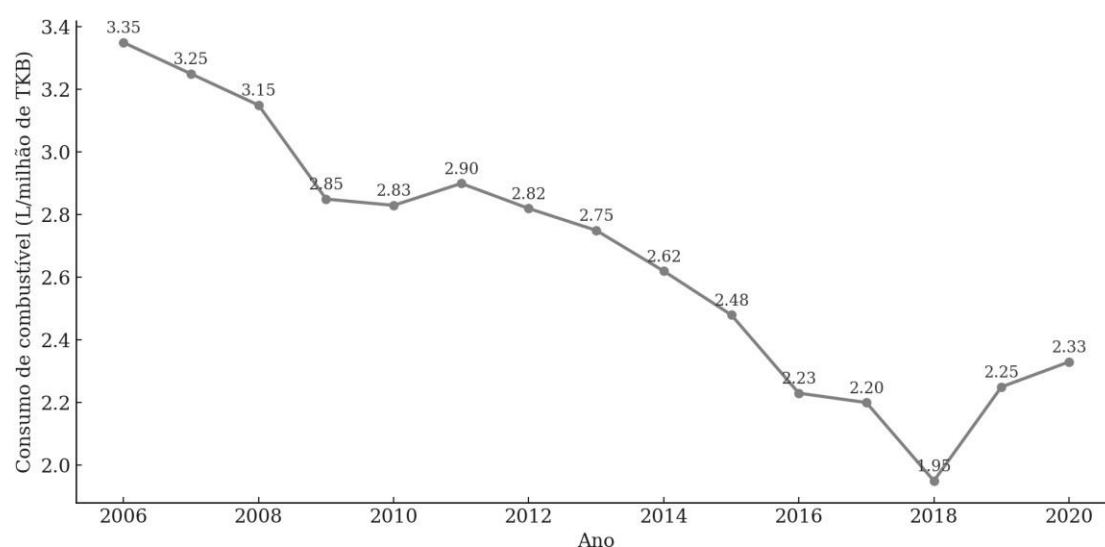
Assim, a trajetória da Rumo demonstra que, mesmo na ausência de eletrificação de longa distância ou de tração integralmente elétrica, inexistentes em sua malha, é possível alcançar ganhos expressivos de eficiência energética por meio da combinação de renovação de frota, digitalização operacional, otimização da potência aplicada e uso seletivo de combustíveis de menor intensidade carbônica. Esses resultados reforçam o papel da empresa como agente relevante na transição logística de baixo carbono e fornecem subsídios empíricos consistentes para a modelagem de cenários de eficiência energética no modelo de Equilíbrio Geral Computável utilizado nesta dissertação.

De forma análoga, a MRS Logística tem estruturado, desde meados da década de 2010, um processo contínuo de modernização operacional voltado à redução do consumo específico de diesel, em consonância com o avanço das exigências regulatórias e com a crescente incorporação da sustentabilidade como elemento estratégico no setor de infraestrutura de transportes (MRS, 2016; ANTT, 2023). Responsável por aproximadamente 20% da carga ferroviária nacional, a MRS opera um corredor logístico estratégico que conecta áreas produtoras de minério, siderurgia e manufatura aos principais portos do Sudeste, como Santos, Itaguaí e Guaíba. Trata-se de um sistema operacionalmente complexo, caracterizado por elevada densidade de tráfego, composições pesadas e restrições geométricas relevantes, o que torna a eficiência energética um vetor central de competitividade. Essa centralidade se intensificou à medida que o diesel se consolidou como o principal item de custo operacional das ferrovias brasileiras (CNT, 2022).

A partir de 2015, a MRS passou a adotar uma agenda estruturada de eficiência energética baseada em três pilares complementares: modernização da frota, digitalização da operação e gestão ativa de indicadores de consumo. Entre as principais iniciativas desse período destacam-se a instalação de sistemas de telemetria embarcada, o aperfeiçoamento dos algoritmos de tração, a capacitação sistemática de maquinistas em técnicas de condução econômica e a adoção de *softwares* de otimização operacional, como o *Trip Optimizer*. Segundo dados corporativos, a implantação desse sistema foi responsável por ganhos de economia de combustível entre 5% e 8% nos trechos em que passou a operar (MRS, 2019).

Esse processo de modernização resultou em uma redução progressiva do consumo específico de combustível, medido em litros por milhão de tonelada-quilômetro bruto (L/milhão TKB), conforme ilustrado na Figura 9, que apresenta a série histórica entre 2006 e 2020. Observa-se que o consumo médio decresce de aproximadamente 3,35 L/milhão TKB em 2006 para 2,33 L/milhão TKB em 2020, o que corresponde a uma queda acumulada próxima de 30% no período. Embora esse comportamento seja consistente com o padrão geral de melhoria observado em outras concessionárias, a trajetória da MRS apresenta uma particularidade relevante: o menor valor histórico do indicador é alcançado em 2018, coincidindo com a consolidação das rotinas de digitalização e automação da operação.

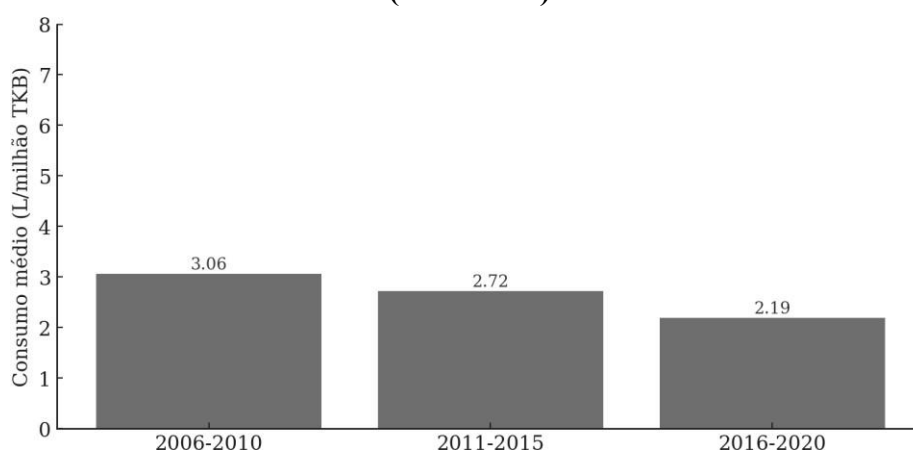
Figura 9 – Evolução da eficiência energética da MRS Logística



Fonte: Elaboração própria com base em SAFF/ANTT (2006–2020).

Com o objetivo de suavizar flutuações anuais e identificar mudanças de natureza estrutural, o indicador foi agregado em médias quinquenais. A Figura 10 evidencia um comportamento descendente contínuo ao longo do período analisado: o consumo médio reduz-se de 3,06 L/milhão TKB em 2006–2010 para 2,72 L/milhão TKB em 2011–2015, atingindo 2,19 L/milhão TKB no quinquênio 2016–2020. O padrão de redução apresentado está associado tanto ao retrofit e à renovação gradual da frota quanto à reorganização operacional, que incluiu simulações de condução, padronização das composições e melhor aproveitamento da potência instalada por trem (MRS, 2021; IPEA, 2022).

Figura 10 – Consumo médio consolidado por período quinquenal – MRS Logística (2006–2020)



Fonte: Elaboração própria com base em SAFF/ANTT (2006–2020).

A partir de 2020, a eficiência energética passou a integrar de forma explícita o planejamento estratégico de sustentabilidade da empresa, com a definição de metas formais de redução de emissões alinhadas ao GHG Protocol e aos requisitos da Resolução CVM nº 193/2023. As ações implementadas incluíram testes operacionais com biocombustíveis (B20), estudos de viabilidade técnica para eletrificação parcial de pátios, ampliação do monitoramento energético em tempo real e incorporação de critérios de desempenho ambiental nos sistemas de remuneração variável de lideranças técnicas (MRS, 2023).

Em síntese, os resultados observados no período 2006–2020 indicam que a MRS alcançou uma melhoria média aproximada de 0,07 L/milhão TKB por ano, mantendo uma trajetória estruturalmente decrescente de consumo específico mesmo diante da ampliação do volume transportado. A empresa consolidou, assim, um modelo de eficiência energética baseado predominantemente em digitalização, automação embarcada e gestão ativa do uso de combustível, sem dependência de mudanças disruptivas na matriz energética.

A combinação entre ganhos operacionais sustentados e redução de emissões posiciona a MRS Logística como uma das concessionárias mais avançadas em eficiência energética no país, evidenciando que a incorporação de inovação operacional no transporte ferroviário é compatível com competitividade econômica e alinhamento às metas climáticas de médio e longo prazo. Importa ressaltar que tais resultados foram alcançados predominantemente por meio da redução do consumo específico de diesel por unidade transportada, isto é, por ganhos de eficiência energética operacional, e não por mudanças estruturais na matriz energética ou substituição de combustíveis em larga escala.

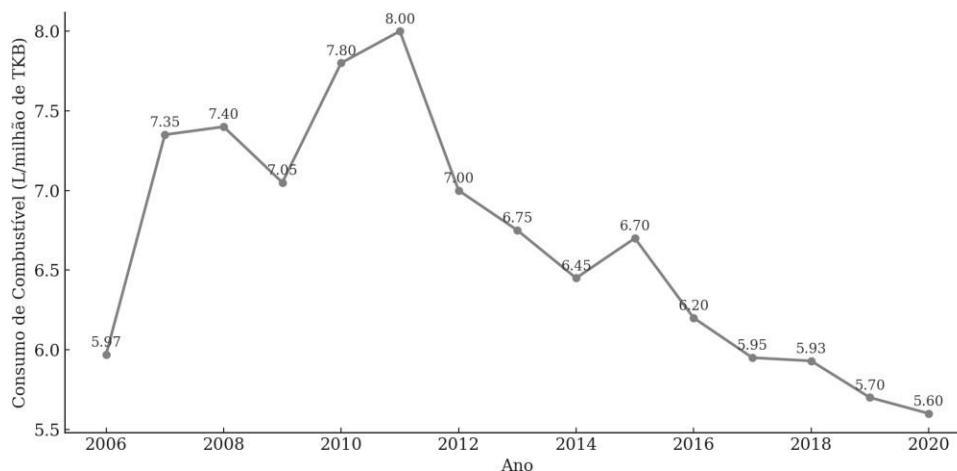
Nesse mesmo enquadramento analítico, a VLI Logística representa um caso intermediário no panorama nacional de eficiência energética ferroviária. Sua trajetória combina avanços graduais em eficiência operacional com os desafios estruturais inerentes à operação de uma malha extensa, heterogênea e de baixa densidade de carga. Diferentemente de sistemas *heavy-haul* altamente padronizados, como os da Vale ou da MRS, a VLI opera corredores longos, com topografia complexa e composição diversificada de fluxos, o que limita o potencial de ganhos rápidos de eficiência absoluta. Ainda assim, a eficiência energética passou a ocupar posição central em sua estratégia corporativa a partir de 2020, quando o inventário de emissões confirmou o diesel ferroviário como principal fonte de emissões diretas da companhia (VLI LOGÍSTICA, 2021).

Desde então, a empresa tem direcionado investimentos sobretudo para instrumentos de gestão energética operacional, com destaque para sistemas analíticos de monitoramento e controle do consumo específico, como o *Fuealytics* e o *Leader*. Essas plataformas têm como objetivo central reduzir a intensidade energética da operação ferroviária por meio do acompanhamento em tempo real do desempenho das locomotivas, da padronização de práticas de condução e da mitigação de desvios operacionais entre composições semelhantes. Paralelamente, a VLI promoveu a modernização gradual da frota e a revisão de procedimentos operacionais, sempre com foco na racionalização do uso do diesel por tonelada-quilômetro transportada.

Para avaliar empiricamente essa trajetória, adotou-se como referência a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), principal malha operada pela companhia e responsável por fluxos relevantes de minério, grãos e combustíveis entre Minas Gerais, Goiás, Bahia e Espírito Santo. A análise baseia-se no consumo específico de combustível, medido em litros por milhão de tonelada-quilômetro bruto (L/milhão TKB), a partir dos dados do Sistema de Acompanhamento e Fiscalização Ferroviária (SAFF/ANTT) para o período de 2006 a 2020.

A Figura 11 apresenta a série anual do consumo específico médio da FCA, evidenciando uma trajetória de redução gradual da intensidade energética a partir de 2011. O primeiro quinquênio (2006–2010) caracteriza-se por forte volatilidade e níveis médios superiores a 7 L/milhão TKB, refletindo uma operação menos padronizada e com menor grau de controle energético. Entre 2011 e 2015, observa-se uma redução progressiva para patamares próximos de 6,6 L/milhão TKB, movimento associado à renovação parcial da frota e à introdução de sistemas básicos de telemetria e controle operacional. A partir de 2016, a queda torna-se mais consistente, atingindo aproximadamente 5,9 L/milhão TKB em 2020, o que corresponde a uma redução acumulada de cerca de 20% em relação à década anterior.

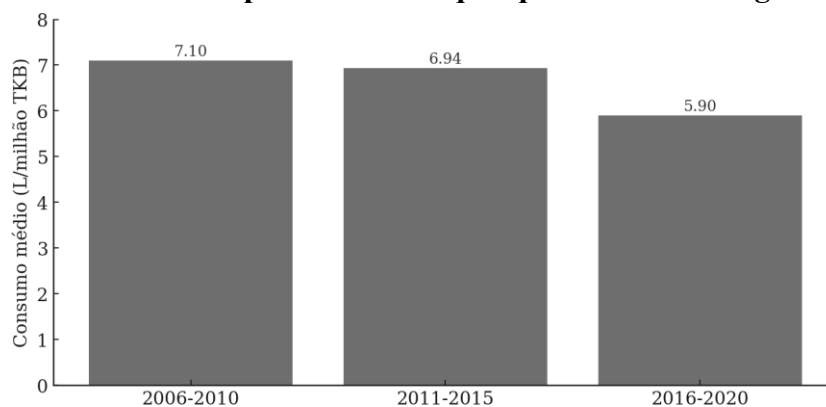
Figura 11 – Evolução da eficiência energética da VLI Logística (FCA)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da ANTT (SAFF, 2006–2020).

A consolidação desses ganhos torna-se ainda mais clara quando a série é agregada em médias quinquenais. A Figura 12 mostra que o consumo específico médio recuou de 7,10 L/milhão TKB no período 2006–2010 para 6,94 L/milhão TKB entre 2011–2015, alcançando 5,90 L/milhão TKB no quinquênio 2016–2020. Essa trajetória reflete o amadurecimento das estratégias corporativas de eficiência energética da VLI, ancoradas principalmente em quatro frentes: (i) capacitação técnica em condução econômica; (ii) padronização operacional de composições e vagões em trechos críticos; (iii) modernização incremental de motores e sistemas eletrônicos de tração; e (iv) uso sistemático de ferramentas analíticas de telemetria e previsão de consumo.

Figura 12 – Consumo específico médio quinquenal da VLI Logística (FCA)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da ANTT (SAFF, 2006–2020).

Embora a tendência seja claramente descendente, o consumo específico médio da VLI permanece acima dos valores observados para a MRS e a Rumo no mesmo período. Essa diferença, contudo, não deve ser interpretada como menor esforço em eficiência energética, mas como reflexo das restrições físicas e operacionais da FCA, incluindo rampas longas, traçados sinuosos, menor densidade de carga e maior heterogeneidade de fluxos. Tais características reduzem o potencial de ganhos adicionais de eficiência, mesmo quando são adotadas práticas semelhantes de gestão energética operacional.

Em síntese, a VLI Logística apresenta um padrão consistente de melhoria estrutural em eficiência energética operacional, expresso na redução contínua do consumo específico de diesel ao longo do período analisado. Esses resultados foram alcançados predominantemente por meio de ajustes operacionais, digitalização da condução e melhor aproveitamento da frota existente, reforçando o argumento central desta dissertação de que ganhos relevantes de eficiência energética podem ser obtidos mesmo na ausência de mudanças tecnológicas disruptivas na matriz energética ferroviária.

De forma mais ampla, a trajetória observada nas principais concessionárias ferroviárias brasileiras — Vale, Rumo, MRS e VLI — revela um processo de convergência em torno da eficiência energética operacional como eixo estruturante da sustentabilidade logística. Essa convergência reflete não apenas pressões regulatórias e de mercado, mas também a internalização de uma nova racionalidade produtiva, na qual a redução do consumo específico de energia se torna condição simultânea para competitividade econômica e mitigação de emissões. Evidências recentes indicam que a intensidade energética média do transporte ferroviário brasileiro recuou de forma significativa na última década, resultado direto de investimentos em digitalização, automação embarcada e gestão ativa do uso de combustível (IPEA, 2022; ANTT, 2022; IBRAM, 2024).

Nesse sentido, embora a vantagem relativa da ferrovia frente ao modal rodoviário seja expressiva, a compatibilidade com metas climáticas de longo prazo depende da ampliação contínua dos ganhos de eficiência energética, complementados, de forma gradual, por combustíveis alternativos e investimentos seletivos em eletrificação. Assim, a eficiência energética operacional emerge não apenas como instrumento de mitigação no curto prazo, mas como elemento estruturante para a consolidação da ferrovia brasileira no processo de transição energética nacional.

2.3 Estudos aplicados sobre eficiência energética, descarbonização e transporte

A literatura empírica sobre eficiência energética, descarbonização e transporte é ampla e tem avançado de forma consistente no contexto do debate sobre políticas de mitigação climática (ROBSON; WIJAYARATNA; DIXIT, 2018; BETARELLI; DOMINGUES; HEWINGS, 2020; HEYMANN et al., 2021; GHISOLFI et al., 2022; LEBEDEVAS et al., 2017; LEE; KIM, 2018; VILLEN et al., 2024). Esse avanço reflete tanto a crescente relevância do setor de transportes na dinâmica das emissões quanto o reconhecimento de que alterações em sua estrutura e desempenho possuem implicações econômicas amplas, dada a sua função como elo entre produção, distribuição e consumo. Os estudos utilizam uma variedade de ferramentas analíticas, mas três abordagens têm se mostrado particularmente recorrentes, cada uma enfatizando dimensões específicas do problema.

A primeira delas corresponde aos modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), empregados para capturar interações macroeconômicas e distributivas decorrentes de mudanças no setor de transportes e de políticas ambientais (ROBSON; WIJAYARATNA; DIXIT, 2018; SHAHRARI; BACHMANN, 2018). Nesses modelos, o transporte é representado como parte integrante da estrutura produtiva, de modo que alterações em seus custos ou em sua eficiência energética afetam diretamente os preços relativos dos bens, com repercussões sobre produção, consumo e comércio. Já a segunda abordagem corresponde a técnicas de fronteira de eficiência, como a Análise Envoltória de Dados (DEA), aplicadas para medir ecoeficiência de setores e empresas a partir da consideração simultânea de insumos desejáveis e indesejáveis (HEYMANN et al., 2021), permitindo identificar variações de desempenho associadas a fatores tecnológicos e organizacionais. Por fim, a terceira vertente é representada pelas abordagens de dinâmica de sistemas, que permitem simular retroalimentações, atrasos temporais e trajetórias de transição em longo prazo (GHISOLFI et al., 2022), sendo particularmente relevantes para a análise de processos em que decisões presentes condicionam trajetórias futuras.

No Brasil, há exemplos em cada uma dessas direções, ainda que frequentemente aplicados de forma isolada. Proque et al. (2020) aplicaram modelos de EGC para analisar impactos espaciais de políticas urbanas sobre consumo de energia em transportes, incorporando explicitamente a dimensão regional na análise dos efeitos econômicos. Heymann et al. (2021) recorreram à DEA para avaliar ecoeficiência na indústria automotiva, integrando variáveis de produção e emissões

e evidenciando diferenças relevantes de desempenho entre unidades produtivas. Já Ghisolfi et al. (2022) utilizaram dinâmica de sistemas no setor de frete, evidenciando como retroalimentações de políticas de mitigação podem gerar trajetórias distintas de emissões ao longo do tempo, dependendo da interação entre custos, tecnologia e comportamento da demanda.

As distintas análises metodológicas mostram que os métodos não são excludentes, mas complementares, na medida em que operam em níveis distintos de observação. Em outras palavras, os modelos de EGC oferecem uma visão sistêmica de custos e benefícios em escala macroeconômica, permitindo captar efeitos indiretos e interdependências entre setores e regiões. Já a DEA evidencia ineficiências setoriais e empresariais, ao identificar variações de desempenho associadas a fatores tecnológicos e organizacionais. Por sua vez, a dinâmica de sistemas destaca a dimensão temporal dos processos de transição, evidenciando como decisões presentes condicionam trajetórias futuras de consumo energético e emissões, o que é particularmente relevante em análises de longo prazo.

Entre as aplicações de modelos de equilíbrio geral computável (EGC) ao setor ferroviário brasileiro, destaca-se o estudo de Betarelli, Domingues e Hewings (2020), que analisa os impactos da revisão tarifária de 2012 promovida pela ANTT, responsável por reduzir os tetos de frete das concessões ferroviárias. Para avaliar os efeitos dessa política, os autores desenvolveram um modelo inter-regional dinâmico de EGC, calibrado para a economia brasileira, que incorpora economias de escala e imperfeições de mercado, tornando-o especialmente adequado à análise de setores regulados e concentrados como o ferroviário, nos quais a formação de preços e as decisões de investimento não seguem padrões competitivos tradicionais.

Os resultados do estudo indicam efeitos macroeconômicos positivos, com aumento do PIB, investimentos e exportações em setores intensivos em transporte ferroviário de carga, como mineração e siderurgia, impulsionados pela redução dos custos logísticos sistêmicos. Em contrapartida, o setor ferroviário experimentou queda na produção, rentabilidade e investimentos privados, refletindo a perda de atratividade financeira das concessões. Essa dualidade evidencia a coexistência de efeitos distintos entre níveis de análise, associados à interação entre regulação, estrutura de mercado e dinâmica de investimento, indicando que

políticas voltadas à eficiência sistêmica podem produzir impactos assimétricos entre setores. Por seu turno, a discussão regulatória conecta-se diretamente à dimensão institucional e operacional da logística ferroviária. Bueno e Alencar (2016) aplicaram o modelo Supply Chain Capability Maturity Model – S(CM)² a três operadores ferroviários de portes distintos, avaliando 170 indicadores distribuídos em seis dimensões de maturidade: gestão de fornecedores, gestão da produção de serviços logísticos, transporte e armazenagem, tecnologia da informação, mensuração de desempenho e gestão de recursos humanos. Essa abordagem permite analisar não apenas resultados operacionais, mas também a estrutura organizacional que sustenta o desempenho logístico.

Os resultados indicaram que operadores de médio e grande porte atingiram o nível 3 de maturidade (“Managed”), com processos documentados e integração funcional, enquanto o operador de pequeno porte permaneceu no nível 2 (“Defined”), revelando fragilidades sobretudo em tecnologia da informação, métricas de desempenho e recursos humanos. A principal conclusão é que a evolução da maturidade logística no Brasil é incremental e heterogênea, refletindo diferenças de capacidade organizacional entre empresas. Em outras palavras, as funções centrais de transporte e inventário avançam mais rapidamente do que as funções de suporte, como inovação tecnológica e capital humano, o que implica limitações na capacidade de absorção de ganhos de eficiência mais sofisticados.

A heterogeneidade de capacidades internas observada, evidenciada por Bueno e Alencar (2016), ganha ainda mais relevância quando se observa o papel do transporte dentro da economia brasileira como um todo. Não se trata apenas de avaliar se as concessionárias têm condições organizacionais de incorporar inovações ou responder a incentivos regulatórios, mas também de entender como alterações no desempenho do setor se difundem para os demais segmentos produtivos. É justamente esse ponto que foi explorado por Toyoshima e Ferreira (2002), ao analisar a posição estrutural do transporte no sistema econômico nacional.

Com base nas tabelas de recursos e usos do IBGE entre 1990 e 1999, Toyoshima e Ferreira (2002) calcularam o índice de poder de dispersão (encadeamentos para trás) e o índice de sensibilidade de dispersão (encadeamentos para frente). Os resultados mostraram que, embora o transporte não fosse classificado como setor-chave pelo critério tradicional de encadeamentos para trás, apresentava de forma consistente valores elevados de encadeamentos para frente. Em termos simples, isso significa que o transporte funcionava como um insumo essencial para praticamente todas as cadeias produtivas, exercendo forte influência sobre a competitividade e os custos sistêmicos da economia.

Essa constatação conecta-se diretamente ao debate sobre descarbonização. Se o transporte atua como difusor de custos e ganhos de produtividade, mudanças em sua intensidade carbônica ou em seus custos relativos tendem a reverberar por toda a economia, afetando competitividade, renda e bem-estar. Do ponto de vista da modelagem em equilíbrio geral, isso implica a necessidade de representar o transporte com elevado grau de conectividade intersetorial, de modo a captar adequadamente seus efeitos multiplicadores e suas interações com os demais setores.

No contexto nacional, a agenda de pesquisa avançou para análises voltadas à transição logística de baixo carbono, nas quais a dimensão energética do transporte passa a ser tratada em conjunto com a estrutura modal e com os padrões de uso da infraestrutura. Um marco importante nesse processo é o estudo publicado no BNDES Setorial por Villen et al. (2024), que desenvolve uma análise comparativa entre estratégias de mitigação no setor de transporte de cargas no Brasil, incorporando explicitamente a heterogeneidade entre modais e fluxos logísticos.

O artigo parte da constatação de que o transporte responde por parcela relevante das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e que a trajetória de mitigação depende, em grande medida, da capacidade de reconfiguração da matriz logística. Para estruturar o exercício de cenarização, os autores utilizam a metodologia EPL–IEMA (2021), que padroniza fatores de emissão por tonelada-quilômetro útil (TKU) para diferentes modais, permitindo maior consistência na comparação entre alternativas logísticas. Essa abordagem metodológica possibilita integrar informações físicas de transporte com estimativas de emissões, aproximando a análise de parâmetros observáveis.

A análise compara dois cenários prospectivos até 2035. O primeiro, denominado cenário inercial, preserva a estrutura modal observada em 2015, mantendo a predominância do transporte rodoviário. O segundo, denominado cenário projetado, incorpora o pipeline de investimentos previsto no Plano Nacional de Logística (PNL), incluindo expansão da malha ferroviária, melhorias na hidrovia e integração intermodal. A comparação entre os cenários permite avaliar o impacto potencial da reconfiguração modal sobre as emissões.

Os resultados indicam que o cenário projetado permitiria evitar aproximadamente 5,54 milhões de toneladas de CO₂ por ano, com diferenças relevantes entre fluxos e produtos transportados.

Em particular, a transferência de cargas de menor valor agregado e maior volume — como grãos e minérios — para modais mais eficientes, como ferrovia e hidrovia, apresenta impacto expressivo na redução das emissões. Esse resultado está diretamente relacionado à diferença estrutural de intensidade de carbono entre modais, que não depende apenas de eficiência tecnológica, mas da própria natureza física do transporte.

Além disso, os resultados mostram que a realocação modal tende a gerar impactos mais expressivos do que ganhos intramodais de eficiência. Em outras palavras, embora melhorias tecnológicas dentro de cada modal contribuam para a redução de emissões, seu potencial é limitado quando comparado à mudança da estrutura logística como um todo. No entanto, a efetividade dessa estratégia depende de condições institucionais e de investimento, como expansão da infraestrutura ferroviária, coordenação logística e estabilidade regulatória, o que introduz restrições importantes à implementação dos cenários analisados.

No plano internacional, a literatura sobre EGC aplicada ao transporte tem evoluído no sentido de maior sofisticação analítica, especialmente no que se refere à desagregação modal, à incorporação de emissões e à análise de efeitos regionais e distributivos (ROBSON; WIJAYARATNA; DIXIT, 2018). Esses avanços refletem a tentativa de representar de forma mais realista a heterogeneidade dos sistemas de transporte e suas interações com a economia. Ainda assim, persistem limitações importantes. Entre elas, destaca-se a dificuldade de representar trajetórias tecnológicas dinâmicas em modelos estáticos ou comparativos, bem como a escassez de dados desagregados para calibração de parâmetros específicos do setor de transportes. Essas limitações afetam a capacidade dos modelos de capturar processos de transição tecnológica de forma consistente, especialmente em contextos de rápida mudança regulatória e tecnológica.

Nesse sentido, Shahraki e Bachmann (2018) discutem as dificuldades associadas à parametrização de inovação tecnológica em modelos EGC, destacando que as trajetórias de adoção de tecnologias de baixo carbono são marcadas por elevada incerteza. Essa incerteza decorre tanto de fatores econômicos, como custos relativos e incentivos de mercado, quanto de fatores institucionais e regulatórios, que condicionam o ritmo e a direção da inovação.

De forma complementar, Wang et al. (2025) analisam a descarbonização do transporte de cargas

na China, evidenciando que políticas de precificação de carbono, quando implementadas isoladamente, apresentam efeitos limitados sobre a redução de emissões. Segundo os autores, a eficácia dessas políticas depende de sua articulação com investimentos em infraestrutura logística e de mudanças estruturais na matriz de transporte, o que reforça a importância de abordagens integradas.

Ao lado das abordagens macroeconômicas, estudos microempíricos contribuem para a análise de ganhos intramodais de eficiência, explorando os determinantes técnicos e operacionais do consumo de energia. Nesse contexto, Lebedevas et al. (2017) analisam o desempenho energético de locomotivas a diesel a partir de medições diretas e modelagem termodinâmica, considerando diferentes regimes de operação. A análise evidencia que o consumo de combustível é sensível a variáveis como carga transportada, velocidade, perfil da via e controle da tração, indicando a importância de fatores operacionais na determinação da eficiência energética.

Os resultados mostram que melhorias técnicas e operacionais podem gerar reduções relevantes no consumo de combustível, especialmente por meio da otimização da condução e do uso mais eficiente da potência das locomotivas. No entanto, também indicam que esses ganhos são condicionados por características específicas da operação e podem apresentar retornos marginais decrescentes, o que limita seu impacto agregado quando considerados isoladamente. De forma complementar, Lee e Kim (2018) analisam a relação entre tarifas ferroviárias, escolha modal e emissões, combinando um modelo insumo-produto com uma regressão logística de escolha modal. A abordagem permite capturar simultaneamente os efeitos econômicos das mudanças tarifárias e as respostas comportamentais dos usuários do transporte. Os resultados indicam que aumentos tarifários no transporte ferroviário podem induzir deslocamentos de carga para o transporte rodoviário, que apresenta maior intensidade de carbono, gerando impactos negativos sobre as emissões e sobre os custos sistêmicos.

Esses resultados evidenciam a importância de considerar não apenas a eficiência técnica dos modais, mas também os incentivos econômicos que orientam a escolha modal. Em particular, destacam que políticas tarifárias e regulatórias podem influenciar diretamente a estrutura da matriz de transporte, com implicações para a intensidade energética e as emissões.

Estudos como Kenderdine e Bucsky (2021) e Chen e Haynes (2017) ampliam essa análise ao incorporar dimensões institucionais e espaciais, evidenciando que a expansão da infraestrutura ferroviária e a integração logística dependem de fatores como governança, coordenação entre agentes e estrutura da demanda. Esses elementos condicionam a viabilidade econômica dos investimentos e a utilização efetiva da infraestrutura disponível.

Em conjunto, a literatura aponta para a coexistência de diferentes mecanismos de redução de emissões no setor de transportes. Por um lado, ganhos intramodais de eficiência, associados a melhorias tecnológicas e operacionais; por outro, mudanças estruturais na matriz de transporte, decorrentes de realocação modal e expansão da infraestrutura. A análise desses processos requer a integração de diferentes abordagens metodológicas, capazes de capturar simultaneamente os determinantes microeconômicos da eficiência e os efeitos macroeconômicos de sua propagação.

Apesar desses avanços, observa-se uma lacuna na literatura brasileira no que se refere à integração entre evidências empíricas detalhadas de eficiência energética no nível das concessionárias ferroviárias e modelos capazes de captar seus efeitos sistêmicos. Em particular, há escassez de estudos que utilizem dados operacionais desagregados, como consumo específico de combustível, para parametrizar modelos econômicos e avaliar seus impactos ao longo da economia.

Nesse contexto, a presente dissertação propõe combinar a construção de uma base de dados de eficiência energética ferroviária, baseada em indicadores físicos de consumo de diesel, com a aplicação de um modelo de equilíbrio geral computável em estrutura dinâmica-recursiva. Essa abordagem permite analisar a forma como alterações no consumo específico de energia se traduzem em mudanças nos custos de transporte e, conseqüentemente, em efeitos sobre a estrutura produtiva, os preços relativos e as emissões, aproximando a modelagem econômica de evidências empíricas observáveis.

3. METODOLOGIA

Para simular cenários prospectivos de práticas de eficiência energética por concessionários ferroviários esta dissertação recorre a um modelo nacional de equilíbrio geral computável (EGC) na versão dinâmica-recursiva, denominado BIM-T (Brazilian Intersectoral Model and Transport). Trata-se de um modelo desenvolvido no projeto de pesquisa fomentado pela Fapemig desde 2022 (BETARELLI JUNIOR, 2022) de maneira que os serviços de transporte de carga estão devidamente desagregados com os concessionários ferroviários discriminados na estrutura de dados. Esta estrutura de dados incorpora avanços especialmente na desagregação do setor ferroviário de carga por empresas concessionárias. A demanda de margens, uso do serviço e custos de produção de cada concessionária são alcançadas a partir das informações financeiras, do fluxo de carga (ANTT, 2015, 2024) e do Sistema de Contas Nacionais (SCN) e da Pesquisa Anual de Serviços (PAS) do IBGE (2018, 2022).

A estrutura matemática deste modelo é formada por um conjunto de equações linearizadas e as soluções são alcançadas na forma de taxa de crescimento, conforme a tradição australiana de modelagem em equilíbrio geral do tipo Johansen (1964). Os principais módulos teóricos são originalmente derivados do modelo ORANIGRD (HORRIDGE, 2002). No modelo há um tratamento específico das emissões atmosféricas, distinguindo-se entre agentes emissores (combustíveis, indústrias e famílias) e atividades emissoras de acordo com o modelo MMRF (*Monash Multi-Regional Forecasting Model*) de Adams et al. (2010) e do modelo BeGreen (*Brazilian Energy and Greenhouse Gas Emissions General Equilibrium Model*) de Magalhães (2013).

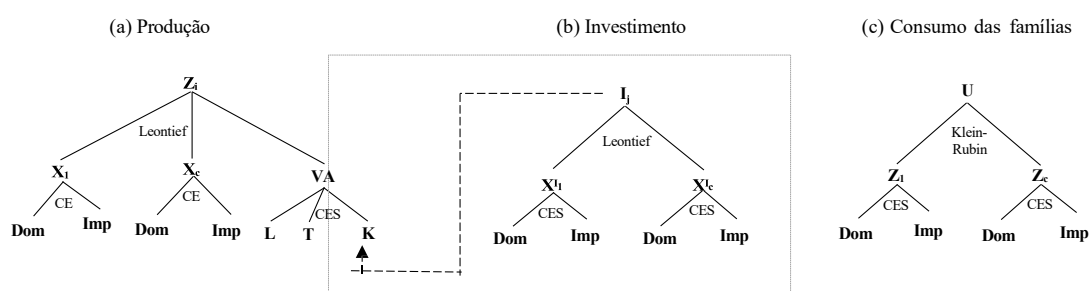
Esse tipo de modelo incorpora um conjunto de equações que integram conhecimentos teóricos e empíricos acumulados sobre o funcionamento da economia como um sistema composto por mercados interdependentes, cuja estrutura de oferta, demanda, produção e alocação de fatores pode ser simultaneamente alterada por choques exógenos, tais como mudanças tecnológicas ou de preços relativos. Tradicionalmente os modelos EGC permitem variações no preço relativo, capturam efeitos de substituição em determinados mercados, consideram as reações do lado da oferta e da demanda, e reconhecem os efeitos diretos e indiretos de um sistema econômico, tratado em uma estrutura de equilíbrio geral. Em um modelo EGC, os agentes econômicos

seguem comportamentos de natureza walrasiana, nos quais famílias maximizam utilidade e firmas maximizam lucros ou minimizam custos, respeitando as suas respectivas restrições (BETARELLI JUNIOR, ADMIR ANTÔNIO, 2013; DIXON; RIMMER, 1998; DOMINGUES, 2002; HADDAD, 2004; HORRIDGE, 2000; MAGALHÃES, 2013; PEROBELLI, 2004). A partir desses tipos de modelo, é possível simular políticas como de medidas de eficiência energética no transporte ferroviário de carga para enotrar repercussões econômicas transmitidos de forma direta e indireta pelos canais dos vínculos de oferta e demanda de um sistema econômico, como no Brasil.

3.1 Principais aspectos da estrutura teórica do modelo

Em conformidade com uma estrutura EGC padrão, produtores e investidores minimizam os custos para o nível de produção e criação de capital (DIXON *et al.*, 1982). A demanda dos compostos de insumos ocorre em proporções fixas (Leontief). Entretanto, cada composto de insumo é derivado de uma função de elasticidade de substituição constante (CES). Conseqüentemente, as mudanças nos preços relativos dos insumos induzem uma substituição imperfeita em favor de insumos relativamente barateados dentro do composto (ARMINGTON, 1969). Por seu turno, as famílias maximizam a utilidade a partir de um sistema linear de despesas (LES) (KLEIN; RUBIN, 1947) sujeita a uma restrição orçamentária. Na demanda por exportações de cada produto doméstico, adota-se a hipótese de pequena economia para o comércio internacional, de modo que as variações no comércio exterior brasileiro não influenciam os preços internacionais. A demanda externa por bens tradicionais muda inversamente ao preço médio em moeda estrangeira das exportações, sendo a taxa de câmbio exógena (numerário). Além disso, o consumo do governo é exógeno e os estoques se acumulam de acordo com a variação da produção. A Figura 13 representa, de forma esquemática, a estrutura de produção, os mecanismos de alocação de investimentos e o vínculo com a dinâmica de acumulação de capital do modelo.

Figura 13 – Principais estruturas aninhadas do modelo



Os setores econômicos produzem um ou mais produtos Z_i combinando dois compostos principais: insumos intermediários X_i e valor adicionado V_i , em proporções fixas, formalizadas pela seguinte função de produção do tipo Leontief:

$$Z_i = \min(X_i, V_i) \quad (01)$$

Cada um desses compostos é, por sua vez, resultado de uma função de elasticidade de substituição constante (CES). A tecnologia CES permite que variações nos preços relativos induzam substituições imperfeitas entre os insumos. No caso dos intermediários, essa substituição ocorre entre bens nacionais (D_i) e importados (M_i), enquanto no valor adicionado ela se dá entre os fatores primários terra (R_i), capital (K_i) e trabalho (L_i):

$$X_i = \left[\sum_{s=1}^S \delta_{s,i} X_{s,i}^{-\rho^X} \right]^{-\frac{1}{\rho^X}}, s = (D, M) \quad (02)$$

$$V_i = \left[\sum_{f=1}^F \delta_{f,i} V_{f,i}^{-\rho^V} \right]^{-\frac{1}{\rho^V}}, f = (L, R, K) \quad (03)$$

em que δ representa parâmetros de participação que respeitam a condição $\sum_i \delta_{s,i} = 1$ ou $\sum_i \delta_{f,i} = 1$; e ρ corresponde às elasticidades de substituição, que variam entre setores e fatores.

Essa estrutura é análoga àquela utilizada na formulação da demanda de investimentos do modelo, em que os investidores (I_i) combinam insumos de forma a minimizar os custos de formação de capital, mas não utilizam diretamente fatores primários. Por seu turno, a acumulação de capital segue uma dinâmica recorrente no tempo, com base em Horridge (2012):

$$K_{i,t+1} = (1 - \varphi_i)K_{i,t} + I_{i,t} \quad (04)$$

em que $K_{i,t}$ é o estoque de capital disponível no setor i no período t e φ_i é a taxa de depreciação. O estoque inicial de capital é fornecido exogenamente. De acordo com Chen (2019), a alocação de investimentos ao longo do tempo é definida por duas regras básicas:

$$G_i = \frac{I_{i,t}}{K_{i,t}} = F(E_i) \quad (05)$$

$$G_i = Q_i \cdot G_i^{Tend} \cdot \frac{(M_i)^{\xi_i}}{Q_i - 1 + (M_i)^{\xi_i}} \quad (06)$$

onde G_i é a taxa bruta de crescimento do estoque de capital; E_i é a taxa de retorno esperada; $M_i = \frac{E_i}{R_i^{Normal}}$ expressa a taxa de retorno esperada em relação à taxa de retorno normal (R_i^{Normal}); G_i^{Tend} é a tendência de crescimento do estoque de capital; Q_i é a relação investimento/capital de referência; e ξ_i é a elasticidade desse ajuste. A partir dessas funções, observa-se que o investimento cresce positivamente em resposta a retornos esperados acima das taxas normais, convergindo gradualmente quando ocorre o oposto.

No caso das famílias, a função utilidade é representada por um sistema linear de despesas (LES), derivado de Klein e Rubin (1947). Esse sistema divide o consumo de cada bem composto em duas parcelas: uma de subsistência (Z_i^{Sub}) — que representa o mínimo necessário para consumo — e outra de luxo ou supranumerário, definida como o excedente em relação ao nível de subsistência. A função utilidade assume, portanto, a seguinte forma:

$$U(Z_1, \dots, Z_c) = \sum_{i=1}^c S_i^{Lux} \ln(Z_i - Z_i^{Sub}) \quad (07)$$

em que Z_i é a demanda total do bem i ; Z_i^{Sub} representa o gasto mínimo de subsistência; S_i^{Lux} é a participação do bem i no orçamento destinado a bens acima do nível de subsistência. Como apenas os gastos supranumerários variam proporcionalmente à renda, a função LES é não homotética (BURFISHER, 2017), implicando que os bens de subsistência ocupam maior participação no orçamento quando a renda cai, e menor quando a renda sobe. A escolha entre bens domésticos e importados é tratada por meio de uma tecnologia CES aninhada ao sistema de consumo, de forma similar ao que ocorre no bloco produtivo.

No bloco de exportações, o modelo adota a hipótese de pequena economia aberta, assumindo que variações na quantidade exportada pelo Brasil não afetam os preços internacionais dos bens.

A demanda por exportações varia inversamente ao preço em moeda estrangeira, sendo a taxa de câmbio definida como numerário. O consumo do governo é tratado como exógeno e os estoques variam de acordo com a diferença entre produção e demanda total.

No mercado de trabalho, o modelo incorpora um mecanismo de ajuste defasado entre a oferta de empregos e o crescimento real dos salários (HORRIDGE, 2012). Quando choques elevam temporariamente o nível de emprego acima da tendência, os salários reais convergem para um patamar reduzido no longo prazo, implicando que choques desfavoráveis ao trabalho geram quedas de curto prazo no emprego e de longo prazo nos salários reais (DIXON; RIMMER, 2002).

Também há um módulo de emissão de carbono na estrutura teórica do modelo. De acordo com o Monash Multi-Regional Forecasting Model (MMRF) de Adams et al. (2010), as emissões da queima de combustíveis são modeladas como sendo diretamente proporcionais ao consumo de combustível (ou seja, indústrias e residências). Portanto, a variação ordinária em toneladas de CO2 emitidas pelo uso de combustível ($\Delta G_{e,u}$) é definida como:

$$\Delta G_{e,u} = 0.01 * g_{e,u} * G_{e,u} \quad (08)$$

em que $g_{e,u}$ é a variação percentual na quantidade demandada de cada combustível (e) por cada usuário (u) e $G_{e,u}$ é o volume de toneladas de CO2 emitido pela queima de combustível. Existem oito tipos de combustível (e), como lenha proveniente de florestas; extração de carvão; combustível de aviação; gasolina; óleo fóssil; diesel; etanol e biocombustíveis; e outros produtos de refino. Por sua vez, os usuários (u) estão divididos entre os setores econômicos e residências (BETARELLI JUNIOR et al., 2022; MAGALHÃES, 2013).

Por fim adicionou-se variáveis ordinárias a fim de capturar a variação de duas medidas físicas para os concessionários ferroviários. A primeira é as toneladas-quilômetros (tkm) por produto transportado, equanto a segunda é o volume de m3 de diesel e lubrificantes de cada empresa concessionária.

3.2 Notas sobre a calibragem dos dados

A calibragem do modelo BIM-T foi realizada a partir da matriz de insumo-produto no ano de 2015. Essa matriz reúne um conjunto de tabelas que apresentam as operações de produção e produção e uso da economia brasileira. Representa, pois, a matriz de insumo-produto do IBGE (2022) com as desagregações nos serviços de transporte de carga e passageiros realizadas por Betarelli Junior et al. (2022; 2022, 2023). A primeira etapa do processo de desagregação consistiu em distribuir as margens de transporte entre os serviços responsáveis por sua geração: rodoviário, ferroviário e aquaviário. Essa desagregação incluiu também as tabelas auxiliares associadas ao uso de produtos domésticos e importados. Conforme o IBGE (2000), se o transporte é realizado de tal forma que o comprador tem que assumir os custos, independentemente de quem realiza esse tipo de serviço, estes custos são identificados separadamente como margens de transporte. As margens aquaviárias foram alocadas conforme a estrutura de rateio elaborada por Betarelli Junior (2013), acrescentando novas informações estatísticas do novo Anuário da Antaq (2020), cuja base de dados apresenta um grande nível de desagregação (i.e., produtos, portos, acondicionamento e via de transporte).

Por sua vez, para obter as margens dos concessionários ferroviários utilizou-se os dados de transporte de produtos por tonelada quilômetro útil (TKU) por ferrovia (ANTT, 2015) já tabulados pelas tarifas da ANTT. A tabela tarifária da ANTT lista os preços máximos por quilometragem para cada mercadoria, levando em conta a parcela de custo fixo. Diante disso, calculou-se a tarifa para cada mercadoria transportada por concessionária ferroviária, com base no fluxo ferroviário de 2015, fornecido pela ANTT. Tendo em vista que as tarifas representam o limite máximo de cobrança e não nível praticado no mercado, até porque o fluxo ferroviário de 2015 não contém informações sobre as tarifas cobradas pelas concessionárias (i.e., informações são confidenciais). A solução foi ponderar as tarifas máximas por trajeto percorrido e, numa etapa posterior, obter a estrutura de rateio para distribuir as receitas reais das concessionárias, conforme consta nos relatórios financeiros das mesmas (ANTT, 2024).

Para o transporte de contêineres cheios converteu-se as tarifas de a tarifa de R\$/contêiner para R\$/toneladas conforme os pesos deles. Em seguida, identificou-se o que é comumente transportado nesse tipo de acondicionamento. Para isso, Betarelli et al. (2022) recorreu as informações estatísticas das ANTAQ (2020), que fornece a quantidade e produto transportados

em contêineres por porto brasileiro. Em seguida, procurou-se identificar em quais portos as empresas concessionárias que transportaram contêineres cheios realizam conexões. A partir disto, pode-se identificar o que potencialmente cada empresa concessionária transportou dentro dos contêineres. A hipótese subjacente é que o transporte de mercadorias dentro de contêineres por vias férreas é similar às movimentações de contêineres realizados por portos de conexão. Assim, alcançou-se também a estrutura de rateio do setor ferroviário, utilizada para distribuir as margens por produto classificado por código Contas Nacionais. As margens ferroviárias ficaram desagregadas por empresas concessionárias.

De posse do vetor de margens ferroviárias, a margem do transporte rodoviário de carga foi encontrada por dedução (por resíduo), ou seja, descontou no vetor da margem de transporte de carga original do IBGE (2022) as margens ferroviárias e aquaviárias para encontrar as rodoviárias, de acordo com Betarelli et al. (2022).

Em seguida, procedeu-se à desagregação da oferta e uso do produto “serviços de transporte terrestre de carga” entre os modais ferroviário, rodoviário e dutoviário, mantendo-se o padrão já previsto para o transporte aquaviário na versão original da MIP 2015 do IBGE (2022). Conforme o IBGE (2000), os valores a preço básico de uso do serviços de transporte de carga representam os valores dos fretes pagos no transporte dos bens pelas diversas atividades econômicas. Neste caso, se o produtor transporta o bem ou providencia o seu transporte sem custos adicionais para o comprador, estes custos de transporte serão incluídos no conceito de preço básico. Este uso do transporte terrestre de carga foi desagregado entre a modalidade rodoviária, ferroviária e dutoviária de acordo com a estrutura de rateio fornecida pela “Diretoria de Pesquisas das Contas Nacionais” do IBGE (MONTROYA; MARTINS, 2021). Para a desagregação do uso do transporte ferroviário de carga entre as empresas concessionárias, recorreu-se a estrutura de rateio das receitas delas, a mesma utilizada para distribuir as margens ferroviárias após a transformação de produto por setor a partir de uma matriz de cota de mercado (*market-share*), cujos elementos representam a participação setorial na produção de cada produto identificado na pauta de transporte ferroviária.

Para o consumo das famílias, os microdados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) entre 2008 e 2009 foram utilizados (IBGE, 2010), cujo dispêndio foi totalmente alocado para serviços rodoviários de carga. Já nas exportações de serviços fez-se o uso dos dados do SISCOSEV para produtos intangíveis do Ministério do Desenvolvimento da Indústria e

Comércio (MDIC). Os demais dispêndios dos componentes da demanda final já exibiam inicialmente valores nulos para o transporte terrestre de carga, ou seja, não houve a necessidade de desagregação.

O total de margens e de uso a preço básico define o valor bruto da produção (VBP) dos serviços rodoviários, ferroviários e aquaviários de carga pelo setor de transporte terrestre. A partir dos relatórios financeiros dos concessionários ferroviários da Antt (2024) e Pesquisa Anual de Serviços (PAS) do IBGE (2018) encontrou-se o total de consumo intermediário (CI) de cada modalidade, inclusive para o transporte dutoviário e transporte terrestre de passageiros. Dessa maneira, a diferença entre VBP e CI define o valor adicionado (VA) das empresas concessionárias. Com os totais de CI de cada serviço de transporte terrestre, utilizou-se a estrutura de rateio das rubricas de custos da PAS do IBGE (2018). As rubricas de custos foram associadas aos respectivos códigos dos insumos (produtos) identificados no vetor de custos do setor de transporte terrestre das contas nacionais. Cabe salientar que realizou-se um tratamento específico para o uso de diesel pelo concessionários ferroviários, uma vez que é possível encontrar o volume físico (m^3) e do custo unitário deste tipo de insumo a partir de algumas informações combinadas da ANTT (2015, 2024). Esses cálculos e resultados do uso de diesel pelos concessionários ferroviários serão mais bem explorados na próxima seção.

Em suma, considerando o foco desta pesquisa no uso de combustíveis, duas fases adicionais de desagregação sobre o vetor de custos do setor de transporte terrestre foram necessárias. Na primeira, o vetor de custos do setor de transporte terrestre foi separado entre transporte de passageiros e de carga, cuja participação foi posteriormente decomposta por modal (rodoviário, ferroviário e dutoviário), já sob a ótica de custos. Na segunda, o vetor de custos do transporte ferroviário de carga foi desagregado entre as empresas concessionárias, com base em suas demonstrações financeiras anuais. Esse procedimento permitiu evidenciar a heterogeneidade no uso de combustíveis entre operadoras e viabiliza a simulação de cenários diferenciados de eficiência energética. Em uma etapa posterior e a fim de garantir uma decomposição consistente em relação ao total de CI (coluna) e os totais de cada insumo intermediário (linha) do setor terrestre, aplicou-se o método RAS, um algoritmo de ajuste biproportional (MILLER; BLAIR, 2009).

Esses procedimentos discutidos procuraram preparar a MIP 2015 do IBGE com uma nova configuração, especialmente, incorporando novos serviços de transporte por meio de vários trabalhos de decomposição, usufruindo, em alguns casos, de informações complementares e importantes. Resumidamente e após todas as mudanças realizadas, a base de dados do modelo passou a reconhecer 67 setores produtivos, 137 produtos, 05 componentes da demanda final (consumo das famílias, consumo do governo, investimento, exportações e estoques), 03 elementos de fatores primários (terra, capital e trabalho), 04 setores de margens (comércio e os 03 tipos de transporte de carga), importações por produto para cada um dos 65 setores e 05 componentes da demanda final, 01 agregado de impostos sobre a produção e 01 desagregação por tipos de tributos, incidindo sobre fluxos de compras (IPI, ICMS e Outros).

A fim de explorar os principais setores e produtos relacionados a pauta de transporte dos concessionários ferroviários, esta dissertação realizou uma agregação do número de produtos e setores da estrutura de dados do modelo. A versão final da base de dados do modelo passou a ser composta 73 produtos e 52 setores econômicos. O Quadro 1 apresenta a relação final desses produtos e setores econômicos da estrutura de dados do modelo.

Quadro 1 – Relação final dos produtos e setores econômicos do modelo

Produtos			Setores econômicos		
No.	Sigla	Descrição Simplificada	No.	Sigla	Descrição Simplificada
1	ArrozTr	Arroz, trigo e outros cereais	1	Agric	Agricultura
2	Milho	Milho em grão	2	Pecua	Pecuária
3	Soja	Soja em grão	3	FlorAq	Exploração florestal e silvicultura
4	OtLav	Outras lavouras agrícolas	4	PetroG	Petróleo e gás
5	Pecu	Pecuária	5	MinFerr	Minério de ferro
6	FlorAq	Exploração florestal e silvicultura	6	OutExtr	Outros produtos da extrativa
7	CarvaoM	Carvão mineral	7	Carne	Abate e produtos de carne
8	PetroGa	Petróleo e gás natural	8	Acucar	Refino de açúcar
9	MinFerr	Minério de ferro	9	OtAlim	Outros alimentos
10	OutExtr	Outros produtos da extrativa	10	Bebida	Bebidas
11	Carne	Abate e produtos de carne	11	Fumo	Fumo
12	OtAlim	Outros produtos alimentares	12	TexVesCal	Têxteis, Vestuário e couro
13	Acucar	Açúcar	13	PdMadei	Têxteis, Vestuário e couro
14	OleoVeA	Óleos e gorduras vegetais e animais	14	CeluPap	Celulose e papel
15	PdTrigo	Derivados do trigo, mandioca ou milho	15	ImpRep	Impressão e gravações
16	Bebidas	Bebidas	16	RfPetro	Refino de petróleo
17	PdFumo	Produtos do fumo	17	Biocom	Biocombustíveis
18	TexVesCal	Têxteis, Vestuário e couro	18	Quimico	Produtos químicos
19	PdMadei	Produtos de madeira	19	DefAgric	Defensivos, tintas e químicos diversos
20	Celulos	Celulose	20	PerfFarm	Perfumaria, higiene e farmacêuticos
21	PapelImp	Papel e impressão	21	BoPlast	Borracha e plástico
22	CombAvi	Combustíveis para aviação	22	PMnMeta	Minerais não metálicos
23	GasAlco	Gasoálcool	23	PAcoDer	Ferro gusa/ferroligas e aço
24	NaftPet	Naftas para petroquímica	24	MetNFerr	Metais não ferrosos e fundição de metais
25	OleoCom	Óleo combustível	25	PMetal	Produtos de metal, exceto máquinas
26	DieselB	Diesel - biodiesel	26	EletEtron	Eletroeletrônica
27	OtRefPe	Outros produtos do refino do petróleo	27	MaqEq	Máquinas e equipamentos mecânicos

28	EtanolB	Etanol e outros biocombustíveis	28	AutoUt	Automóveis, caminhões e ônibus
29	QuimIno	Químicos inorgânicos	29	PecVeic	Peças para veículos automotores
30	AduboFe	Adubos e fertilizantes	30	OtEqTra	Outros equipamentos de transporte
31	QuimOrg	Químicos orgânicos	31	IndDiv	Móveis e indústrias diversas
32	QuimDiv	Químicos diversos	32	SIUP	Serviços Industriais de Utilidade Pública
33	TintasV	Tintas e vernizes	33	Constr	Construção
34	PerfFarm	Perfumaria, higiene e farmacêuticos	34	Comerc	Comércio por atacado e varejo

continua

Produtos			Setores econômicos		
No.	Sigla	Descrição Simplificada	No.	Sigla	Descrição Simplificada
35	BoPlast	Borracha e plástico	35	EFC	Estrada de Ferro Carajás
36	Cimento	Cimento	36	EFPO	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
37	ArtCimG	Artefatos de cimento e gesso	37	EFVM	Estrada de Ferro Vitória Minas
38	VidroNM	Vidros, cerâmicos e minerais não metálicos	38	FCA	Ferrovia Centro Atlântica
39	FerroGu	Ferro gusa e ferroligas	39	FNSTN	Ferrovia Norte-Sul
40	SemiAco	Semi acabados, laminados e tubos de aço	40	FTC	Ferrovia Tereza Cristina
41	MetaluMnF	Metalurgia de metais não ferrosos	41	FTL	Transnordestina Logística
42	FunAcoMnF	Peças fundidas de aço e de metais não ferrosos	42	MRS	MRS Logística
43	PdMetal	Produtos de metal	43	RMN	América Latina Logística Malha Norte
44	EletEtron	Eletroeletrônica	44	RMO	América Latina Logística Malha Oeste
45	MaqEq	Máquinas e equipamentos mecânicos, exceto serviços	45	RMP	América Latina Logística Malha Paulista
46	AutoUtil	Automóveis, camionetas e utilitários	46	RMS	América Latina Logística Malha Sul
47	CamOnib	Caminhões e ônibus	47	OutTTerr	Outros Transportes terrestres
48	PcVeiAut	Peças e acessórios automotores	48	Aquav	Transporte aquaviário
49	Aeronave	Aeronaves e equipamentos de transporte	49	Aereo	Transporte aéreo
50	IndDiv	Indústrias diversas	50	ArmAuxT	Armazenamento e auxiliares dos transportes
51	SIUP	Serviços Industriais de Utilidade Pública	51	AdmPub	Serviços da administração pública
52	Constr	Construção Civil	52	ServDiv	Serviços diversos
53	Comercio	Comércio por atacado e varejo			
54	EFC	Estrada de Ferro Carajás			
55	EFPO	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.			
56	EFVM	Estrada de Ferro Vitória Minas			
57	FCA	Ferrovia Centro Atlântica			
58	FNSTN	Ferrovia Norte-Sul			
59	FTC	Ferrovia Tereza Cristina			
60	FTL	Transnordestina Logística			
61	MRS	MRS Logística			
62	RMN	América Latina Logística Malha Norte			
63	RMO	América Latina Logística Malha Oeste			
64	RMP	América Latina Logística Malha Paulista			
65	RMS	América Latina Logística Malha Sul			
66	TTRodo	Transporte rodoviário de carga			
67	TTDuto	Transporte dutoviário			
68	TTPass	Transporte terrestre de passageiros			
69	TAqua	Transporte aquaviário			
70	TAereo	Transporte aéreo			
71	ArmAuxCo	Armazéns, correio e outras atividades de transportes			
72	AdmPub	Serviços da administração pública			
73	ServDiv	Serviços diversos			

Fonte: elaboração própria.

Adicionalmente, alguns mappings foram feitos na estrutura matemática do modelo a fim de capturar soluções de variáveis para agregações dos 73 produtos e 52 setores econômicos. O primeiro deles é harmonização entre os 73 produtos por 7 tipos de acondicionamento de carga em referência ao Plano Nacional de Logística, PNL 2035 (BRASIL, 2021), quais sejam: Graneis Sólidos Agrícolas (GSA), Outros Graneis Sólidos Minerais (OGSM), Graneis Sólidos Minerais (GSM), Graneis Sólidos e Líquidos Agrícolas (GSLA), Cargas Gerais Não Containerizáveis (CGNC), Graneis Líquidos (GL) e Cargas Gerais Containerizáveis (CGC). Já os 52 setores econômicos foram associados em dois mappings: (1) Agropecuária (AgroPec), Indústria (Ind) e Serviços (Serv); (2) Agropecuária (Agropec), Indústria da Extrativa (IndExt), Indústria de Transformação (IndT), Serviços Industrias de Utilidade Pública (SIUP), Construção civil (ConstCivil), Comércio (Comeercio), Transporte terrestre de carga (TFerroC), Outros transportes terrestres (OutTTerr), Transporte Aquaviário (Aquav), Transporte aéreo (Aereo), Armazenagem e atividades auxiliares de transporte (ArmAuxT) e Outros Serviços (OutSev).

Além da calibragem dos coeficientes, o modelo BIM-T necessita de uma série de parâmetros comportamentais, definidos nas formas funcionais do sistema de equações linearizados. São estimativas similarmente aplicadas em Betarelli Junior (2013). Ou melhor, as elasticidades de Armington, referentes à substituição entre origens domésticas e importadas, fazem parte desse conjunto. São diferenciadas por produto, mas não por categoria de uso: intermediário, investimento e consumo de famílias. Os valores dessas elasticidades foram calibrados com base no trabalho de Tourinho *et al.*, (2007), informações mais recentes na literatura. Já a elasticidade de substituição entre os fatores primários e a elasticidade-preço das exportações dos bens tradicionais foram calibradas conforme as estimativas econométricas e adotadas no modelo SPARTA (DOMINGUES, 2002) e no *Modelo de Equilíbrio Geral Computável Multi-Regional*, TERM-CEDEPLAR (DOMINGUES *et al.*, 2007). Na demanda das famílias, por sua vez, o parâmetro de FRISCH como -1,94, conforme as estimativas de Almeida (2011). Para a elasticidade de gastos na estrutura teórica das famílias, os valores utilizados são os das estimativas de Hoffman (2010). Ademais, o modelo foi calibrado com um estado estacionário de 2,2%, sustentado por uma taxa de depreciação do capital na ordem de 3,8%. Se o estoque do capital adicionado cresce por hipótese 2,2% com uma taxa de depreciação de 3,8%, então a razão entre investimento e capital é de 6% e a taxa de retorno, normal e esperada, para todos os setores será de 13,6% (BETARELLI JUNIOR, 2022).

3.2.1 Usos e custos de diesel pelos concessionários ferroviários

A estrutura de custos do transporte ferroviário de carga no Brasil é definida por um conjunto de despesas que se distribuem entre elementos fixos e variáveis, refletindo as especificidades de um setor caracterizado simultaneamente por alta intensidade de capital e forte dependência de insumos energéticos. Entre os principais componentes de custo figuram as despesas com combustíveis e lubrificantes, custos de pessoal e de manutenção, investimentos em material rodante e infraestrutura, despesas administrativas e de gestão, bem como encargos contratuais e regulatórios. No interior dessa estrutura, destaca-se a categoria de combustíveis e lubrificantes, que constitui o insumo energético essencial para a tração ferroviária, representa parcela significativa dos custos variáveis totais e apresenta elevada sensibilidade a fatores técnicos e operacionais, tais como topografia das rotas, idade média das locomotivas, perfis logísticos e volume transportado. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018) e a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2021), os custos do transporte ferroviário são fortemente influenciados pelo consumo de combustível, manutenção de material rodante e infraestrutura, além de despesas administrativas e regulatórias, refletindo a elevada intensidade de capital do setor.

Os custos fixos são compostos por despesas diretamente relacionadas à posse ou contratualização da infraestrutura ferroviária, incluindo arrendamentos, concessões, seguros, depreciação de ativos e contratos de manutenção de longo prazo. Esses elementos mantêm relativa estabilidade mesmo em contextos de oscilação na demanda de transporte. Em contraste, os custos variáveis correspondem a insumos que se ajustam à intensidade da operação, tais como combustíveis, lubrificantes, materiais de desgaste, peças de reposição, mão de obra operacional e serviços eventuais de manutenção. No âmbito das concessionárias ferroviárias brasileiras, os combustíveis e lubrificantes assumem papel central como principal componente variável, servindo não apenas como indicador direto de desempenho operacional, mas também como determinante da competitividade modal frente ao transporte rodoviário e da magnitude das emissões associadas à atividade.

A base empírica utilizada nesta investigação foi construída a partir de dados oficiais da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), complementados por informações financeiras e operacionais disponibilizadas diretamente pelas concessionárias ferroviárias ou por meio de

relatórios de acesso público. O período de análise compreende os anos de 2015 a 2020 e envolve as seguintes concessionárias de transporte de carga: Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), Ferrovia Norte-Sul Tramo Norte (FNSTN), FTC S.A., MRS Logística, Rumo Logística, Vale – Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e Vale – Estrada de Ferro Carajás (EFC). Para cada uma dessas operadoras e em cada exercício anual, foram extraídas três variáveis centrais: Toneladas Úteis (TU), que representa o volume de carga efetivamente transportada; Toneladas-Quilômetro Úteis (TKU), correspondente ao produto entre massa transportada e distância percorrida; e o custo anual associado ao consumo de combustíveis e lubrificantes, expresso em reais correntes e vinculado à operação de locomotivas.

Com vistas a assegurar a comparabilidade com os valores da Matriz de Insumo-Produto (MIP 2015), que fundamenta o modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC), todos os valores monetários foram deflacionados para preços de 2015, utilizando o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Nos casos em que as demonstrações financeiras das concessionárias reportadas à ANTT não incluíam valores monetários explícitos relativos a combustíveis — como ocorreu nas concessionárias Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO) e Ferrovia Tereza Cristina (FTL) — os dispêndios anuais foram estimados indiretamente com base no consumo físico de diesel e no preço médio anual do óleo diesel S500, informado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Nesses casos, a estimação dos custos seguiu a seguinte expressão:

$$C_{diesel} = Q_{diesel} \cdot P_{diesel} \quad (09)$$

em que C_{diesel} representa o custo estimado com diesel, expresso em reais; Q_{diesel} corresponde ao consumo total de diesel, medido em litros; e P_{diesel} indica o preço médio anual do diesel, expresso em reais por litro.

Os preços médios anuais empregados na estimação foram obtidos diretamente junto à ANP e correspondem aos seguintes valores para o óleo diesel S500 (preço de revenda ao consumidor): R\$ 2,81/L (2015), R\$ 3,02/L (2016), R\$ 3,07/L (2017), R\$ 3,49/L (2018), R\$ 3,60/L (2019), e R\$ 3,30/L (2020).

Para a estimação do consumo físico total de diesel, utilizou-se o indicador de eficiência energética disponibilizado nos Anuários Estatísticos da ANTT, expresso em litros de diesel por mil toneladas-quilômetro úteis (L/mil TKU). Assim, o consumo total anual de diesel foi estimado da seguinte forma:

$$Q_{diesel} = TKU \cdot 1000 \cdot CE \quad (10)$$

em que Q_{diesel} corresponde ao consumo total de diesel, expresso em litros; TKU representa a quantidade total transportada em toneladas-quilômetro útil, considerada em milhões; e CE indica o consumo específico, expresso em litros por mil TKU. Essa metodologia permitiu derivar medições consistentes do consumo físico e dos dispêndios monetários com combustíveis, independentemente da profundidade ou disponibilidade das demonstrações financeiras públicas por parte das concessionárias. Como resultado, foi possível consolidar uma base unificada de consumo energético físico (litros de diesel) e de custo monetário associado (valores em reais de 2015), contemplando todas as operadoras ferroviárias de carga em atuação entre 2015 e 2020.

Essa base integrada viabiliza a comparação do desempenho energético entre concessionárias e ao longo do tempo, revelando heterogeneidades estruturais vinculadas à configuração das malhas ferroviárias, ao perfil da frota, ao tipo de carga movimentada e a outras características operacionais. Entre os anos de 2015 e 2018, observou-se uma tendência de elevação gradual dos dispêndios energéticos, resultante da combinação entre aumento do preço do diesel e crescimento moderado da produção ferroviária. Nos anos subsequentes (2019 e 2020), registrou-se estabilização e leve regressão dos custos energéticos, em linha com o arrefecimento conjuntural da economia brasileira e com iniciativas internas de eficiência energética implementadas por algumas operadoras, como substituição de locomotivas mais antigas, ajustes operacionais e otimização de composições.

Nesse contexto, a integração entre dados físicos e monetários permitiu a construção de um indicador de custo energético unitário, definido como:

$$EE_{it} = \frac{C_{it}^E}{TKU_{it}} \quad (11)$$

em que EE_{it} representa o custo energético unitário (em R\$/TKU) da concessionária i no ano t ; C_{it}^E corresponde ao gasto anual com combustíveis e lubrificantes; e TKU_{it} indica o volume total de carga transportada ponderado pela distância percorrida.

Trata-se de uma medida direta de desempenho energético no modal ferroviário, pois expressa o dispêndio monetário necessário para movimentar uma unidade de carga útil por quilômetro. Valores mais baixos desse indicador refletem maior eficiência energética, podendo decorrer de menor consumo físico por unidade de atividade ou de condições favoráveis de preço e operação. Por outro lado, valores mais altos indicam maior exigência energética, seja por fatores técnicos, locacionais ou gerenciais.

Com base na estrutura de custos e nos indicadores energéticos definidos na subseção anterior, esta etapa metodológica estabelece as trajetórias prospectivas de eficiência energética ferroviária utilizadas nas simulações do modelo de Equilíbrio Geral Computável. O objetivo é traduzir a evidência empírica observada no período recente em hipóteses quantitativas consistentes, evitando a adoção de parâmetros arbitrários.

A evolução da eficiência energética ao longo do tempo foi analisada a partir do fator energético físico, definido como o consumo específico de diesel por unidade de atividade (litros por mil TKU), conforme reportado nos Anuários Estatísticos da ANTT e estimado para os casos com dados incompletos. Para cada concessionária c , a variação intertemporal desse indicador entre 2015 e 2020 foi sintetizada por meio da taxa média anual composta (Compound Annual Growth Rate – CAGR), dada por:

$$CAGR_c = \left(\frac{F_{c,2020}}{F_{c,2015}} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 \quad (12)$$

em que $F_{c,2015}$ e $F_{c,2020}$ representam, respectivamente, o fator energético no início e no final do período, e o expoente $\frac{1}{5}$ corresponde ao número de intervalos anuais considerados. O CAGR expressa, portanto, a taxa anual equivalente de variação da eficiência energética, abstraindo flutuações conjunturais de curto prazo e permitindo a comparação entre concessionárias com trajetórias distintas.

A aplicação desse procedimento revelou elevada heterogeneidade nos resultados. Ferrovias maduras apresentaram reduções moderadas do fator energético, tipicamente entre -1% e $-3,6\%$ ao ano, enquanto determinadas malhas passaram por ganhos excepcionalmente elevados, associados a processos de reestruturação operacional, aumento de escala e renovação acelerada da frota. Em contraste, observam-se casos pontuais de estagnação ou deterioração da eficiência, vinculados a restrições operacionais e a perfis específicos de demanda.

Para fins prospectivos, no entanto, é importante distinguir entre trajetórias estruturais sustentáveis e variações transitórias associadas a choques específicos. Ganhos muito elevados de eficiência, observados em fases de turnaround ou catch-up operacional, tendem a refletir a correção de ineficiências iniciais e não constituem, em geral, ritmos passíveis de manutenção no longo prazo. De modo análogo, episódios isolados de deterioração não caracterizam necessariamente a tendência estrutural do setor.

Dessa forma, a definição dos cenários baseia-se na distribuição central dos CAGRs observados, após a exclusão de valores extremos. No conjunto resultante, obtiveram-se as seguintes estatísticas descritivas:

- média dos CAGRs: aproximadamente $-2,05\%$ ao ano;
- mediana: aproximadamente $-2,4\%$ ao ano;
- desvio padrão: cerca de 1,07 ponto percentual.

Esses parâmetros sintetizam o comportamento típico do setor ferroviário brasileiro no período analisado e fornecem a base quantitativa para a construção dos cenários. Considerando a distribuição empírica dos CAGRs e a presença de retornos decrescentes de eficiência em sistemas de transporte intensivos em capital, optou-se por trabalhar com dois cenários prospectivos: um cenário base e um cenário otimista.

O cenário base representa a trajetória mais provável de longo prazo, caracterizada pela continuidade de melhorias incrementais decorrentes de ajustes operacionais, manutenção da frota e aperfeiçoamento logístico, sem a ocorrência de rupturas tecnológicas. Numericamente, esse cenário foi definido a partir da média empírica ajustada para maturidade operacional,

aplicando-se um deslocamento conservador equivalente a cerca de 1 ponto percentual em relação à média observada:

$$CAGR_{\text{base}} \approx -2,05\% + 1,0\% \approx -1,5\% \text{ ao ano}$$

Esse valor situa-se no interior do intervalo historicamente observado para ferrovias maduras e evita a extrapolação de ganhos associados a eventos extraordinários.

O cenário otimista reflete a difusão sistemática das melhores práticas já observadas no setor, incluindo maior utilização de sistemas de condução assistida, otimização de composições, planejamento energético mais eficiente e renovação gradual do material rodante. Esse cenário foi definido com base no limite superior sustentável da distribuição empírica, representado aproximadamente pelo percentil inferior (p25) dos CAGRs após a exclusão de valores extremos, resultando em uma taxa anual de:

$$CAGR_{\text{otimista}} \approx -3,0\% \text{ ao ano}$$

Tal valor é compatível com os melhores desempenhos históricos observados em ferrovias maduras, mas permanece significativamente inferior aos ganhos extremos associados a fases transitórias de reestruturação.

As duas trajetórias de eficiência energética definidas nesta seção serão consideradas como choque de política no modelo BIM-T a fim de capturar a mudança na intensidade energética do transporte ferroviário, afetando diretamente o consumo de combustíveis, os custos operacionais e, conseqüentemente, as emissões associadas ao modal. Essa abordagem permite avaliar, de forma contrafactual, os impactos econômicos, energéticos e ambientais decorrentes de diferentes cenários prospectivos sobre a trajetória de melhoria da eficiência energética dos concessionários ferroviários para a economia brasileira.

4. ANÁLISE DE POLÍTICA E PROJEÇÕES

Em modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) dinâmicos recursivos, a solução do sistema ocorre de forma sequencial ao longo de um horizonte temporal previamente definido, o que exige a especificação de dois ambientes distintos de fechamento: um fechamento de referência (baseline) e um fechamento de política. O fechamento de baseline tem como objetivo projetar, de forma consistente, a trajetória provável da economia brasileira ao longo do período de análise, incorporando tanto informações observadas quanto hipóteses prospectivas, sem a introdução de choques associados à política analisada. Trata-se, portanto, de um cenário de *business-as-usual*, que representa a evolução contrafactual da economia na ausência de intervenções adicionais relacionadas à eficiência energética no setor ferroviário de carga.

O objetivo do baseline consiste em fornecer um caminho de controle a partir do qual os desvios provocados por choques de política podem ser corretamente identificados e interpretados. Assim, os impactos de política são mensurados como diferenças entre o cenário com intervenção e o cenário de referência, refletindo como a economia teria evoluído caso a política em questão não tivesse sido implementada (Dixon & Rimmer, 2002; Betarelli Júnior, 2013; Magalhães, 2013).

No ambiente econômico do baseline, as principais variáveis macroeconômicas: produto interno bruto real, investimento agregado, consumo das famílias, consumo do governo, volume de exportações e emprego nacional, são tratadas como exógenas, de modo a acomodar as variações observadas no período histórico recente (2016–2024) e as hipóteses prospectivas adotadas para o horizonte de projeção (2025–2040). Operacionalmente, essa estratégia requer a troca de variáveis endógenas por variáveis correspondentes no fechamento do modelo. Por exemplo, o PIB real passa a ser determinado exogenamente, enquanto variáveis como a produtividade total dos fatores (PTF) nacional ou componentes da demanda final tornam-se endógenas, garantindo a coerência contábil e macroeconômica do sistema.

As variações observadas dos principais indicadores macroeconômicos entre 2016 e 2024 são extraídas do Sistema de Contas Nacionais (SCN) e do Sistema de Contas Nacionais Trimestrais (SCNT) do IBGE, enquanto a evolução do emprego nacional acompanha as informações da PNAD e do SCN. Para a dinâmica demográfica, combina-se a série observada com as projeções populacionais oficiais do IBGE, que se estendem até 2070. Essas informações são sintetizadas

na Tabela 5, que atualiza a estrutura numérica do modelo e serve de base para a implementação dos choques prospectivos a partir de 2027.

Tabela 5 – Variações reais (%) dos principais indicadores econômicos para o cenário de baseline (2016 – 2040)

Indicadores	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 - 2040 (var. anual)
PIB brasileiro	-3,3	1,3	1,8	1,2	-3,3	4,8	3,0	3,2	3,3	2,2
Consumo das famílias	-3,8	2,0	2,4	2,6	-4,6	3,0	4,2	3,2	5,1	-
Consumo do governo	0,2	-0,7	0,8	-0,4	-3,7	3,5	2,1	3,8	2,1	2,2
Exportações	0,9	4,9	4,1	-2,6	-2,3	4,4	5,7	8,9	4,1	-
Investimentos	-12,1	-2,6	5,2	4,0	-1,8	12,9	1,1	-3,0	6,6	-
Emprego Nacional	-1,6	1,3	2,7	1,6	-6,4	5,9	3,8	1,6	2,8	-
População	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,2

Fonte: elaboração própria a partir de IBGE (2015, 2022a, 2025a, 2025b, 2025c).

Nota: "-" representa variação endógena do baseline.

Entre 2025 e 2040, assume-se que o PIB brasileiro cresce à taxa anual de 2,2%, compatível com uma trajetória de estado estacionário da economia nacional. O consumo do governo acompanha essa mesma taxa de crescimento, enquanto a população evolui a uma taxa média anual de 0,2%. A partir de 2025, as demais variáveis macroeconômicas passam a ser determinadas endogenamente pelo modelo, com as exportações respondendo às variações nos preços relativos, sob uma taxa de câmbio fixada como numerário, e o consumo das famílias ajustando-se à renda agregada endógena.

O fechamento de política preserva as hipóteses macroeconômicas do baseline, diferenciando-se exclusivamente pela introdução de choques exógenos associados à eficiência energética dos concessionários ferroviários de carga. São considerados dois cenários prospectivos:

- a) Cenário regular: um cenário de ganho anual de eficiência energética de 1,5%, aplicado de forma contínua ao longo do período de 2025 a 2040, com base no comportamento histórico das principais concessionárias ferroviárias;

- b) Cenário otimista: um cenário de ganho anual de eficiência energética de 3%, igualmente aplicado de forma contínua ao longo do período de 2025 a 2040, representando uma intensificação dos mesmos mecanismos econômicos e operacionais.

A adoção desses dois cenários permite avaliar como ganhos acumulativos de eficiência energética se traduzem, ao longo do tempo, em efeitos macroeconômicos, intersetoriais e intrasetoriais, afetando diretamente o consumo de combustíveis, os custos operacionais e as emissões associadas à prestação do serviço ferroviário.

No modelo utilizado nesta dissertação, a demanda de insumos para a formação de capital de cada setor econômico exibe uma estrutura aninhada. No primeiro nível a demanda de cada composto de insumos ($X_{c,s,i}^1$) ocorre em proporções fixas (Leontief) para acomodar a produção de cada setor (Z_i):

$$\min \left\{ \frac{X_{c,s,i}^1}{AX_{c,s,i}^1} \right\} = Z_i \quad (13)$$

em que $X_{c,s,i}^1$ representa a demanda do insumo c de origem doméstica ou importada (s) pelo setor produtivo i , ao passo que Z_i corresponde a oferta do setor i e $AX_{c,s,i}^1$ é um termo de eficiência de utilização dos insumos, de maneira que ele altera a relação técnica de requerimento de insumos para cada unidade produzida pelo setor econômico i . A equação é linearizada na estrutura teórica do modelo e cada termo dela possui uma variável correspondente. Dessa maneira, a demanda de cada insumo na sua forma percentual torna-se:

$$x_{c,s,i}^1 - ax_{c,s,i}^1 = z_i \quad (14)$$

Ou,

$$x_{c,s,i}^1 = z_i + ax_{c,s,i}^1 \quad (15)$$

No fechamento de política, a variável percentual de eficiência produtiva, $ax_{c,s,i}^2$, é exógena nos fechamentos de baseline e política. Tal variável ($ax_{c,s,i}^2$) é utilizada para os choques de eficiência no uso de diesel e outros combustíveis (outros produtos do refino de petróleo) de origem doméstica pelos concessionários ferroviários conforme variações percentuais definidas nos dois

cenários prospectivos dessa dissertação. Na base de dados do modelo, inexistia a importação de diesel. A equação (11) sinaliza que variações positivas de eficiência no uso de insumo intermediário de um determinado setor representam choques negativos em $ax_{c,s,i}^1$, uma vez que menos insumo é requerido em relação à produção. Ou seja, o aumento da eficiência produtiva denota, pois, um choque negativo em $ax_{c,s,i}^1$ de maneira que a relação técnica entre o insumo e a produção diminui. Assim, os cenários simulados incorporam reduções estruturais no consumo energético por unidade ofertada do serviço ferroviário.

É importante destacar que os ganhos de eficiência energética considerados nesta dissertação não pressupõem a adoção de tecnologias disruptivas nem a substituição da matriz energética ferroviária. Eles refletem, sobretudo, melhorias operacionais, gerenciais e administrativas amplamente documentadas no setor, tais como otimização da condução de trens, gestão mais eficiente do tráfego e do carregamento, manutenção preventiva e preditiva de locomotivas, padronização operacional, uso intensivo de indicadores de desempenho energético (como litros por TKU), além de investimentos incrementais em treinamento de maquinistas, sistemas de apoio à decisão e gestão integrada de ativos.

Embora essas práticas possam envolver custos de implementação, tais custos não são explicitamente modelados neste exercício. Essa escolha metodológica é justificada pelo fato de que grande parte dessas ações ocorre de forma gradual e contínua no interior das concessionárias, sendo frequentemente internalizada como parte das rotinas de gestão, dos contratos de concessão e das estratégias de redução de custos operacionais. Assim, os ganhos de eficiência energética são interpretados como resultado de processos cumulativos de aprendizagem organizacional, racionalização operacional e aprimoramento gerencial, compatíveis com a dinâmica observada no setor ferroviário brasileiro.

Dessa forma, a modelagem adotada permite capturar os efeitos econômicos e ambientais associados a trajetórias realistas de eficiência energética, sem superestimar rupturas tecnológicas nem subestimar o papel central das práticas gerenciais e administrativas na melhoria do desempenho energético das concessionárias ferroviárias.

Dessa forma, os choques de eficiência energética são operacionalizados no modelo como alterações exógenas nos parâmetros de eficiência técnica associados ao uso de insumos

energéticos intermediários no setor ferroviário de carga. Esses choques reduzem estruturalmente o consumo de diesel e de outros derivados do refino de petróleo por unidade de serviço ferroviário ofertado, sem pressupor mudanças tecnológicas disruptivas ou substituição da matriz energética vigente.

A interpretação econômica desses choques está ancorada em melhorias operacionais, gerenciais e administrativas amplamente observadas nas concessionárias ferroviárias brasileiras, tais como racionalização da condução de trens, otimização da gestão de tráfego e carregamento, manutenção preditiva de locomotivas, padronização operacional e uso sistemático de indicadores de desempenho energético. Embora tais práticas possam envolver custos de implementação, estes não são explicitamente modelados, uma vez que, na prática, tendem a ser incorporados de forma gradual às rotinas operacionais e às estratégias de redução de custos das empresas concessionárias.

A partir desse arranjo de modelagem, os choques de eficiência energética afetam diretamente a função de produção do setor ferroviário, reduzindo seus custos unitários e alterando seus preços relativos. Indiretamente, esses efeitos se propagam para o restante da economia por meio das interligações produtivas, dos mercados de fatores e dos fluxos de comércio, ativando os canais clássicos de transmissão associados à eficiência energética: expansão da atividade econômica, realocação de fatores produtivos, estímulo ao investimento e redução das emissões associadas ao consumo de combustíveis fósseis.

4.1 Resultados

Esta seção apresenta a análise dos resultados dos cenários prospectivos de eficiência energética aplicados ao transporte ferroviário de carga no Brasil, com ênfase nos efeitos observados no equilíbrio de longo prazo em 2040. Embora o choque seja introduzido diretamente no setor ferroviário, seus efeitos não se restringem a esse segmento. Ao reduzir o consumo específico de diesel por unidade de serviço, a política altera a estrutura de custos do transporte ferroviário e, por consequência, os preços relativos da economia. A partir dessa alteração inicial, o ajustamento ocorre endogenamente, envolvendo decisões interdependentes de produção, uso de insumos intermediários, substituição entre fatores primários, investimento, formação de capital e interações com o setor externo.

Nesse contexto, as projeções econômicas geradas por um modelo de Equilíbrio Geral Computável incorporam múltiplos mecanismos de transmissão e produzem efeitos diferenciados entre mercados, atividades e agentes econômicos. Essas diferenças decorrem das assimetrias existentes nas estruturas de custos e de demanda das atividades, bem como das regras comportamentais e das possibilidades de substituição incorporadas na especificação teórica do modelo. Parte central desse processo está associada às mudanças nos preços relativos, que coordenam a realocação de recursos e a recomposição das decisões produtivas. Em razão desse conjunto de interações, os efeitos econômicos observados não são proporcionais ao tamanho do choque de política introduzido em cada período, refletindo a presença simultânea de efeitos diretos, indiretos e dinâmicos ao longo do sistema econômico.

A compressão dos custos operacionais do transporte ferroviário se traduz, no equilíbrio, em redução do custo marginal de oferta do serviço e, conseqüentemente, em pressão de queda sobre o preço do frete ferroviário. Com isso, o serviço ferroviário torna-se relativamente mais barato, tanto em comparação com outros modais de transporte quanto em relação a insumos alternativos utilizados nos processos produtivos. Essa reprecificação constitui o principal canal de transmissão inicial do choque.

A redução do preço do frete ferroviário repercute sobre os setores usuários do modal. Cadeias produtivas com elevada intensidade logística passam a operar com custos menores, deslocando suas condições de oferta e ampliando sua competitividade. Em termos econômicos, a eficiência energética ferroviária equivale a um ganho indireto de produtividade nesses setores, cuja magnitude depende da intensidade com que cada atividade incorpora serviços ferroviários, de forma direta ou indireta. Assim, atividades mais expostas ao custo de transporte tendem a apresentar respostas relativamente mais intensas em produção, valor agregado e inserção comercial, enquanto setores menos conectados ao modal exibem reações mais moderadas.

Esses deslocamentos setoriais reordenam a demanda por fatores de produção. As atividades favorecidas ampliam a absorção de trabalho e capital, enquanto setores que perdem participação relativa liberam fatores. O resultado agregado emerge da composição desses movimentos, com fatores sendo realocados em direção às atividades que passam a operar com maior eficiência de custos e melhor posição competitiva. As remunerações fatoriais refletem esse arranjo, combinando o efeito associado à redução de custos unitários com a expansão da atividade econômica.

A resposta do investimento decorre das alterações nas taxas de retorno setoriais. Ao reduzir custos e ampliar margens em atividades beneficiadas, o choque eleva sua atratividade relativa e direciona investimento para esses segmentos. Como o capital se acumula com defasagem, o aumento do investimento amplia gradualmente o estoque de capital produtivo, reforçando a capacidade de oferta e consolidando os efeitos de longo prazo sobre produto e renda.

No setor externo, o menor custo logístico interno afeta simultaneamente exportações e importações. Em atividades com maior orientação exportadora e elevada dependência de transporte, o frete ferroviário mais barato melhora a competitividade externa e favorece a expansão das quantidades exportadas. Em paralelo, a própria expansão da atividade e do investimento pode elevar a demanda por insumos e bens de capital importados. Assim, o comportamento da balança comercial e dos termos de troca resulta do equilíbrio entre esses vetores.

Os dois cenários avaliados preservam essa mesma lógica de ajustamento. A diferença reside na intensidade do impulso tecnológico: o cenário mais otimista aprofunda a compressão de custos, reforça a reprecificação relativa e amplia os efeitos de realocação produtiva, investimento e expansão de escala, produzindo uma reorganização mais pronunciada tanto no interior do setor ferroviário quanto na estrutura produtiva agregada.

À luz dessa dinâmica, os resultados são apresentados em três níveis complementares: (i) intrassetorial, examinando a resposta das concessionárias ferroviárias; (ii) intersetorial, analisando os efeitos sobre produtos e setores; e (iii) macroeconômico, sintetizando impactos sobre produto, preços, fatores e setor externo. A análise inicia-se pelo nível intrassetorial, no qual os mecanismos de transmissão do choque aparecem de forma direta, conforme apresentado na Tabelas 6, a seguir.

Tabela 6 – Resultados intrassetoriais das concessionárias ferroviárias no cenário de eficiência energética de 1,5% a.a. (2040)

Empresa ferroviária	Diesel (mil m ³)	CO ₂ e (mil t)	TKU (milhões)	Investimento (var.%)	Nível de atividade (var.%)	Taxa de Retorno Esperada (var.%)	Preço (var.%)
EFC	- 61.481,4	- 179.147,0	1,65	0,59	0,25	0,11	-1,97
EFPO	- 318,3	- 927,5	0,08	0,12	0,05	0,02	-4,47
EFVM	- 57.971,3	- 168.917,0	9,87	0,48	0,20	0,09	-3,09
FCA	- 41.936,0	- 122.194,0	5,23	0,12	0,05	0,02	-4,60
FNSTN	- 3.824,9	- 11.144,8	0,43	-0,05	-0,04	-0,01	-1,96
FTC	- 560,6	- 1.633,5	0,28	0,12	0,04	0,02	-1,70
FTL	- 1.855,0	- 5.405,1	-0,97	-0,05	-0,04	-0,01	-3,99
MRS	- 70.198,6	- 204.546,0	41,28	0,31	0,13	0,05	-3,33
RMN	- 45.925,7	- 133.819,0	12,95	0,12	0,05	0,02	-3,23
RMO	- 5.201,3	- 15.155,5	0,09	0,18	0,08	0,03	-3,04
RMP	- 5.921,9	- 17.255,1	-8,16	-0,22	-0,12	-0,03	-3,37
RMS	- 29.282,0	- 85.321,4	-0,08	0,83	0,38	0,14	-3,70
Total	-324.476,94	- 945.465,90	62,64	0,30	0,08	0,04	-3,20

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline). Para as variáveis Nível de atividade, Taxa de Retorno Esperada e Preço, os valores apresentados na linha Total correspondem à média simples entre as empresas ferroviárias.

Fonte: Resultados da pesquisa.

No cenário regular de ganho anual de eficiência energética, observa-se, no interior do setor ferroviário de carga, uma sequência encadeada de ajustes econômicos. A redução do consumo específico de diesel e lubrificantes diminui diretamente os custos operacionais das concessionárias; parte dessa redução é repassada aos preços do frete ferroviário; a reprecificação do serviço altera as condições de demanda; e, no longo prazo, o novo equilíbrio se materializa em mudanças de escala de produção (TKU), nível de atividade (valor agregado), rentabilidade (taxa de retorno) e acumulação de capital (investimento). Embora o choque de eficiência seja homogêneo em termos percentuais, os resultados diferem substancialmente entre concessionárias, refletindo heterogeneidades estruturais, como escala inicial de operação, composição da base de cargas atendidas, estrutura de custos e inserção nos corredores logísticos, que condicionam a forma pela qual cada empresa converte ganhos de eficiência operacional em desempenho econômico.

O primeiro componente desse ajuste é a economia física de diesel, que ocorre em todas as concessionárias, ainda que com magnitudes bastante distintas (Tabela 6). A MRS apresenta a maior redução absoluta (70,20 mil m³), seguida por EFC (61,48 mil m³) e EFVM (57,97 mil m³). RMN (45,93 mil m³) e FCA (41,94 mil m³) também registram economias expressivas, enquanto concessionárias de menor porte, como EFPO e FTC, apresentam reduções inferiores a 600 m³. Esse ordenamento indica que, sob um mesmo ganho percentual de eficiência, as economias absolutas se concentram nas empresas que operam com maior base inicial de consumo e maior escala de serviço.

Esse padrão se reproduz diretamente na variável ambiental: as reduções de emissões de CO₂ equivalente (CO₂e, em mil toneladas – tCO₂e) acompanham as economias de diesel observadas para cada concessionária (Tabela 6). A MRS reduz 204,55 mil tCO₂e, seguida por EFC (179,15 mil tCO₂e) e EFVM (168,92 mil tCO₂e), enquanto RMN e FCA também superam 120 mil tCO₂e de redução, reforçando que os ganhos ambientais absolutos são maiores nas concessionárias de maior escala.

Do ponto de vista agregado, esses resultados assumem magnitudes economicamente e ambientalmente relevantes quando dimensionados em relação ao cenário de referência. A redução total de 324.476,94 mil m³ de diesel corresponde a 20,16% do consumo projetado do setor ferroviário no baseline de 2040 (1.609.560 mil m³), indicando que o ganho de eficiência equivale, em termos físicos, à eliminação de aproximadamente um quinto da demanda energética do setor. Em termos operacionais, isso implica que uma variação de 100 mil m³ de diesel representa cerca de 6,21% do consumo total ferroviário projetado.

No plano ambiental, a redução de 945.465,90 mil tCO₂e corresponde a 8,40% das emissões totais do setor ferroviário no cenário de referência (11.258.445 mil tCO₂e), evidenciando que os ganhos de eficiência energética se traduzem em reduções expressivas, ainda que proporcionalmente inferiores às economias físicas de combustível. Quando comparado ao conjunto dos modais de transporte, entretanto, esse efeito assume menor magnitude relativa: a redução ferroviária equivale a aproximadamente 0,38% das emissões dos transportes terrestres não ferroviários, 5,48% das emissões do transporte aéreo e 91,2% do total do transporte aquaviário, refletindo o peso relativamente reduzido do modal ferroviário na matriz emissora agregada de transportes.

A partir desse ponto, o choque passa a se propagar por meio dos preços do frete ferroviário, que retraem em todas as concessionárias, ainda que com magnitudes distintas: FCA (-4,60%) e EFPO (-4,47%) apresentam as maiores reduções, seguidas por FTL (-3,99%), RMS (-3,70%), RMP (-3,37%) e MRS (-3,33%). Essas diferenças indicam que, embora todas se beneficiem da redução do consumo específico, o grau de repasse ao preço final não é uniforme entre empresas.

As variações de preço se traduzem em respostas distintas de demanda por serviços ferroviários, expressas pela variação do TKU por concessionária: MRS apresenta forte expansão de volume transportado (41,28 milhões de TKU), seguida por RMN (12,95 milhões de TKU), EFVM

(9,87 milhões de TKU) e FCA (5,23 milhões de TKU), enquanto EFC cresce de forma mais moderada (1,65 milhão de TKU). Em contraste, FTL registra retração (-0,97 milhão de TKU) e RMP apresenta contração expressiva (-8,16 milhões de TKU). Para compreender a origem dessas diferenças, é necessário observar como o ganho de eficiência energética afeta a composição dos fluxos transportados por grupos de mercadorias, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Efeito da política de eficiência energética sobre o TKU por grupos de mercadorias (milhões de TKU em 2040)

	Graneis Sólidos Agrícolas (GSA)	Outros Graneis Sólidos Minerais (OGSM)	Graneis Sólidos Minerais (GSM)	Graneis Sólidos e Líquidos Agrícolas (GSLA)	Cargas Gerais Não Containerizáveis (CGNC)	Graneis Líquidos (GL)	Cargas Gerais Containerizáveis (CGC)	Total
EFC	0,00	0,00	3,59	0,00	0,04	-0,15	0,00	3,48
EFPO	0,14	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,15
EFVM	0,00	4,88	14,18	0,00	0,20	-0,79	0,00	18,47
FCA	14,60	0,64	0,76	0,17	0,40	-6,41	0,05	10,21
FNSTN	4,48	0,00	0,01	0,01	0,06	-3,67	0,00	0,89
FTC	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54
FTL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	-2,02	0,00	-1,84
MRS	1,30	0,40	76,64	0,00	1,15	-0,36	0,03	79,16
RMN	25,12	0,00	0,00	0,30	0,02	-0,65	0,30	25,09
RMO	0,00	0,00	0,09	0,00	0,07	0,01	0,00	0,17
RMP	1,59	0,00	0,00	0,00	0,00	-17,12	0,05	-15,48
RMS	10,18	0,03	0,00	0,06	0,66	-11,14	0,31	0,09
Total	57,42	6,48	95,27	0,54	2,78	-42,29	0,74	120,09

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 7 mostra que a expansão do TKU se concentra fortemente nos graneis sólidos minerais (GSM), que registram aumento total de 95,27 milhões de TKU, enquanto os graneis líquidos (GL) apresentam retração agregada de 42,29 milhões de TKU. Os demais grupos exibem variações de menor magnitude, como crescimento moderado em graneis sólidos agrícolas e em cargas gerais não containerizáveis. Esse padrão indica que a política não gera um aumento homogêneo do transporte ferroviário para todos os tipos de carga, mas sim uma recomposição da estrutura de mercadorias transportadas, favorecendo segmentos minerais e reduzindo a participação relativa de cargas líquidas. Para identificar quais produtos específicos explicam esses movimentos por grupo, a Tabela 8 apresenta o efeito da política sobre o TKU desagregado por produto.

Tabela 8 - Efeito da política de eficiência energética sobre o TKU por produto (milhões de TKU em 2040)

	EFC	EFPO	EFVM	FCA	FNSTN	FTC	FTL	MRS	RMN	RMO	RMP	RMS	Total
Arroz, trigo e outros cereais	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,99
Milho em grão	0,00	0,00	0,00	5,94	1,51	0,00	0,00	0,00	16,29	0,00	0,00	2,82	26,56
Soja em grão	0,00	0,13	0,00	7,46	2,96	0,00	0,00	0,00	8,84	0,00	0,00	4,50	23,89
Carvão mineral	0,00	0,00	4,88	0,00	0,00	0,54	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	5,74
Minério de ferro	3,59	0,00	14,18	0,76	0,01	0,00	0,00	76,64	0,00	0,09	0,00	0,00	95,27
Outros produtos da extrativa	0,00	0,00	0,00	0,64	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72
Açúcar	0,00	0,00	0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	1,29	0,00	0,00	1,59	1,88	5,97
Óleos e gorduras vegetais e animais	0,00	0,00	0,00	0,17	0,01	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,06	0,54
Produtos de madeira	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
Celulose	0,00	0,00	0,02	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,00	0,00	0,16
Gasoálcool	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,01	0,02	0,25	0,51
Óleo combustível	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,06
Diesel - biodiesel	0,00	0,00	0,00	-5,64	-3,66	0,00	-1,98	-0,12	-0,85	0,00	-17,13	-11,37	-40,76
Outros produtos do refino do petróleo	-0,15	0,00	-0,79	-0,79	0,00	0,00	-0,03	-0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,98
Químicos inorgânicos	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03
Adubos e fertilizantes	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
Químicos diversos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Cimento	0,00	0,01	0,00	0,28	0,00	0,00	0,16	0,76	0,00	0,00	0,00	0,62	1,83
Artefatos de cimento e gesso	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Ferro gusa e ferroligas	0,04	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,01	0,00	0,00	0,28
Semi acabados, laminados e tubos de aço	0,00	0,00	0,09	0,01	0,00	0,00	0,01	0,23	0,00	0,01	0,00	0,01	0,35
Peças fundidas de aço e de metais não ferrosos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Total	3,48	0,15	18,47	10,15	0,89	0,54	-1,84	79,13	24,79	0,17	-15,53	-0,21	120,09

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 8 mostra que o crescimento dos graneis sólidos minerais é dominado pelo aumento do transporte de minério de ferro, com expansão de 76,64 milhões de TKU na MRS e 14,18 milhões de TKU na EFVM, além de variações positivas menores em outras concessionárias. Esses ganhos são suficientemente elevados para mais do que compensar as quedas observadas em outros produtos. Por outro lado, a retração dos graneis líquidos está associada principalmente à redução dos fluxos de diesel e biodiesel (-17,13 milhões de TKU) e de outros

produtos do refino de petróleo (-11,37 milhões de TKU), além de quedas em óleo combustível. Esses produtos apresentam variações negativas concentradas em concessionárias como RMP e FTL.

Assim, a contração do TKU da RMP (-8,16 milhões) e da FTL (-0,97 milhão) decorre da combinação de dois fatores observáveis nas tabelas: (i) exposição relativamente maior a cargas líquidas e produtos do refino, que apresentam retração agregada; e (ii) ausência de ganhos relevantes nos fluxos de minério de ferro, que são o principal motor da expansão do TKU no sistema ferroviário.

Em contraste, concessionárias como MRS, EFVM e RMN, que apresentam forte crescimento de TKU agregado, são justamente aquelas que concentram os maiores aumentos nos fluxos de minério de ferro, conforme evidenciado na Tabela 8, o que explica a expansão líquida de seus volumes transportados. Portanto, a coexistência de expansões e retrações de TKU entre concessionárias reflete um processo de realocação da demanda por tipos de carga, induzido pelo ganho de eficiência energética. O efeito final sobre cada empresa depende fundamentalmente de sua especialização em mercadorias e de sua inserção nos corredores logísticos dominados por segmentos que expandem ou contraem no novo equilíbrio.

O comportamento do nível de atividade (valor agregado) das concessionárias, apresentado na Tabela 6, é heterogêneo e não acompanha mecanicamente o padrão observado para o TKU. A RMS registra a maior variação positiva de valor agregado (0,38%), seguida por EFC (0,25%), EFVM (0,20%) e MRS (0,13%). Em contrapartida, RMP apresenta retração de valor agregado (-0,12%), enquanto FNSTN e FTL exibem variações negativas mais moderadas (-0,04%).

A comparação entre TKU e valor agregado mostra que variações de volume transportado não se traduzem automaticamente em variações proporcionais de atividade econômica. A RMS, por exemplo, apresenta praticamente estabilidade no TKU (-0,08 milhão), mas registra o maior crescimento de valor agregado do setor (0,38%). Esse resultado indica que, para essa concessionária, os ganhos de eficiência energética se refletem principalmente na redução de custos e na elevação da margem econômica do serviço, e não na expansão física do volume transportado. Em contrapartida, a MRS combina forte aumento de TKU (41,28 milhões) com crescimento positivo de valor agregado (0,13%), caracterizando um ajuste no qual a redução de custos é acompanhada tanto por expansão de volume quanto por melhora econômica. A RMP,

por sua vez, apresenta simultaneamente queda de TKU (-8,16 milhões) e retração do valor agregado (-0,12%), sinalizando perda de escala e deterioração relativa do desempenho econômico.

Esses padrões também aparecem nas variáveis dinâmicas de investimento e taxa de retorno. A RMS, que apresenta o maior crescimento de valor agregado, registra igualmente os maiores valores de investimento (0,83%) e de taxa de retorno (0,14%). EFC, EFVM e MRS exibem variações positivas nessas três dimensões (valor agregado, investimento e retorno). Em contraste, RMP, FTL e FNSTN apresentam investimento negativo e taxa de retorno negativa, em linha com suas quedas de valor agregado. Em conjunto, os resultados indicam que a política de eficiência energética gera um processo de diferenciação intrasetorial: embora todas as concessionárias se beneficiem da redução do consumo de diesel, apenas parte delas converte esse ganho em aumento de atividade econômica, rentabilidade e investimento, enquanto outras experimentam perda relativa de escala e retração econômica.

Quando o ganho anual de eficiência energética é elevado para 3% a.a., os resultados apresentados na Tabela 9 indicam que os padrões observados no cenário regular se mantêm, porém, com maior magnitude.

Tabela 9 – Resultados intrasetoriais das concessionárias ferroviárias no cenário de eficiência energética de 3% a.a. (2040)

Empresa ferroviária	Diesel (mil m ³)	CO ₂ e (mil t)	TKU (milhões)	Investimento (var.%)	Nível de atividade (var.%)	Taxa de Retorno Esperada (var.%)	Preço (var.%)
EFC	-117.164	-341.393	3,08	1,03	0,48	0,17	-3,75
EFPO	-606	-1.765	0,14	0,21	0,09	0,03	-8,50
EFVM	-110.431	-321.774	18,63	0,85	0,39	0,14	-5,87
FCA	-79.779	-232.462	10,14	0,22	0,09	0,04	-8,74
FNSTN	-7.271	-21.186	0,89	-0,09	-0,08	-0,01	-3,72
FTC	-1.066	-3.107	0,54	0,21	0,08	0,04	-3,24
FTL	-3.526	-10.275	-1,84	-0,10	-0,07	-0,01	-7,59
MRS	-133.640	-389.403	78,68	0,54	0,25	0,09	-6,33
RMN	-87.373	-254.589	25,04	0,22	0,10	0,04	-6,14
RMO	-9.897	-28.840	0,17	0,33	0,15	0,05	-5,78
RMP	-11.249	-32.777	-15,47	-0,38	-0,23	-0,05	-6,41
RMS	-55.855	-162.751	0,08	1,54	0,76	0,25	-7,03
Total	-617.858	-1.800.322	120,09	0,53	0,17	0,06	-6,09

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline). Para as variáveis Nível de atividade, Taxa de Retorno Esperada e Preço, os valores apresentados na linha Total correspondem à média simples entre as empresas ferroviárias.

Fonte: Resultados da pesquisa.

As economias físicas de diesel aumentam em todas as concessionárias e preservam a hierarquia observada anteriormente, com maiores reduções absolutas concentradas na MRS (-133,64 mil m³), EFC (-117,16 mil m³), EFVM (-110,43 mil m³), RMN (-87,37 mil m³) e FCA (-79,78 mil m³). As reduções de emissões de CO₂ equivalente (CO₂e, em mil toneladas – tCO₂e) acompanham esse comportamento, alcançando -389,40 mil tCO₂e na MRS, -341,39 mil tCO₂e na EFC, -321,77 mil tCO₂e na EFVM, -254,59 mil tCO₂e na RMN e -232,46 mil tCO₂e na FCA, reforçando que o aumento da intensidade do ganho de eficiência se traduz diretamente em maiores benefícios ambientais e na redução do consumo energético do setor ferroviário.

Quando dimensionados em relação ao cenário de referência, esses resultados evidenciam a magnitude sistêmica do choque de eficiência. A redução total de 617.858 mil m³ de diesel corresponde a 38,39% do consumo projetado do setor ferroviário no baseline de 2040 (1.609.560 mil m³), indicando que o ganho de eficiência equivale, em termos físicos, à eliminação de mais de um terço da demanda energética do setor. Em termos operacionais, uma variação de 100 mil m³ de diesel representa aproximadamente 6,21% do consumo ferroviário total projetado, o que ilustra a elevada sensibilidade do sistema a variações absolutas de consumo.

No plano ambiental, a redução de 1.800.322 mil tCO₂e corresponde a 15,99% das emissões totais do setor ferroviário no cenário de referência (11.258.445 mil tCO₂e), evidenciando que o aumento da intensidade do choque de eficiência produz ganhos ambientais expressivos, ainda que não proporcionalmente equivalentes às economias físicas de combustível. Quando comparado ao conjunto dos modais de transporte, esse efeito assume maior relevância relativa: a redução ferroviária equivale a aproximadamente 0,72% das emissões dos transportes terrestres não ferroviários, 10,42% das emissões do transporte aéreo e 173,7% do total do transporte aquaviário, superando integralmente as emissões deste último. Esses resultados reforçam que, embora o modal ferroviário possua participação relativamente reduzida na matriz emissora agregada, ganhos intensivos de eficiência energética podem produzir impactos ambientais de magnitude comparável a modais inteiros de menor escala.

No canal de preços, observa-se aprofundamento da queda do frete ferroviário em todas as concessionárias. As maiores reduções ocorrem na FCA (-8,74%) e EFPO (-8,50%), seguidas por RMS (-7,03%), FTL (-7,59%) e MRS (-6,33%). Em relação ao cenário de 1,5% a.a., essas

quedas mais intensas indicam que uma parcela maior da economia de custos é incorporada aos preços, ampliando o diferencial competitivo do transporte ferroviário dentro do próprio setor e em relação aos demais modais.

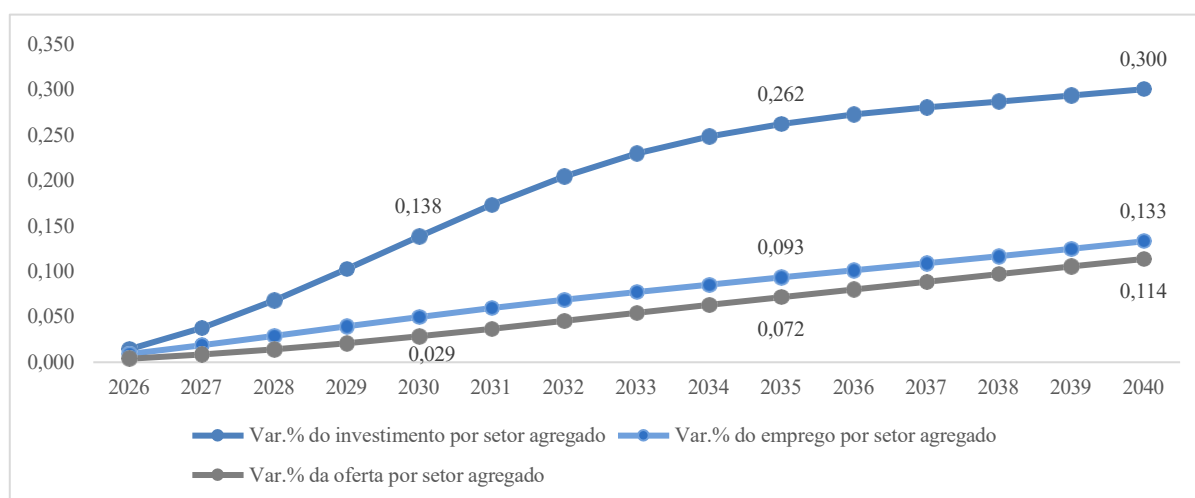
Esse movimento se reflete nas quantidades transportadas. A MRS amplia o TKU para 78,68 milhões de TKU, RMN para 25,04 milhões de TKU e EFVM para 18,63 milhões de TKU, enquanto FCA (10,14 milhões de TKU) e EFC (3,08 milhões de TKU) também apresentam expansão relevante. Em contraste, a RMP aprofunda a contração do TKU (-15,47 milhões de TKU) e a FTL mantém retração (-1,84 milhão de TKU). Assim como no cenário regular, o aumento da eficiência não gera expansão uniforme de escala: parte das concessionárias amplia significativamente o volume transportado, enquanto outras perdem participação relativa no sistema ferroviário.

O comportamento do nível de atividade reforça essa assimetria entre concessionárias. A RMS apresenta a maior expansão (0,76%), seguida por EFC (0,48%), EFVM (0,39%) e MRS (0,25%). Em sentido oposto, a RMP aprofunda a retração da atividade econômica, alcançando -0,23%. Esses resultados indicam que as concessionárias capazes de converter a redução de custos em ganhos de produtividade e reposicionamento competitivo são também aquelas que apresentam maior crescimento econômico no novo equilíbrio geral.

As variáveis dinâmicas seguem o mesmo padrão. A RMS eleva o investimento para 1,54% e a taxa de retorno esperada para 0,25%; a EFC para 1,03% e 0,17%; a EFVM para 0,85% e 0,14%; e a MRS para 0,54% e 0,09%. Em contrapartida, a RMP intensifica o desinvestimento (-0,38%) e mantém taxa de retorno negativa (-0,05%). Esses resultados reforçam a presença de um processo de seleção econômica intrassetorial, no qual os ganhos de eficiência reduzem custos em todas as empresas, mas apenas parte delas converte esse ganho em maior rentabilidade e expansão sustentada no longo prazo.

Por fim, a consolidação dos efeitos no nível agregado do setor ferroviário de carga é sintetizada nas Figuras 14 e 15, que apresentam, respectivamente para os cenários regular e otimista, a trajetória das variações percentuais do investimento, do emprego e da oferta ao longo do horizonte de simulação.

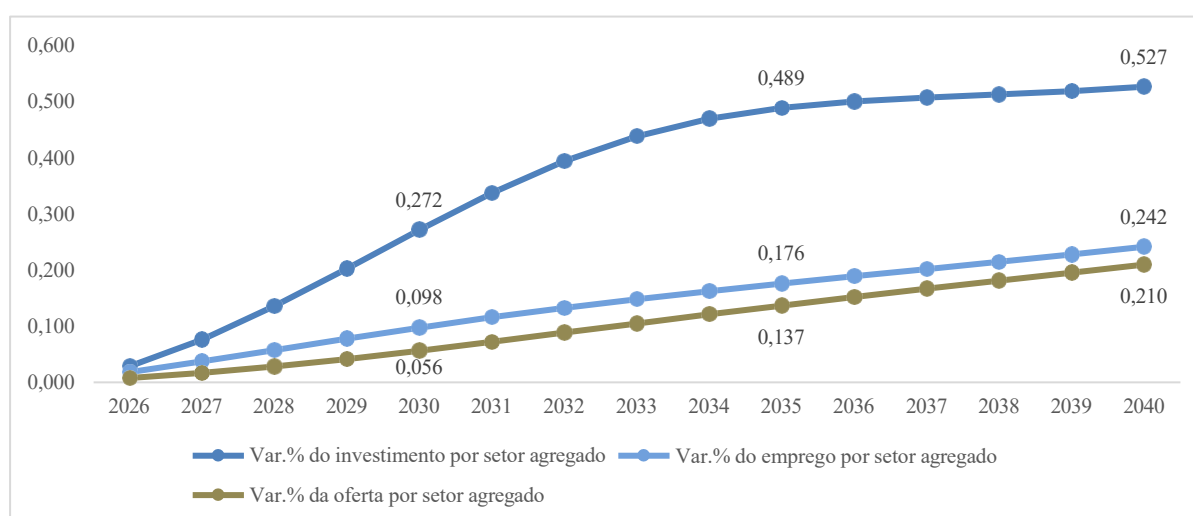
Figura 14 – Variação percentual do investimento, emprego e oferta agregados do setor ferroviário de carga – cenário regular



Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 15 - Variação percentual do investimento, emprego e oferta agregados do setor ferroviário de carga – cenário otimista



Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

Em ambos os cenários, investimento, emprego e oferta do setor exibem trajetórias crescentes ao longo do horizonte de simulação, com intensidades sistematicamente maiores no cenário otimista. No cenário regular, o investimento agregado atinge aproximadamente 0,30% em 2040, enquanto o emprego e a oferta alcançam cerca de 0,13% e 0,11%, respectivamente. Já no

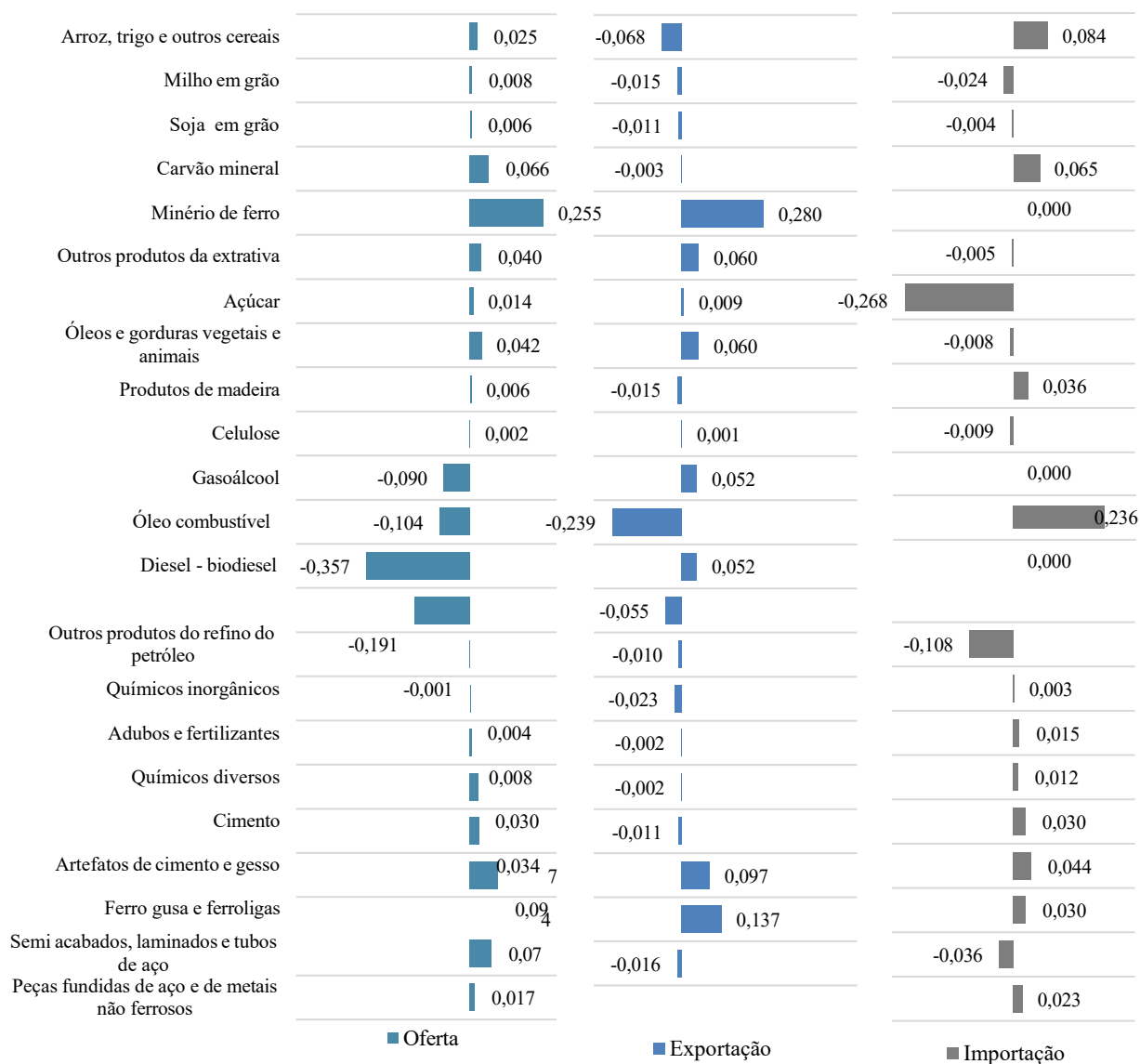
cenário otimista, esses valores se elevam para aproximadamente 0,53% no investimento, 0,24% no emprego e 0,21% na oferta.

A ordenação das respostas, com o investimento reagindo de forma mais intensa do que emprego e oferta, sugere que o principal canal de ajuste agregado ocorre por meio da acumulação de capital. A redução persistente dos custos operacionais eleva a rentabilidade esperada do setor, estimulando decisões de investimento, que ampliam gradualmente a capacidade produtiva. A expansão da oferta e do emprego ocorre como desdobramento desse processo, refletindo a necessidade de fatores adicionais para operar a capacidade instalada ampliada.

Esses resultados indicam que, apesar da heterogeneidade entre concessionárias, a política de eficiência energética gera um efeito líquido expansionista sobre o setor ferroviário de carga como um todo. O ganho de eficiência reduz custos médios, melhora a posição competitiva do modal ferroviário, estimula a demanda agregada pelo serviço e sustenta, no equilíbrio de longo prazo, um movimento de expansão moderada, porém persistente, da atividade, do emprego e do investimento setorial.

A análise a nível de produto, considerando simultaneamente as variações percentuais da oferta doméstica, das exportações e das importações, investiga como os ganhos de eficiência energética no transporte ferroviário de carga se propagam ao longo das cadeias produtivas, afetando custos relativos, padrões de especialização produtiva e competitividade externa dos diferentes segmentos da economia no horizonte de longo prazo, com ênfase nos setores intensivos no uso do modal ferroviário.

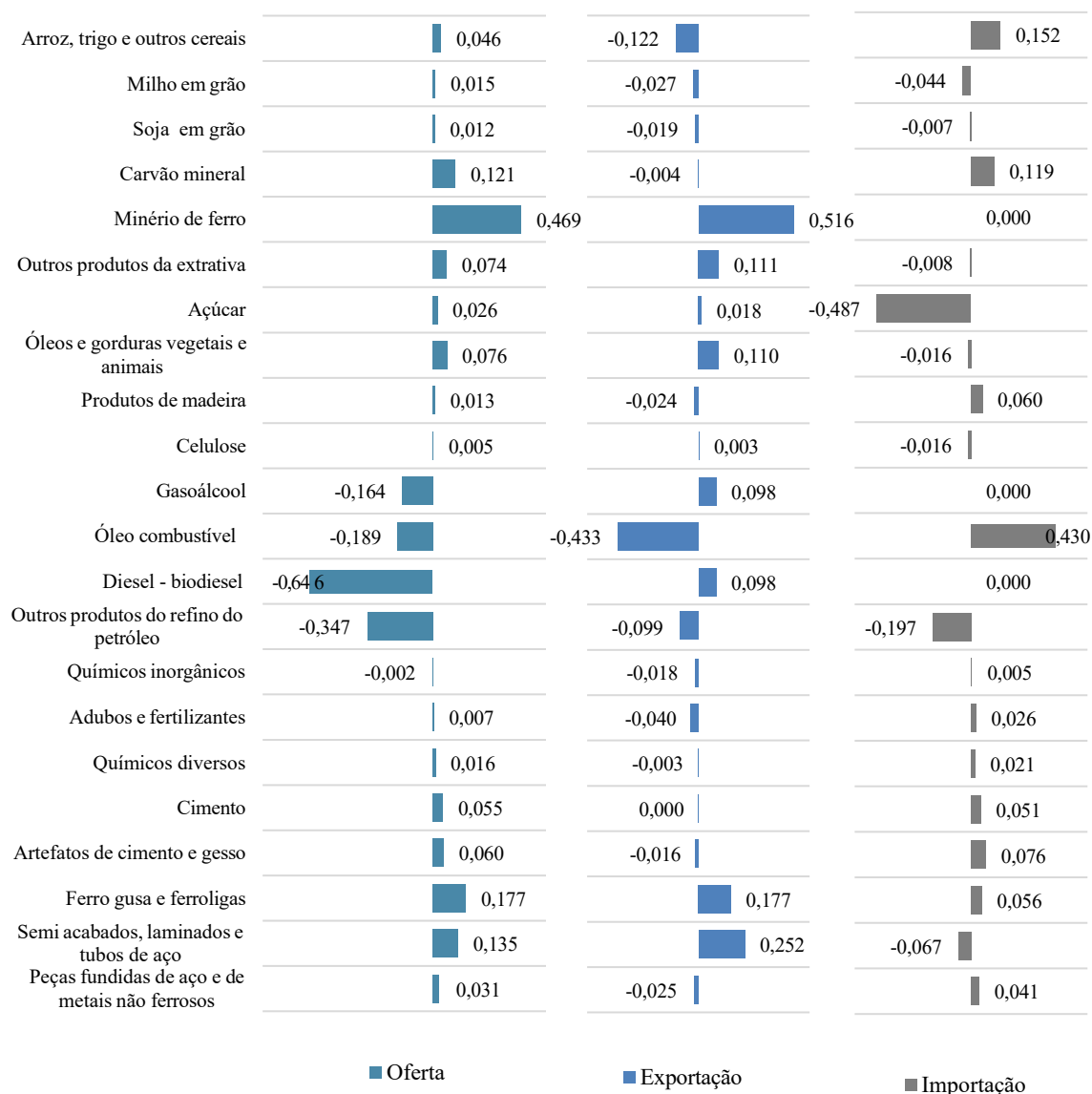
Tabela 10 - Variação percentual da oferta, exportações e importações dos principais produtos no cenário de eficiência energética de 1,5% a.a. (2040)



Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 11 - Variação percentual da oferta, exportações e importações dos principais produtos no cenário de eficiência energética de 3,0% a.a. (2040)



Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

A política de eficiência energética no transporte ferroviário de carga produz um choque que se transmite intersetorialmente, em primeiro lugar, por meio da redução do custo logístico de movimentação de cargas pesadas e de longa distância. Esse barateamento relativo do transporte ferroviário altera a estrutura de custos de setores intensivos nesse modal, melhora sua competitividade e permite, no novo equilíbrio, a expansão conjunta da produção e do escoamento externo desses bens. Assim, os efeitos intersetoriais observados refletem

essencialmente um processo de realocação produtiva em direção a cadeias com elevado conteúdo físico, forte dependência logística e inserção exportadora.

No cenário regular de ganho anual de eficiência energética de 1,5% (Tabela 10), esse mecanismo manifesta-se de forma particularmente clara na cadeia mineral-metalúrgica. O minério de ferro registra a maior expansão da oferta doméstica (0,255%) e das exportações (0,280%), seguido por ferro gusa e ferroligas (0,097% em ambas as dimensões) e por semiacabados, laminados e tubos de aço (0,074% na oferta e 0,137% nas exportações). Esses resultados indicam que a redução do custo de transporte diminui o custo marginal de colocação desses produtos no mercado, permitindo simultaneamente maior produção e maior competitividade externa. Trata-se, portanto, de um ajuste de escala, e não de simples substituição entre mercados doméstico e externo.

Além da metalurgia, observa-se expansão de oferta e exportações em produtos como cimento, artefatos de cimento e gesso, óleos e gorduras vegetais e animais e outros produtos da extrativa, todos com variações positivas da ordem de 0,03% a 0,06%. Esses segmentos compartilham duas características relevantes: dependem do transporte de grandes volumes físicos e ocupam posição intermediária em cadeias produtivas longas. Assim, o barateamento logístico reduz custos ao longo da cadeia, favorecendo sua expansão.

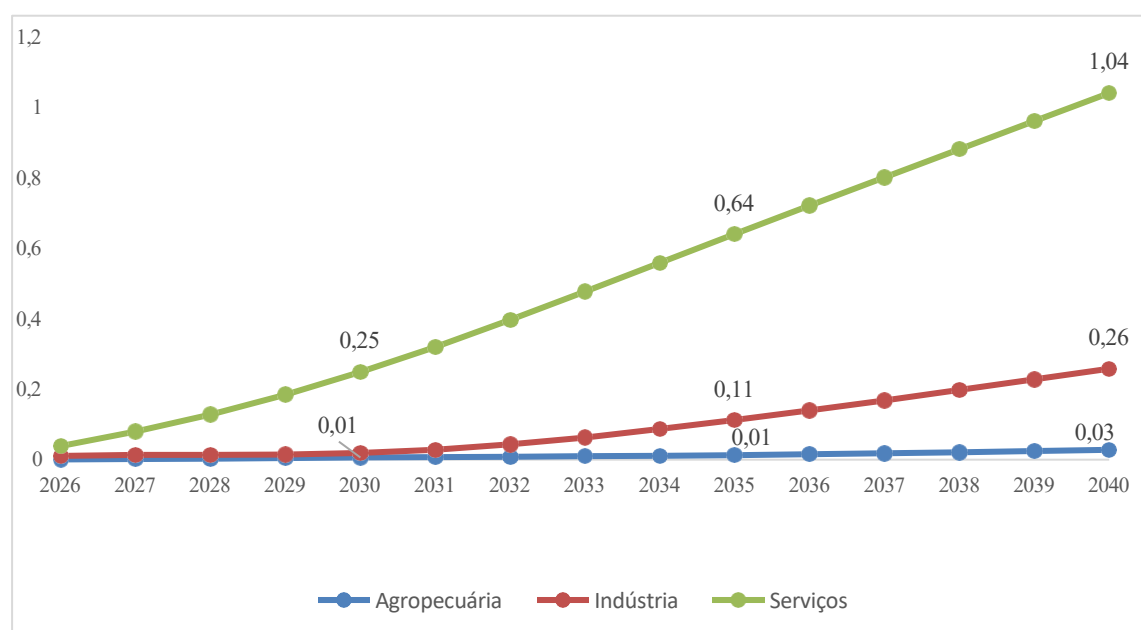
O comportamento das importações complementa essa leitura. O aumento das importações de óleo combustível (0,236%), carvão mineral (0,065%) e cereais (0,084%) reflete um efeito de escala: a economia passa a produzir mais nos setores industriais e extrativos favorecidos, elevando a demanda por energia e insumos intermediários, parte dos quais é suprida pelo mercado externo. Ou seja, a política reduz o consumo específico de diesel no transporte ferroviário, mas a expansão da atividade econômica eleva a demanda agregada por energia e matérias-primas em outros estágios da produção.

Em contraste, produtos ligados ao refino de petróleo apresentam retração da oferta e das exportações, como outros produtos do refino (-0,191% na oferta) e diesel-biodiesel (-0,357% na oferta). Esse resultado é coerente com o próprio objetivo da política: ao reduzir a demanda por combustíveis no transporte ferroviário, ocorre uma compressão estrutural da atividade desses segmentos, evidenciando um processo de realocação interenergética.

No cenário otimista de ganho anual de eficiência energética de 3% (Tabela 11), esses mesmos mecanismos são preservados e amplificados. O minério de ferro passa a registrar expansão de 0,469% na oferta e 0,516% nas exportações, enquanto ferro gusa e ferroligas atingem 0,177% e semiacabados, laminados e tubos de aço, 0,135% na oferta e 0,252% nas exportações. Do lado das importações, intensificam-se os aumentos em óleo combustível (0,430%) e carvão mineral (0,119%), confirmando que a maior intensidade do choque amplia a escala dos ajustes, sem alterar sua natureza.

A consolidação desses movimentos no nível agregado dos grandes setores da economia é capturada pela trajetória do valor agregado setorial, apresentada na Figura 17. Em 2040, os serviços exibem a maior expansão (1,04%), seguidos pela indústria (0,26%) e pela agropecuária (0,03%). Esse ordenamento reflete o papel central dos serviços como fornecedores de insumos intermediários e atividades de suporte às cadeias produtivas que se expandem em decorrência do barateamento do transporte ferroviário, incluindo logística, comércio, serviços empresariais, financeiros e de apoio à produção. À medida que mineração, metalurgia e indústrias associadas ampliam seus níveis de atividade, cresce de forma endógena a demanda derivada por serviços, o que explica sua resposta proporcionalmente mais intensa.

Figura 16- Variação percentual acumulada do investimento, do emprego e da oferta agregada no setor ferroviário de carga – cenário regular



Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência (baseline).

Fonte: Resultados da pesquisa.

O crescimento da indústria decorre da expansão das cadeias intensivas em transporte ferroviário identificadas na análise por produto, ao passo que a agropecuária apresenta variação mais modesta, uma vez que os maiores ganhos do choque se concentram em atividades industriais e extrativas de grande escala física. Assim, a política de eficiência energética no transporte ferroviário não gera um crescimento uniforme da economia, mas induz um padrão de especialização produtiva, favorecendo setores intensivos em logística pesada e fortemente orientados ao mercado externo, enquanto reduz, em termos relativos, a participação de segmentos associados a cadeias energéticas tradicionais e a modais alternativos de transporte.

Em conjunto, os resultados de valor agregado setorial caracterizam a política como um mecanismo de reorganização estrutural da economia brasileira, plenamente consistente com os padrões observados na análise por produto, e que fornece base direta para a interpretação dos efeitos macroeconômicos agregados apresentados a seguir. A Tabela 12 sintetiza os desvios percentuais acumulados, em relação ao cenário de referência, das principais variáveis macroeconômicas no horizonte 2026–2040, para os dois cenários considerados.

Tabela 12 – Efeitos macroeconômicos agregados da política de eficiência energética ferroviária (2026–2040)

Variáveis macroeconômicas	Cenário 1,5% 2026 – 2040	Cenário 3% 2026 – 2040
PIB	0,016	0,029
Deflator do PIB	0,009	0,014
Investimento total	0,037	0,066
Estoque de capital	0,012	0,023
Consumo das famílias	0,013	0,022
Utilidade	0,020	0,035
Emprego nacional	0,002	0,005
Salário real	0,019	0,034
Balança Comercial	0,030	0,056
Exportações	0,019	0,037
Importações	0,011	0,018
Termos de comércio	-0,022	-0,043

Fonte: Resultados da pesquisa.

No cenário regular, o Produto Interno Bruto apresenta expansão acumulada de 0,016%. Esse resultado decorre da redução dos custos de produção nos setores usuários do transporte ferroviário. Ao baratear o frete, a política reduz o custo marginal de insumos e de bens finais,

permitindo que as firmas operem com estruturas de custo mais favoráveis, elevem sua rentabilidade e ampliem a produção. Assim, a expansão do PIB não resulta de um estímulo exógeno à demanda, mas de uma melhora das condições de oferta ao longo das cadeias produtivas.

A ampliação da produção gera, por sua vez, incentivos à expansão da capacidade produtiva. Setores cuja rentabilidade aumenta passam a demandar mais capital, o que se reflete no crescimento do investimento agregado (0,037%) e, de forma acumulada, do estoque de capital (0,012%). Esse processo reforça o efeito inicial da redução de custos, ao ampliar a capacidade de oferta da economia e realimentar positivamente a trajetória de crescimento do produto ao longo do horizonte de simulação.

A elevação da atividade econômica afeta o mercado de fatores. A demanda por trabalho aumenta de forma moderada, resultando em expansão do emprego nacional de 0,002%. Simultaneamente, a política eleva a produtividade sistêmica, ao reduzir a quantidade de energia necessária por unidade de serviço de transporte, permitindo que a economia gere mais valor por unidade de fator utilizado. Esse ganho de produtividade sustenta um aumento do salário real de 0,019%, mesmo na ausência de forte crescimento do emprego. Assim, o principal canal de transmissão para a renda do trabalho opera via produtividade, e não via absorção intensiva de mão de obra.

O aumento do salário real e da renda agregada sustenta a expansão do consumo das famílias (0,013%). Esse crescimento do consumo reforça a expansão da produção nos setores voltados ao mercado interno, aprofundando o ciclo de realimentação entre custos menores, maior produção, maior renda e maior demanda. A elevação da utilidade agregada em 0,020% sintetiza esse conjunto de efeitos, refletindo ganhos líquidos de bem-estar associados à combinação de maior renda real e maior disponibilidade de bens e serviços.

No que se refere ao nível geral de preços, atuam simultaneamente dois vetores. De um lado, a redução de custos nos setores diretamente beneficiados exerce pressão baixista. De outro, a expansão da renda e da demanda agregada pressiona os mercados de bens e fatores. O resultado líquido dessa interação é um aumento moderado do deflator do PIB (0,009%), indicando que, no agregado da economia, o efeito expansivo da demanda supera levemente o efeito desinflacionário associado à redução de custos setoriais.

Esses mesmos mecanismos se refletem no setor externo. A redução dos custos logísticos melhora a competitividade de setores exportadores intensivos em transporte ferroviário, elevando as exportações em 0,019%. Ao mesmo tempo, a expansão da atividade doméstica e do investimento aumenta a demanda por insumos intermediários e bens de capital importados, elevando as importações em 0,011%. Como o crescimento das exportações supera o das importações, a balança comercial melhora em 0,030%.

Os termos de comércio se deterioram em 0,022%, indicando que parte da expansão das exportações ocorre associada à redução dos preços relativos das vendas externas ou ao aumento da participação em segmentos de menor preço médio. Esse resultado é coerente com um padrão de inserção internacional baseado predominantemente em ganhos de competitividade via custos.

No cenário otimista, os mesmos encadeamentos causais permanecem válidos, porém com maior intensidade. Uma redução mais pronunciada dos custos ferroviários amplia a queda dos custos setoriais e fortalece os incentivos à expansão da produção. Como consequência, o PIB cresce 0,029%, o investimento total atinge 0,066% e o estoque de capital alcança 0,023%, evidenciando um processo mais intenso de acumulação. A maior expansão da capacidade produtiva eleva a demanda por trabalho (emprego +0,005%) e, sobretudo, amplia os ganhos de produtividade média da economia, permitindo aumento mais expressivo do salário real (0,034%). Esse movimento sustenta crescimento mais elevado do consumo das famílias (0,022%) e da utilidade agregada (0,035%). No plano de preços, a interação entre redução de custos e expansão da demanda volta a produzir um aumento líquido moderado do deflator do PIB (0,014%), superior ao observado no cenário regular, refletindo a maior intensidade da expansão econômica.

No setor externo, as exportações crescem 0,037% e as importações 0,018%, resultando em melhora da balança comercial de 0,056%. A deterioração mais acentuada dos termos de comércio (-0,043%) reforça a interpretação de que a inserção externa adicional ocorre principalmente via compressão de custos e preços relativos.

Em síntese, os resultados macroeconômicos indicam que a política de eficiência energética no transporte ferroviário opera como um choque de produtividade sistêmica: a redução inicial de custos se propaga por preços relativos, reorganiza a estrutura produtiva, eleva a rentabilidade

setorial, induz investimento, amplia a capacidade produtiva e, por essa via, sustenta ganhos de produto, renda real e bem-estar. A intensificação do ganho de eficiência preserva integralmente essa lógica, ampliando apenas a magnitude dos efeitos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação analisou os impactos econômicos de ganhos graduais de eficiência energética no transporte ferroviário de cargas no Brasil, com foco na redução do consumo de diesel e das emissões associadas, bem como nos desdobramentos intrassetoriais, intersetoriais e macroeconômicos desses ganhos no horizonte de longo prazo. A análise foi conduzida por meio de um modelo de Equilíbrio Geral Computável dinâmico, calibrado para a economia brasileira, o que permitiu capturar, de forma integrada, os mecanismos de transmissão intertemporais e as interdependências entre concessionárias ferroviárias, setores produtivos, cadeias de comércio e agregados macroeconômicos.

O tratamento da eficiência energética como um choque operacional gradual e cumulativo, por meio de dois cenários de ganho anual (1,5% e 3%), constitui um elemento central da contribuição deste trabalho. A respectiva abordagem difere de estratégias baseadas em mudanças abruptas de tecnologia ou instrumentos exclusivamente precificatórios, aproximando o exercício contrafactual de trajetórias plausíveis de avanço operacional, gerencial e tecnológico do setor ferroviário brasileiro. Tal escolha metodológica mostrou-se particularmente adequada para investigar os efeitos estruturais de médio e longo prazo associados à redução persistente dos custos logísticos e energéticos.

A análise inicia-se no nível intrassetorial, uma vez que é no interior do setor ferroviário que o choque de eficiência se materializa de forma direta. Os resultados mostram que os ganhos de eficiência energética produzem reduções expressivas e generalizadas no consumo de diesel e nas emissões de CO₂e em todas as concessionárias, tanto no cenário de 1,5% quanto no de 3%. A homogeneidade das variações percentuais indica que o choque tecnológico atua de maneira essencialmente proporcional sobre as empresas, refletindo a natureza comum da inovação incorporada.

Apesar dessa homogeneidade energética, os desdobramentos econômicos são marcadamente heterogêneos. A compressão dos custos energéticos reduz os preços do frete ferroviário em todas as concessionárias, mas o repasse dessa redução e a resposta em termos de volume transportado variam significativamente. Algumas empresas convertem a queda de custos em forte expansão de TKU e aumento do valor agregado, enquanto outras apresentam retrações relativas de atividade, mesmo se beneficiando da economia energética. Esse padrão revela que a eficiência energética desencadeia um processo de realocação endógena da demanda dentro do próprio setor ferroviário.

A coerência observada entre variações do valor agregado, investimento e taxa de retorno reforça esse mecanismo. Concessionárias que apresentam maior expansão de atividade são também aquelas que exibem maiores taxas de retorno e níveis mais elevados de investimento, indicando que a redução persistente de custos melhora a rentabilidade esperada e direciona a acumulação de capital de forma seletiva. Assim, a eficiência energética não apenas reduz emissões, mas também reorganiza a estrutura competitiva intrassetorial, favorecendo empresas com maior capacidade de absorção de mercado e aprofundando a heterogeneidade econômica no interior do setor.

No cenário de 3%, esses padrões são preservados e intensificados: as reduções de consumo energético e emissões tornam-se mais profundas, as quedas de preço mais expressivas e os diferenciais de desempenho econômico entre concessionárias mais nítidos. O cenário intenso, portanto, não altera a natureza dos mecanismos, mas amplia quantitativamente seus efeitos, conferindo robustez às conclusões.

A partir desse ajuste intrassetorial, a análise intersetorial evidencia que os ganhos de eficiência ferroviária se propagam de forma desigual pela economia, refletindo diferenças na intensidade de uso do transporte ferroviário, na inserção comercial e nos encadeamentos produtivos. No nível de produto, observam-se expansões sistemáticas da oferta e das exportações de bens associados a cadeias extrativas, metalúrgicas, agroindustriais e de materiais de construção, com destaque para minério de ferro, produtos siderúrgicos, carvão mineral, derivados de grãos, óleos e gorduras, minerais não metálicos e cimento. Esses resultados são coerentes com a redução do custo do transporte ferroviário, que comprime o custo marginal desses produtos, desloca suas curvas de oferta e amplia sua competitividade externa.

O comportamento do minério de ferro assume papel estruturante nesse processo. Trata-se de um produto altamente intensivo em logística ferroviária, com grande peso exportador e elevada escala física. Pequenas reduções percentuais de custo geram respostas relativamente grandes em quantidade, produzindo efeitos escala que se propagam verticalmente para a metalurgia e, horizontalmente, para setores fornecedores de insumos e serviços intermediários..Em contraste, produtos e serviços associados a modais concorrentes ao ferroviário, bem como parte das cadeias energéticas, apresentam retrações relativas, refletindo substituição modal e interenergética induzida pela política.

Essa leitura é reforçada pela análise agregada de valor agregado setorial. No cenário de 1,5%, os maiores aumentos concentram-se em mineração, siderurgia, alimentos processados, impressão e gravações, refino de açúcar, extrativa não metálica, construção e minerais não metálicos, enquanto transporte aéreo, transporte aquaviário, petróleo e gás e refino de petróleo apresentam retração. Esses resultados sintetizam, em nível setorial, os padrões observados na análise por produto e confirmam que os ganhos de competitividade se concentram em setores intensivos em logística pesada e fortemente integrados a cadeias industriais e exportadoras.

No cenário de 3%, a hierarquia dos setores permanece qualitativamente inalterada, mas as magnitudes se ampliam. A intensificação do ganho de eficiência reforça a especialização relativa da economia em cadeias produtivas com elevado conteúdo físico, alta densidade de transporte e maior inserção externa, ao mesmo tempo em que aprofunda a perda relativa de atividade em segmentos associados a modais alternativos e cadeias energéticas tradicionais.

Esses efeitos intersetoriais fornecem o pano de fundo para os resultados macroeconômicos agregados. Em ambos os cenários, observa-se crescimento positivo do PIB, do investimento, do consumo, do emprego e do bem-estar, ainda que de magnitude moderada. O caráter gradual da expansão decorre da natureza do choque: a eficiência energética atua como um ganho de produtividade sistêmica, operando principalmente pelo lado da oferta.

O investimento emerge como principal canal de transmissão macroeconômica. A redução persistente dos custos logísticos melhora a rentabilidade esperada dos setores mais dinâmicos, estimulando a acumulação de capital. O consumo das famílias reage de forma endógena ao aumento da renda e do emprego, mas não constitui o motor central da expansão.

No setor externo, a expansão simultânea de exportações e importações, combinada à deterioração dos termos de comércio, indica que o crescimento é sustentado sobretudo por

aumentos de quantidades transacionadas, e não por melhorias de preços relativos. Trata-se, portanto, de um padrão de crescimento baseado em competitividade de custos e reorganização produtiva doméstica.

Em termos de implicações para políticas públicas, os resultados indicam que a eficiência energética ferroviária constitui um instrumento relevante para a descarbonização do transporte de cargas e para a elevação da competitividade econômica, especialmente quando implementada de forma gradual e persistente. Contudo, os impactos macroeconômicos moderados sugerem que a eficiência energética deve ser entendida como parte de um portfólio mais amplo de políticas, que inclua investimentos em infraestrutura ferroviária, integração modal e instrumentos complementares de política climática.

Entre as limitações do estudo, destacam-se a ausência de um módulo ambiental plenamente integrado para toda a economia, a não consideração de heterogeneidades regionais detalhadas e a abstração de restrições institucionais e financeiras à implementação dos ganhos de eficiência. As limitações apresentadas não comprometem a validade dos resultados, mas apontam direções claras para pesquisas futuras.

Em síntese, a dissertação demonstra que ganhos graduais de eficiência energética no transporte ferroviário de cargas geram reduções substanciais de emissões, impactos econômicos positivos e uma reorganização estrutural da economia brasileira, começando no interior do setor ferroviário, propagando-se entre setores e, por fim, refletindo-se nos agregados macroeconômicos. Ao explicitar esses encadeamentos, o trabalho reforça o papel estratégico da ferrovia em estratégias de descarbonização baseadas em eficiência e oferece subsídios analíticos consistentes para o planejamento de longo prazo do sistema de transportes no Brasil.

6. REFERÊNCIAS

ADAMS, P. *et al.* *MMRF: Monash Multi-Regional Forecasting Model: A Dynamic Multi-Regional Model of the Australian Economy*. Melbourne: Centre of Policy Studies (CoPS), 2010. Disponível em: <<https://vuir.vu.edu.au/29296/1/g-223.pdf>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Anuário Estatístico do Setor Ferroviário 2020. Brasília: ANTT, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Anuário Estatístico do Setor Ferroviário 2022. Brasília: ANTT, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Anuário Estatístico 2023. Brasília: ANTT, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Boletim de Desempenho do Setor Ferroviário 2022. Brasília: ANTT, 2022.

AHSAN, N.; CHOWDHURY, S.; HOSSAIN, N. A critical review of sustainable rail technologies based on environmental, economic, social, and technical perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 179, p. 113156, 2023.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Boletim do Biodiesel – Abril de 2023. Rio de Janeiro: ANP, 2023.

ANTAQ. *Estatístico Aquaviário*. Brasília: Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), 2020. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/anuario/>>.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. Relatório Anual 2023. Brasília: ANTT, 2023.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Anuário Estatístico 2023: Desempenho do Transporte Ferroviário de Cargas. Brasília: ANTT, 2023.

ANTT. *Dados estatísticos*. Brasília: Agência Nacional de Transporte Terrestre (Antt), 2015.
ANTT. *Relatório de acompanhamento financeiro*. , nº 01. Brasília: Agência Nacional de Transporte Terrestre (Antt) e Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (Bird), 2024.

ARMINGTON, P. S. A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production. *International Monetary Fund Staff Papers*, v. 16, n. 1, p. 159–178, 1969. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/3866403>>.

ARROW, K. J.; DEBREU, G. Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica*, v. 22, n. 3, p. 265–290, 1954. DOI: <https://doi.org/10.2307/1907353>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INFRAESTRUTURA E INDÚSTRIAS DE BASE (ABDIB). Relatório de Infraestrutura 2023. São Paulo: ABDIB, 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). Relatório Anual 2022. Brasília: ANTF, 2022.

BALDWIN, R. *The great convergence: information technology and the new globalization*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press, 2016.

BALLOU, Ronald H.; SRIVASTAVA, Samir K. *Business logistics / supply chain management: planning, organizing, and controlling the supply chain*. 5. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.

BANCO MUNDIAL. Brazil – Country Note on Climate Change Aspects in Agriculture. Washington, DC: World Bank, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16687>.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). *Logística e Transporte: Desafios e Oportunidades*. Rio de Janeiro: BNDES, 2017.

BANISTER, D.; BERECHMAN, Y. *Transport investment and economic development*. London: UCL Press, 2001.

BECKMAN, Jayson. Validating energy-oriented computable general equilibrium models. *Economic Systems Research*, v. 22, n. 3, p. 215–231, 2010.

BETARELLI JUNIOR, A. A. *Um modelo de equilíbrio geral com retornos crescentes de escala, mercados imperfeitos e barreiras à entrada: aplicações para setores regulados de transporte no Brasil*. 2013. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2013.

BETARELLI JUNIOR, A.A. *et al.* Caracterização da indústria nacional de SAF por suas diversas regiões a partir do padrão de custos e de demanda estabelecidos no sistema econômico, considerando especialmente os principais serviços de abastecimento dos aeroportos. *Estudos acerca das alternativas do setor aéreo relacionados ao uso de SAF, Sustainable Aviation Fuel*. Juiz de Fora: Projeto financiado pela SAC, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022.

BETARELLI JUNIOR, ADMIR ANTONIO. *Efeitos econômicos da renovação dos contratos de concessão das empresas ferroviárias no sistema produtivo mineiro*. Juiz de Fora: Projeto financiado pela FAPEMIG, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022.

BETARELLI JUNIOR, ADMIR ANTONIO. *Facilitação de comércio, sistemas produtivos e efeitos regionais: uma modelagem para a avaliação das políticas do setor portuário no Brasil*. Juiz de Fora: Projeto financiado pelo CNPq, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2023.

BETARELLI JUNIOR, ADMIR ANTONIO *et al.* Research and development, productive structure and economic effects: Assessing the role of public financing in Brazil. *Economic Modelling*, v. 90, n. 3, 2020. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264999319309721>>.

BETARELLI JUNIOR, ADMIR ANTÔNIO. *Um modelo de equilíbrio geral com retornos crescentes de escala, mercados imperfeitos e barreiras à entrada: aplicações para setores regulados de transporte no Brasil*. 2013. UFMG, 2013.

BETARELLI JUNIOR, A. A.; DOMINGUES, E. P.; HEWINGS, G. J. D. Transport policy, rail freight sector and market structure: the economic effects in Brazil. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 135, p. 1–23, 2020.

BETARELLI JUNIOR, A. A.; DOMINGUES, E. P. Efeitos econômicos da proposta de redução tarifária sobre as operações domésticas de cabotagem no Brasil (2013-2025). *Pesquisa e Planejamento Econômico*, v. 44, n. 3, p. 663–710, 2014.

BETARELLI JUNIOR, A. A. et al. Transportes, estrutura produtiva e composição de requerimentos: a dependência setorial e regional nas principais economias mundiais. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 50, p. 77–94, 2019.

BETARELLI JUNIOR, A. A. et al. Research and development, productive structure and economic effects: assessing the role of public financing in Brazil. *Economic Modelling*, v. 90, p. 239–254, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.04.017>

BETARELLI JUNIOR, A. A. Um modelo de equilíbrio geral com retornos crescentes de escala, mercados imperfeitos e barreiras à entrada: aplicações para setores regulados de transporte no Brasil. 2013. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional (CEDEPLAR), Belo Horizonte, 2013.

BRASIL. *Estratégia federal de desenvolvimento para o Brasil no período de 2020 a 2031. Decreto nº 10.531, de 26 de outubro de 2020*. Brasília: Presidência da República. Secretaria-Geral, 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10531.htm>.

BRASIL. Lei nº 641, de 26 de junho de 1852. Concede privilégios e vantagens às companhias que se propuserem a construir estradas de ferro. Coleção de Leis do Império do Brasil, Rio de Janeiro, 1852.

BRASIL. Lei nº 3.115, de 16 de março de 1957. Autoriza a constituição da Rede Ferroviária Federal S.A. Diário Oficial da União, 1957.

BRASIL. Lei nº 11.483, de 31 de maio de 2007. Dispõe sobre a extinção da RFFSA. Brasília: Planalto, 2007.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Institui o Programa Combustível do Futuro e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 out. 2024.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Plano Nacional de Logística 2035: Relatório Técnico. Brasília: MINFRA, 2022.

BRASIL MINERAL. Vale e Wabtec firmam acordo para compra de 50 locomotivas da série Evolution. São Paulo: Brasil Mineral, mar. 2025.

BRASIL. *PNL 2035 Plano Nacional de Logística*. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: <<https://ontl.infrasa.gov.br/planejamento/plano-nacional-de-logistica/plano-nacional-de-logistica-2035/relatorios/>>.

BUENO, C.; ALENCAR, L. The maturity of rail freight Logistics Service Providers in Brazil. *Journal of Transport Literature*, v. 10, n. 2, p. 18–22, 2016.

BURFISHER, M. E. *Introduction to Computable General Equilibrium Models*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

BURNIAUX, Jean-Marc; TRUONG, Truong P. GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model. GTAP Technical Paper n. 16. Purdue University, Center for Global Trade Analysis, 2002.

BUTTON, K. *Transport economics*. 3. ed. Cheltenham: Edward Elgar, 2010.

CANTARELLI, C. C.; FLYVBJERG, B.; VAN WEE, B.; MOLIN, E. J. E. Lock-in and its influence on the project performance of large-scale transportation infrastructure projects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 37, n. 5, p. 792–807, 2010.

CANTARELLI, C. C.; MOLIN, E. J. E.; VAN WEE, B. Perceived risk of lock-in in the front-end phase of major transportation projects. *Transportation*, v. 49, n. 6, p. 1763–1787, 2022.

CARLAN, V.; SYS, C.; VANELSLANDER, T. How port community systems can contribute to port performance. *Research in Transportation Business & Management*, v. 31, p. 100–110, 2019.

CASTRO ALVES, E. G. de; RAMOS, R. B. da; SILVA, C. R. Transporte ferroviário no Brasil: desafios e oportunidades. *Revista Conecta*, São Paulo, v. 3, p. 15-27, 2020.

CHÂTEAU, Jean; DELLINK, Rob; LANZI, Elisa; MAGGI, Romain. *An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3*. OECD Environment Working Papers, n. 65, OECD Publishing, Paris, 2014.

CHEN, J.; HU, H.; WANG, M. Power Flow Control-Based Regenerative Braking Energy Utilization in AC Electrified Railways: Review and Future Trends. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024.

CHEN, Zhenhua; HAYNES, Kingsley E. Impact of high-speed rail on regional economic disparity in China. *Journal of Transport Geography*, v. 65, p. 80–91, 2017.

CHESTER, M.; HORVATH, A. Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, v. 5, n. 2, 024008, 2010.

CHESTER, M. V.; HORVATH, A.; MADANAT, S. Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions. *Atmospheric Environment*, v. 44, n. 8, p. 1071–1079, 2010.

CLIMATE TRANSPARENCY. Climate Transparency Report 2022: Brazil Country Profile. Berlin: Climate Transparency, 2022. Disponível em: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT2022-Brazil-Web.pdf>.

CRESCENZI, R.; RODRÍGUEZ-POSE, A. Infrastructure and regional growth in the European Union. *Papers in Regional Science*, v. 91, n. 3, p. 487–513, 2012.

CRIST, P. Handbook on estimating transport costs and emissions for freight transport. Paris: International Transport Forum, OECD, 2009.

CNN BRASIL. Vale compra três locomotivas elétricas e faz parceria para uso de amônia como combustível. São Paulo: CNN Brasil, 13 jul. 2023.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Transporte & Desenvolvimento: Desempenho do Setor Ferroviário Brasileiro. Brasília: CNT, 2023.

COLMENARES, Germán. The rebound effect and its representation in climate and energy models. *Economics of Energy & Environmental Policy*, v. 8, n. 1, p. 1–20, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Infraestrutura 2030: Propostas para modernização do setor ferroviário. Brasília: CNI, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Anuário CNT do Transporte 2021. Brasília: CNT, 2021.

COSAN S.A. Relatório Anual 2022. São Paulo: Cosan, 2023.

DALLA CHIARA, B.; PELLICELLI, M. Sustainable Road transport from the energy and modern society points of view: Perspectives for the automotive industry and the electric car. *Energy Procedia*, v. 126, p. 402–409, 2017.

DIXON, P. B.; JORGENSEN, D. W. (Ed.). Handbook of Computable General Equilibrium Modeling. Amsterdam: Elsevier, 2013.

DIXON, PETER AND RIMMER, M. T. Dynamic general and equilibrium modelling for forecasting and policy: a practical guide and documentation of MONASH. Amsterdam: Elsevier, 2002.

DIXON, P. B. et al. ORANI: A Multisectoral Model of the Australian Economy. Amsterdam: North-Holland Pub. Co, 1982. Disponível em:
<<https://www.copsmodels.com/archivep/bpmh0098.zip>>.

DIXON, P. B.; RIMMER, M. T. Forecasting and Policy Analysis with a Dynamic CGE Model of Australia. , no Working Paper Number OP-90. Melbourne: Policy Studies and Impact Project, Monash University, 1998.

DOLFSMA, W.; LEYDESDORFF, L. Lock-in and break-out from technological trajectories: Modeling and policy implications. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 76, n. 7, p. 932–941, 2009. DOLFSMA, W.; LEYDESDORFF, L. Lock-in and break-out from technological trajectories: Modeling and policy implications. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 76, n. 7, p. 932–941, 2009.

DOMINGUES, E. P. *Dimensão regional e setorial da integração brasileira na Área de Livre Comércio das Américas*. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/ USP), São Paulo, 2002.

DOMINGUES, E. P. *et al.* Redução das desigualdades regionais no Brasil: os impactos de investimentos de transporte rodoviário. *XXXV Encontro Nacional de Economia*. Recife: Anais do XXXV Encontro Nacional de Economia, 2007. .

DOMINGUES, Edson Paulo. Um modelo de equilíbrio geral com retornos crescentes de escala, mercados imperfeitos e barreiras à entrada: aplicações para setores regulados de transporte no Brasil. 2002. Tese (Doutorado em Economia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

DOMÍNGUEZ, M. et al. Review on the use of energy storage systems in railway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025.

EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Rail and Waterborne — Best for Low-Carbon Motorised Transport. Copenhagen: EEA, 2021.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA (EPL). Plano Nacional de Logística – PNL 2025. Brasília: EPL, 2018.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA (EPL). Plano Nacional de Logística – PNL 2035. Brasília: EPL, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2022: Ano-base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022

EUROPEAN BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT (EBRD). Green Economy Transition: Annual Report 2021. London: EBRD, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. Sustainable and Smart Mobility Strategy: putting European transport on track for the future. Brussels: European Commission, 2021.

FERREIRA FILHO, Joaquim Bento de Souza. Megabras: um modelo de equilíbrio geral computável aplicado à análise da agricultura brasileira. 1995. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) — Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

FORBES BRASIL. Vale reforça agenda de descarbonização com novas locomotivas elétricas e híbridas. São Paulo: Forbes Brasil, mar. 2025.

FRITZ, S. Evaluation of Biodiesel Fuel in an EMD GP38-2 Locomotive. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012.

GE TRANSPORTATION. GE to Provide 20 Locomotives to Brazil's Rumo ALL to Help Move Agricultural Exports. GE Newsroom, 2015.

GHISOLFI, V.; ROSA, L. P.; BASTOS, R.; PEREIRA, M. G. System dynamics modeling of freight transport decarbonization pathways: Policy interactions and long-term impacts. *Sustainability*, v. 14, n. 6, p. 3625, 2022.

GIAMBIAGI, F.; CASTRO, L. B.; HERMANN, J. Economia brasileira contemporânea: 1945–2015. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

GONZÁLEZ-GIL, A.; PALACÍN, R.; BATTEN, T. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*, v. 75, p. 374–388, 2013.

GRAHAM, D. J. Agglomeration, productivity and transport investment. *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 41, n. 3, p. 317–343, 2007.

GREMAUD, A. P.; VASCONCELLOS, M. A. S.; TONETO JÚNIOR, R. Economia brasileira contemporânea. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GURGEL, A. D. O acesso ao modal ferroviário no Brasil à luz das políticas públicas e regulação. *Revista MiP, Uberlândia*, v. 5, n. 3, p. 3-31, dez. 2024.

GURGEL, A. C.; PALTSEV, S.; BREVIGLIERI, G. V. The impacts of the Brazilian NDC and their contribution to the Paris Agreement on climate change. *Environment and Development Economics*, v. 24, n. 4, p. 395–412, 2019.

HADDAD, E. A. Regional inequality and structural changes: lessons from the Brazilian experience. Aldershot: Ashgate, 1999.

HADDAD, E. A. *Retornos Crescentes, Custos de Transporte e Crescimento Regional*. 2004. 207 f. Doctoral dissertation, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/ USP), São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/12/tde-08032016-140543/pt-br.php>>.

HADDAD, E. A. et al. Avaliação dos impactos econômicos das políticas de infraestrutura de transportes no Brasil: uma aplicação a duas rodovias federais em Minas Gerais. Brasília: IPEA, 2008.

HARISON, W. J.; PEARSON, K. R. An introduction to GEMPACK. 6. ed. Melbourne: Policy Studies and Impact Project, Monash University, 2002.

HEINOLD, A.; LENZ, B.; ROTHENGATTER, W. Comparing emission estimation models for rail freight transportation. *Transportation Research Procedia*, v. 47, p. 433–440, 2020.

HEYMANN, J.; ROMEIRO, A. R.; ALBUQUERQUE, P. H. M. Eco-efficiency in the Brazilian automotive industry: A DEA approach considering undesirable outputs. *Journal of Cleaner Production*, v. 281, p. 125253, 2021.

HOFFMANN, R. Estimativas das elasticidades-renda de várias categorias de despesa e de consumo, especialmente alimentos, no Brasil, com base na POF. *Revista de economia agrícola*, v. 57, n. 2, p. 49–62, 2010. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/ftpiea/publicacoes/rea/2010/rea2-4-2010.pdf>>.

HOLL, A. Twenty years of accessibility improvements. *Regional Studies*, v. 41, n. 2, p. 351–362, 2007.

HONG, C. et al. Validation of an R&D-based computable general equilibrium model. *Economic Modelling*, v. 42, p. 454–463, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.07.014>.

HORRIDGE, J. M.; MADDEN, J.; WITTWER, G. The impact of the 2002–2003 drought on Australia. *Journal of Policy Modeling*, v. 27, n. 3, p. 285–308, 2005.

HORRIDGE, M. *ORANI-G: a General Equilibrium Model of the Australian Economy*. , n° Working Paper Number OP-93. Melbourne: Centre of Policy Studies and Impact Project, Monash University, 2000. Disponível em: <<http://www.monash.edu.au/policy/elecpr/93.htm>>.

HORRIDGE, MARK. *ORANIGRD: a Recursive Dynamic version of ORANIG*. Melbourne: Victoria University, Centre of Policy Studies/IMPACT Centre., 2002. Disponível em: <<https://www.copsmodels.com/ftp/oranig/oranigrd.zip>>.

IBGE. Margem de Transporte e Comércio. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (Org.). . Sistema de Contas Nacionais – Brasil: Referência 2000.

Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2000. . Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/pib/default_SCN.shtm>.

IBGE. Pesquisa Anual de Serviços. . Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/servicos/9028-pesquisa-anual-de-servicos.html?=&t=o-que-e>>.

IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 5 jun. 2019.

IBGE. Projeções da População. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2025a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html>>.

IBGE. Sistema de Contas Nacionais. 2020. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2022.

IBGE. Sistema de Contas Nacionais Trimestrais - SCNT. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2025b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 4 out. 2020.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Vale atinge meta de 100% de consumo de energia renovável no Brasil dois anos antes do previsto. Brasília: IBRAM, 2024.

IEA. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2023: Highlights. Paris: International Energy Agency, 2023a.

IEA. Rail Transport and Energy Transition: Pathways to Net Zero. Paris: IEA, 2023.

IEA. The Future of Rail: Opportunities for energy and the environment. Paris: International Energy Agency, 2023.

IEA. Tracking Transport 2023. Paris: International Energy Agency, 2023b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Panorama da Mineração Brasileira 2024: transição energética e sustentabilidade. Brasília: IBRAM, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Infraestrutura econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas. Brasília: IPEA, 2018.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Infraestrutura econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas. Brasília: IPEA, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Efficiency 2023. Paris: OECD/IEA, 2023b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Tracking Transport 2022. Paris: IEA, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2014. Paris: OECD/IEA, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2022. Paris: OECD/IEA, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 28 set. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). World Energy Transitions Outlook 2021. Abu Dhabi: IRENA, 2021.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). ITF Transport Outlook 2021. Paris: OECD Publishing, 2021.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). Decarbonising Transport: Pathways and Policies. Paris: OECD Publishing, 2023.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). ITF Transport Outlook 2023. Paris: OECD Publishing, 2023.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). Digitalisation of Railways: Strategy and Implementation. Paris: UIC, 2022.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). Railway Statistics: 2022 Synopsis. Paris: UIC, 2022.

IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

IPEA. Transporte Ferroviário no Brasil: desafios e oportunidades para a descarbonização. Brasília: Ipea, 2022.

JARAMILLO, P.; YEH, S.; SAMARAS, C.; et al. Transport. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2022: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022. p. 1227-1328.

JOHANSEN, L. *A multisectoral Study of economic growth*. Contributi ed. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1964. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=NdC8swEACAAJ>>.

KENDERDINE, T.; BUCSKY, P. China's Belt and Road rail freight transport corridors – the economic geography of underdevelopment. *Die Erde – Journal of the Geographical Society of Berlin*, v. 152, n. 2, p. 91-111, 2021.

KLEIN, L. R.; RUBIN, H. A constant-utility index of the cost of living. *The Review of Economic Studies*, v. 15, n. 2, p. 84–87, 1947. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/pdf/2295996.pdf>>.

KLITKOU, A.; BOLDAKOV, M.; HANSEN, T.; FEVOLDEN, A. The role of lock-in mechanisms in transition processes: The case of energy for road transport. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 16, p. 22–37, 2015.

KORDNEJAD, B. Intermodal transport cost model and intermodal distribution in urban freight. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 111, p. 689-698, 2014.

KOU, Y.; WANG, S.; YUAN, Y.; CHEN, Y. Market-Based Measures for Decarbonizing the Shipping Sector. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 126, p. 104–142, 2025.

LAKSHMANAN, T. R.; ANDERSON, W. P. *Transport Infrastructure, Freight Services Sector and Economic Growth*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2002.

LAMGÅRD, M. Intermodal train services: A business challenge and a measure for decarbonisation for logistics service providers. *Research in Transportation Business & Management*, v. 5, 2012.

LEBEDEVAS, V.; JASINSKAS, A.; ZAGORSKIS, A.; SANDARAVIČIUS, J. Research of energy efficiency and reduction of environmental pollution in freight rail transportation. *Transport Problems*, v. 12, n. 2, p. 27–38, 2017.

LEBEDEVAS, V.; KERŠYS, A.; SAPRAGONAS, J.; VAITKUS, A. Research of energy efficiency and reduction of environmental pollution in freight rail transportation. *Transport Problems*, v. 12, n. 3, p. 27–38, 2017.

LEBEDEVAS, Vytautas; DOMKUS, Audrius; BARAUSKAS, Andrius; VILKAUSKAS, Arvydas; RIMKEVIČIUS, Saulius. Research of energy efficiency and reduction of environmental pollution in freight rail transportation. *Transport*, v. 32, n. 1, p. 34–46, 2017.

LEE, D. S.; FAHEY, D. W.; SKOWRON, A.; ALLEN, M. R.; BARAM, U.; et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, v. 244, p. 117834, 2021.

LEE, H.; KIM, H. The impacts of rail freight rate changes on regional economies, modal shift, and environmental quality in Korea. *International Journal of Urban Sciences*, v. 22, n. 3, p. 1–18, 2018.

LITMAN, T. *Evaluating Rail Transit Criticism*. Victoria Transport Policy Institute, 2021.

MAGALHÃES, A. S. *Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa*. 2013. Tese (Doutorado em Economia) – Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Universidade Federal de Minas Gerais (CEDEPLAR/UFMG), Belo Horizonte, Brasil., 2013.

MALLIDIS, I.; DEKKER, R.; VLACHOS, D. The impact of greening on supply chain design and cost: a case for a developing region. *Journal of Transport Geography*, v. 22, p. 118-128, 2012.

MARCHETTI, D. Ambiente e economia: perspectivas de investimentos em logística. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 33, p. 5-44, jun. 2010.

MEERSMAN, H.; VAN DE VOORDE, E. The relationship between economic activity and freight transport. In: TALLEY, W. K. (ed.). *The Blackwell Companion to Maritime Economics*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013. p. 159-187.

MCKINSEY & COMPANY. *The Future of Rail Automation*. New York: McKinsey, 2020.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. *Input - Output Analysis: Foundations and Extensions*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Boletim Mensal de Biocombustíveis - Dezembro 2022*. Brasília: MME, 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: MME, 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Relatório de Eficiência Energética no Setor de Transportes 2023*. Brasília: MME, 2023.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Plano Nacional de Logística e Transportes*. Brasília: MT, 2019.

MIZUTANI, F.; URANISHI, S. The effects of privatization on productivity and efficiency: the case of the Japanese railways. *Journal of Regulatory Economics*, v. 43, n. 1, p. 36–59, 2013.

MONTOYA, P. H. P.; MARTINS, C. *Estrutura do consumo intermediário por tipos de transporte terrestre de carga e passageiros*. . Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). , 2021

MRS LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2016. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2016.

MRS LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2019. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2019.

MRS LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2021. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2021.

MRS LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2022. Rio de Janeiro: MRS, 2022.

MRS LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2023. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2023.

MRS LOGÍSTICA. Programa de Eficiência Energética da MRS: inovação e sustentabilidade no transporte ferroviário. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2021. Disponível em: <https://www.mrs.com.br>. Acesso em: 10 out. 2025.

NOVACANA. Vale admite dificuldade com eletrificação da frota e aposta em etanol e amônia verdes. Ribeirão Preto: NovaCana, 21 jul. 2023.

NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles*. Golden: NREL, 1998.

OECD. *Green Financing and Investment*. Paris: OECD Publishing, 2020.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. *Green bonds: Mobilising the debt capital markets for a low-carbon transition*. Paris: OECD Publishing, 2020.

OECD/ITF – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. *Decarbonising Transport: A Review of International Experience*. Paris: OECD Publishing, 2021.

OLIVEIRA, M. S.; BRITO, J. R. S. Eficiência do transporte ferroviário de carga brasileiro em perspectiva internacional: uma análise comparativa. *Revista Brasileira de Transportes e Logística*, v. 26, n. 2, p. 45–63, 2024.

PALTSEV, Sergey; REILLY, John; JACOBY, Henry D.; CUI, Yuan; ECKAUS, Richard S.; McFARLAND, James; SOKOLOV, Andrei; BABIKER, Mustafa. *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report n. 125, Cambridge, MA, 2010.

PEROBELLI, F. S. *Análise das Interações Econômicas entre os Estados Brasileiros*. 2004. 250 f. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/ USP), São Paulo, 2004.

POMPERMAYER, Fabiano M.; CAMPOS NETO, Carlos A. S.; SOUSA, Rodrigo Abdala F. Considerações sobre os marcos regulatórios do setor ferroviário brasileiro – 1997-2012. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2012. (Nota Técnica, n. 13).

PROGRESS RAIL; VALE. EMD Joule: locomotiva elétrica de manobra será testada pela Vale. Comunicação institucional. 2020.

PROQUE, A. L. Estrutura produtiva, renda e consumo: os efeitos econômicos da cide e contrapartidas ao transporte rodoviário de passageiros no Brasil. Tese de Doutorado. Juiz de Fora, Brasil. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2019.

PROQUE, C.; RIBEIRO, S. K.; LEE, D. Spatial effects of transport and land-use policies on urban energy consumption: A computable general equilibrium analysis for Brazil. *Energy Economics*, v. 90, p. 104843, 2020.

QUINET, E.; VICKERMAN, R. W. *Principles of transport economics*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2004.

SCHLEICH, J. Barriers to energy efficiency: A comparison across the German commercial and services sector. *Ecological Economics*, v. 68, n. 7, p. 2150–2159, 2009.

SORRELL, S.; O'MALLEY, E.; SCHLEICH, J.; SCOTT, S. *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*. Cheltenham: Edward Elgar, 2004.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil: cenário otimizado. Foco no transporte de carga geral. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019a.

RESENDE, P. T. V.; SOUSA, P. R.; CERQUEIRA, P. R. O modelo de concessão ferroviária no Brasil sob a ótica dos usuários. In: XXXII Encontro da ANPAD, 2009, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ANPAD, 2009.

ROBSON, Edward N.; WIJAYARATNA, Kasun P.; DIXIT, Vinayak V. A review of computable general equilibrium models for transport and their applications in appraisal. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 116, p. 31–53, 2018.

RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. *The Geography of Transport Systems*. 4. ed. New York: Routledge, 2017.

ROGGE, K. S.; REICHARDT, K. Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, v. 45, n. 8, p. 1620–1635, 2016.

- RUMO LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2018. São Paulo: Rumo, 2019.
- RUMO LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2021. São Paulo: Rumo, 2022.
- RUMO S.A. Relatório de Sustentabilidade 2022. São Paulo: Rumo, 2022.
- RUMO LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2023. São Paulo: Rumo, 2024.
- SAES, F. A. M. de. As ferrovias de São Paulo, 1870–1940: expansão e declínio do transporte ferroviário em São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1986.
- SAES, Flávio Azevedo Marques de. Grande empresa de serviços públicos na economia cafeeira: 1850–1930. São Paulo: Hucitec, 1986.
- SANTOS, M. A. dos. História das ferrovias no Brasil. Rio de Janeiro: FGV Editora, 2021.
- SAUNDERS, Harry D. Energy efficiency: What has research delivered? *Annual Review of Environment and Resources*, v. 46, p. 135–160, 2021.
- SCHELLNHUBER, H. J.; RAHMSTORF, S.; WINKELMANN, R. Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 7, p. 649–653, 2016.
- SCHIPPER, L.; MARIE, L. Mind the gap! The vicious circle of measuring automobile fuel use. *Energy Policy*, v. 61, p. 894–902, 2013.
- SCHIPPER, L.; TAX, W. Automobile fuel economy and CO₂ emissions in industrialized countries: encouraging trends through 2008? *Transport Policy*, v. 18, n. 2, p. 358–372, 2011.
- SCHRAMM, H.-J.; FLEISCHMANN, M. Sustainable Freight Transport: An Overview of Carbon Reduction Strategies. Heidelberg: Springer, 2019.
- SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões do Setor de Transportes: Relatório Analítico 2023. São Paulo: Observatório do Clima, 2023.
- SHAHRARI, Hamed Shahraki; BACHMANN, Chris. Designing computable general equilibrium models for transportation applications. *Transport Reviews*, v. 38, n. 3, p. 282–308, 2018.
- SEARCHINGER, T. et al. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, v. 319, n. 5867, p. 1238–1240, 2008.
- SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões do setor de transportes – Séries históricas 1990–2019. Observatório do Clima, 2023.

SHMAYSANI, M. et al. Energy management system for DC railway smart grid integrating PV and storage. *Applied Energy*, 2025.

SILVA, F. G. F.; MACAMBIRA, J. K.; ROCHA, C. H. Medindo a eficiência produtiva do transporte por ferrovias brasileiras: uma aplicação dos modelos DEA e Tobit. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, v. 49, n. 3, p. 1-28, 2019.

SILVEIRA, J. M. da. Ferrovias e integração nacional: história e economia. São Paulo: Annablume, 2002.

SILVEIRA, Márcio Rogério da. Transporte e logística: as ferrovias no Brasil. *Geosul*, v. 17, n. 34, p. 119–140, 2002.

SIMS, R.; SCHAEFFER, R.; et al. Transport. In: EDENHOFER, O. et al. (org.). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

SPATARI, S. et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel. *Environmental Science & Technology*, v. 56, n. 7, p. 4029–4041, 2022.

TOURINHO, O. A. F.; KUME, H.; PEDROSO, A. C. DE S. Elasticidades de Armington para o Brasil: 1986–2002. *Revista Brasileira de Economia*, v. 61, n. 2, p. 245–267, 2007.

TECNÓLOGA LOGÍSTICA. Estudo de caso: Medidor de consumo nas locomotivas da EFVM. Belo Horizonte, 2018.

TOYOSHIMA, Silvia; FERREIRA, Marcos José. Encadeamentos do setor de transportes na economia brasileira. *Planejamento e Políticas Públicas*, n. 25, p. 139–166, jun./dez. 2002.

UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. *Railways and Biofuels: Final Report*. Paris: UIC Energy and Environment Department, 2007.

UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. *Railway Energy Efficiency and CO₂ Emissions Benchmarking*. Paris: UIC, 2022.

UNCTAD. *Review of Maritime Transport 2023*. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. *Emissions Gap Report 2022*. Nairobi: UNEP, 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. *NDC Synthesis Report 2022*. Bonn: UNFCCC, 2022.

VALE. Vale amplia teste de locomotivas 100% elétricas. Rio de Janeiro: Vale, 2022a.

Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-amplia-teste-de-locomotivas-100-eletricas>.

VALE. Parceria com Wabtec para locomotivas elétricas e estudos de combustíveis alternativos. Rio de Janeiro: Vale, 2023. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-assina-parceria-com-wabtec-para-desenvolvimento-de-estudos-de-combustiveis-alternativos-e-compra-de-tres-locomotivas-eletricas-flxdrive>.

VALE. Portal ESG: Estratégia e gestão para descarbonização. Rio de Janeiro: Vale, 2024.

Disponível em: <https://vale.com/pt/esg/estrategia-e-gestao-para-descarbonizacao>.

VALE. Relatório de Emissões Escopos 1, 2 e 3: ano-base 2021. Rio de Janeiro: Vale, 2022b.

VALE. Relatório de Sustentabilidade 2015. Rio de Janeiro: Vale, 2016.

VALE. Relatório de Sustentabilidade 2016. Rio de Janeiro: Vale, 2017.

VENABLES, A. J. Evaluating urban transport improvements: Cost-benefit analysis in the presence of agglomeration and income taxation. *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 41, n. 2, p. 173–188, 2007.

VICKERMAN, R. Infrastructure and regional development: debating the impact. *Regional Studies*, v. 52, n. 12, p. 1740–1749, 2018.

VILLEN, Felipe Borim; FERREIRA, Tiago Toledo; NUNES, Bernardo Furtado; DALTO, Edson José; PINTO, Marco Aurélio Cabral; COSTA, Paulo Marcelo Machado. Descarbonização no transporte de cargas: alteração estrutural da matriz logística versus ganhos de eficiência nos modos de transporte. In: *Descarbonização dos transportes – Perspectivas diante da transição energética*. Rio de Janeiro: BNDES, 2024, p. 133-151.

VLI LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2020–2021. Belo Horizonte: VLI, 2021.

VLI LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2022. Belo Horizonte: VLI, 2022.

VLI LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2023. Belo Horizonte: VLI, 2023.

VLI LOGÍSTICA. Relatório de Sustentabilidade 2024. Belo Horizonte: VLI, 2024.

WABTEC. Wabtec and Rumo Partner to Modernize Brazilian Rail. *Wabtec News*, 2021.

WANG, Xian; LIU, Junfeng; WU, Huihuang; HU, Xiurong; WANG, Yuqing; LIU, Ying; MA, Jianmin; TAO, Shu. Decarbonizing China's freight sector: Spatial impacts of carbon taxation on trade patterns and production allocation in a CGE framework. *Earth's Future*, v. 13, e2025EF006300, 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. State of the Global Climate 2021. Geneva: WMO, 2021.

WORLD BANK. Railway Reform Toolkit for Improving Rail Sector Performance. Washington, D.C.: World Bank, 2023.

WORLD BANK. Climate Change and Development Report. Washington, DC: World Bank, 2023.

WORLD BANK. Connecting to Compete: Trade Logistics in the Global Economy – The Logistics Performance Index 2018. Washington, DC: World Bank, 2018. Disponível em: <https://lpi.worldbank.org/report>. Acesso em: 9 out. 2025.

WORLD BANK. Decarbonizing Transport in Emerging Economies. Washington, DC: World Bank, 2023.

WORLD BANK. Financing the Low-Carbon Transition. Washington, DC: World Bank, 2022.

ZHANG, Y. Carbon Lock-In Mechanisms in Transport Infrastructure. Buildings, v. 15, n. 10, p. 1714, 2025.

ZOU, G.; CHAU, K. W. Long- and Short-Run Effects of Fuel Prices on Freight Transportation Volumes in Shanghai. Sustaina