

Impactos econômicos e descarbonização das práticas de eficiência energética do setor ferroviário de carga no Brasil¹

Amanda Leone Rodrigues²

Rosa Livia Gonçalves Montenegro³

Admir Antonio Betarelli Junior⁴

Resumo: Este estudo avalia os efeitos econômicos e ambientais de melhorias de eficiência energética no transporte ferroviário de carga brasileiro. Utiliza-se um modelo EGC dinâmico-recursivo que representa individualmente as 12 concessionárias ferroviárias de carga do país. Simulam-se, entre 2026 e 2040, reduções anuais de 1,5% e 3,0% no consumo específico de combustível. Até 2040, o consumo de diesel diminui em 324,48 mil m³ e 617,86 mil m³, enquanto as emissões evitadas alcançam 945,47 mil e 1,80 milhão de tCO₂e. Os preços médios do frete caem 3,20% e 6,09%, e a atividade ferroviária aumenta em 62,64 milhões e 120,09 milhões de TKU. A heterogeneidade dos resultados reforça a importância de estratégias específicas por concessionária.

Palavras-chave: Transporte ferroviário de carga. Eficiência energética. Emissões. Modelo EGC dinâmico-recursivo.

Abstract: This study evaluates the economic and environmental effects of energy-efficiency improvements in Brazil's freight rail sector. A recursive-dynamic CGE model individually represents all 12 freight rail concessionaires in the country. Two scenarios are simulated for 2026–2040, with annual reductions of 1.5% and 3.0% in specific fuel consumption. By 2040, diesel use falls by 324.48 and 617.86 thousand m³, while avoided emissions reach 945.47 thousand and 1.80 million tCO₂e. Average freight prices decline by 3.20% and 6.09%, and rail activity increases by 62.64 and 120.09 million net tonne-kilometers. The heterogeneous results highlight the importance of concessionaire-specific energy-efficiency strategies.

Keywords: Freight rail transport. Energy efficiency. Emissions. Recursive-dynamic CGE model.

Área de avaliação: Economia Regional

Classificação JEL: L92; C68; Q43; Q54.

¹ Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido por meio do Projeto nº APQ-02343-22, vinculado à Chamada de Demanda Universal, Edital nº 001/2022, que tornou possível a realização desta pesquisa.

² Doutoranda em Economia pela Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. E-mail: amanda.leone@estudante.ufjf.br

³ Professora de Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. E-mail: rosa.montenegro@ufjf.br

⁴ Professor de Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. E-mail: admir.betarelli@ufjf.br

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm reforçado a necessidade de reduzir emissões e acelerar transformações nos setores de energia, indústria e transportes (IPCC, 2022; UNEP, 2022). Em sua segunda Contribuição Nacionalmente Determinada, apresentada em 2024, o Brasil reafirmou o objetivo de alcançar a neutralidade climática até 2050 (BRASIL, 2024). As emissões associadas ao uso de energia representam 23,2% das emissões nacionais e, nesse conjunto, o transporte de cargas responde por 51% (VILLEN et al., 2024). Em 2023, apenas 22,5% da energia consumida nos transportes tinha origem renovável, enquanto óleo diesel e gasolina representaram, juntos, 71,2% do consumo setorial (EPE, 2024). Nesse contexto, o transporte ferroviário apresenta menor intensidade energética e de emissões por tonelada-quilômetro do que o rodoviário, especialmente em fluxos de grande volume e longa distância (SIMS et al., 2014; IPCC, 2022).

No Brasil, a produção ferroviária de cargas aumentou de aproximadamente 238,4 bilhões de toneladas-quilômetro úteis (TKU), em 2006, para 398,3 bilhões, em 2024, crescimento de 67%, com forte concentração em minério de ferro e grãos agrícolas (ANTT, s.d.). Essa expansão ocorreu de forma heterogênea entre concessionárias, que atendem corredores e mercados de carga distintos (ANTT, s.d.). Além disso, a composição das cargas e as características operacionais dos trens influenciam o consumo energético ferroviário (TOLLIVER; LU; BENSON, 2013; LEBEDEVAS et al., 2017). Apesar da maior eficiência relativa do modal, a operação ferroviária de cargas no país permanece fortemente dependente do óleo diesel, conforme indicam os dados de consumo de combustível reportados pelas concessionárias à ANTT (ANTT, s.d.). Assim, reduções no consumo por unidade transportada não garantem, isoladamente, queda das emissões totais quando o crescimento do tráfego supera os ganhos de eficiência (SORRELL, 2009; IPCC, 2022).

A eletrificação da malha, a adoção de tecnologias de tração de baixo carbono e a renovação do material rodante são estratégias relevantes para a descarbonização ferroviária, mas sua implementação em larga escala exige investimentos em infraestrutura, veículos e sistemas de fornecimento de energia (IEA, 2019; ITF, 2021). Em contraste, ganhos de eficiência operacional podem ser incorporados gradualmente à rede existente por meio de estratégias de condução e programação, gestão da tração, manutenção dos ativos e melhor utilização da capacidade dos trens (DOUGLAS et al., 2015; SCHEEPMAKER; GOVERDE; KROON, 2017; LEBEDEVAS et al., 2017). Concessionárias brasileiras já reportam iniciativas nessa direção, incluindo reduções nas emissões específicas, testes com locomotivas híbridas e ferramentas de modelagem operacional voltadas à diminuição do consumo de diesel (MRS LOGÍSTICA, 2024; RUMO LOGÍSTICA, 2024; VLI LOGÍSTICA, 2022).

Os efeitos desses ganhos, entretanto, não se limitam à economia de combustível e à redução das emissões diretas. A diminuição do consumo de diesel reduz os custos

operacionais e pode ser transmitida aos preços do frete. Alterações nos custos e nas tarifas ferroviárias, por sua vez, podem afetar a produção, o investimento, o comércio exterior e os setores mais intensivos no uso da ferrovia (BETARELLI; DOMINGUES; HEWINGS, 2020).

A literatura ainda trata de forma predominantemente separada as dimensões operacional e econômica da eficiência ferroviária. Estudos de engenharia quantificam o consumo de energia, o desempenho das locomotivas e os efeitos de estratégias de condução, programação e gestão da tração, mas geralmente restringem a análise ao sistema ferroviário (DOUGLAS et al., 2015; SCHEEPMACKER; GOVERDE; KROON, 2017; LEBEDEVAS et al., 2017). Modelos econômicos aplicados ao transporte captam efeitos sobre custos, produção, investimento e comércio, mas normalmente representam as intervenções por meio de mudanças agregadas em produtividade, tarifas ou infraestrutura, sem vinculá-las diretamente ao consumo físico de combustível por unidade transportada e, em geral, sem distinguir individualmente as concessionárias ferroviárias (ROBSON; WIJAYARATNA; DIXIT, 2018; SHAHRAKI; BACHMANN, 2018; BETARELLI; DOMINGUES; HEWINGS, 2020). Permanece, portanto, uma lacuna na quantificação integrada dos efeitos operacionais, setoriais e macroeconômicos decorrentes de reduções físicas no consumo específico de diesel ferroviário.

Este artigo busca preencher essa lacuna ao avaliar os efeitos econômicos, energéticos e ambientais de ganhos graduais de eficiência energética no transporte ferroviário de cargas brasileiro, considerando sua distribuição entre concessionárias e setores produtivos. A análise utiliza o BIM-T, um modelo de Equilíbrio Geral Computável dinâmico-recursivo que representa individualmente as 12 concessionárias ferroviárias de carga do país (BETARELLI JUNIOR, 2022). Calibrado com a Matriz Insumo-Produto de 2015 (IBGE, 2018) e complementado por dados físicos e financeiros da ANTT e das operadoras, o modelo incorpora a produção em TKU e o consumo físico de diesel e lubrificantes. São simuladas reduções anuais de 1,5% e 3,0% no consumo de combustível por unidade de serviço ferroviário entre 2026 e 2040. Ao introduzir esses ganhos diretamente nos coeficientes técnicos de combustível de cada concessionária, a análise conecta um indicador operacional observável aos mecanismos de transmissão de um modelo econômico dinâmico, preservando a heterogeneidade entre operadores e corredores.

Em 2040, os cenários reduzem o consumo ferroviário de diesel em 20,16% e 38,39% e as emissões do setor em 8,40% e 15,99%, respectivamente, em relação ao cenário de referência. Os preços médios do frete recuam 3,20% e 6,09%, enquanto a produção ferroviária agregada aumenta. Os efeitos, contudo, não se distribuem uniformemente: as respostas do tráfego, do investimento e do retorno esperado variam entre concessionárias, e os impactos econômicos concentram-se em cadeias minerais, metalúrgicas e exportadoras intensivas em logística.

A principal contribuição do estudo consiste em integrar indicadores físicos e operacionais do setor ferroviário a um modelo de equilíbrio geral, permitindo avaliar efeitos intrassetoriais, intersetoriais e macroeconômicos. Além desta introdução, a Seção 2

apresenta a revisão da literatura; a Seção 3 descreve o modelo, a base de dados e os cenários; a Seção 4 discute os resultados; e a Seção 5 apresenta as conclusões.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA FERROVIÁRIA E EFEITOS ECONÔMICOS

2.1 Eficiência energética e descarbonização ferroviária

A descarbonização do transporte pode ocorrer por meio da substituição modal, da transição para fontes energéticas de menor intensidade de carbono e de ganhos de eficiência energética (ITF, 2021; IEA, 2023). No transporte ferroviário, a eletrificação, o uso de combustíveis alternativos e a renovação do material rodante representam estratégias relevantes, mas exigem investimentos elevados em infraestrutura, veículos e sistemas de fornecimento de energia. Em sistemas predominantemente dependentes de locomotivas diesel-elétricas, como o brasileiro, melhorias operacionais constituem uma alternativa de implementação mais gradual.

A eficiência energética ferroviária pode ser ampliada por meio da modernização tecnológica, da condução eficiente, da otimização da circulação dos trens, da gestão da tração, da manutenção dos ativos e do aumento da carga transportada por composição (GONZÁLEZ-GIL; PALACÍN; BATTEN, 2013; DOUGLAS et al., 2015; SCHEEPMAKER; GOVERDE; KROON, 2017; LEBEDEVAS et al., 2017). Seus resultados podem ser mensurados pelo consumo de combustível por unidade de transporte, relacionando o volume físico de diesel utilizado à produção expressa em toneladas-quilômetro úteis.

Os efeitos desses ganhos não se restringem à redução direta do consumo de energia e das emissões. A menor utilização de combustível reduz os custos operacionais das concessionárias e pode afetar os preços dos serviços ferroviários, a demanda por transporte, o investimento e a competitividade dos setores usuários da ferrovia. Parte da economia inicial de energia pode, entretanto, ser compensada pelo aumento da atividade econômica ou da demanda pelo serviço, mecanismo associado ao efeito rebote (SORRELL, 2009; SAUNDERS, 2021).

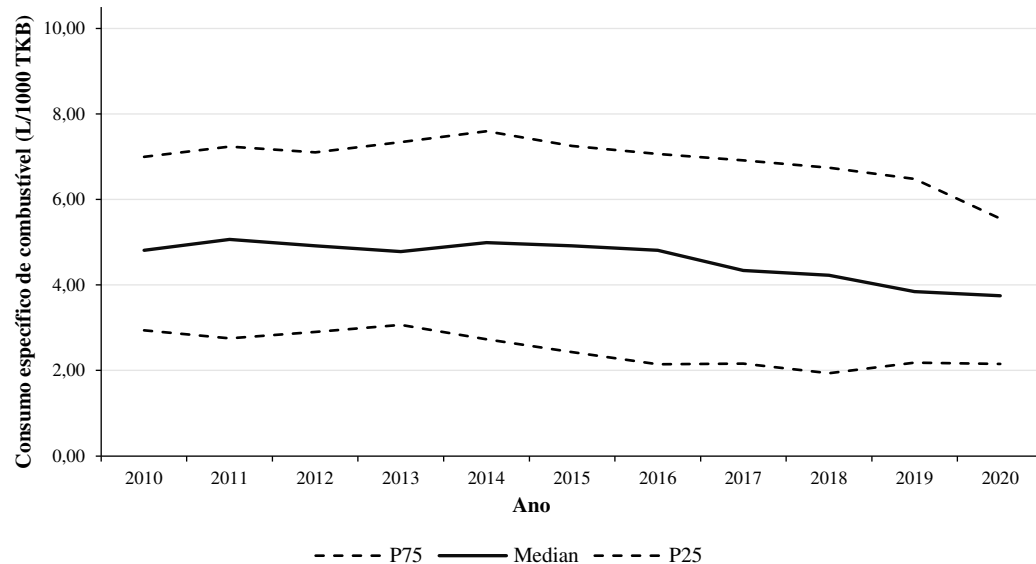
2.2 Eficiência energética no transporte ferroviário brasileiro

O transporte ferroviário de cargas brasileiro é caracterizado pela predominância de locomotivas diesel-elétricas e pela concentração da produção em corredores minerais e agrícolas de grande volume. As concessionárias apresentam diferenças de escala, perfil de carga, extensão das rotas e condições operacionais, fatores que influenciam tanto o consumo total de combustível quanto a eficiência por unidade transportada.

Nas últimas décadas, o crescimento da produção ferroviária foi acompanhado por investimentos em material rodante, infraestrutura e gestão operacional. Embora não tenha ocorrido uma transformação estrutural da matriz energética do setor, as concessionárias passaram a reportar medidas incrementais de redução do consumo específico de diesel, como melhorias na condução, otimização da formação dos trens, aumento da carga por

vagão, gestão da tração e uso mais eficiente dos ativos (MRS LOGÍSTICA, 2024; RUMO LOGÍSTICA, 2024; VLI LOGÍSTICA, 2022).

Figura 1 – Distribuição do consumo específico de diesel entre as concessionárias ferroviárias, 2010–2020



Fonte: Elaboração própria a partir de ANTT

A Figura 1 evidencia uma trajetória geral de redução do consumo específico, embora sua intensidade varie entre as concessionárias. Essa heterogeneidade pode refletir diferenças de escala, composição das cargas, perfil das vias, capacidade dos trens e estratégias operacionais. A tendência observada fundamenta a representação da eficiência energética, neste estudo, como uma redução gradual do consumo físico de combustível por unidade de serviço ferroviário.

2.3 Estudos aplicados sobre eficiência energética, descarbonização e transporte

Os estudos sobre eficiência ferroviária podem ser divididos em duas linhas principais. A primeira analisa o desempenho tecnológico e operacional, quantificando o consumo de energia, as emissões e os efeitos de estratégias de condução, programação e gestão da tração (LIIMATAINEN; PÖLLÄNEN, 2010; DOUGLAS et al., 2015; LEBEDEVAS et al., 2017). Esses trabalhos oferecem detalhamento físico e operacional, mas geralmente restringem seus resultados ao próprio sistema de transporte.

A segunda linha utiliza modelos econômicos para avaliar alterações na infraestrutura, nas tarifas, nos custos logísticos e na produtividade do transporte. Modelos de Equilíbrio Geral Computável permitem captar efeitos sobre produção, investimento, comércio e renda, considerando as relações entre o transporte e os demais setores da economia (ROBSON; WIJAYARATNA; DIXIT, 2018; SHAHRAKI; BACHMANN, 2018; BETARELLI; DOMINGUES; HEWINGS, 2020). Em geral, entretanto, essas intervenções são representadas por choques agregados de produtividade ou redução de custos, sem conexão direta com indicadores físicos de consumo de combustível e sem desagregação individual das concessionárias.

Existe, portanto, uma lacuna entre a mensuração operacional da eficiência ferroviária e a avaliação de seus efeitos econômicos sistêmicos. Este estudo procura aproximar essas duas abordagens ao inserir reduções no consumo específico de diesel em um modelo EGC dinâmico-recursivo com representação individual das concessionárias ferroviárias brasileiras.

3. METODOLOGIA E DADOS

A análise utiliza o BIM-T (Brazilian Intersectoral Model and Transport), um modelo nacional de Equilíbrio Geral Computável dinâmico-recursivo, desenvolvido a partir da tradição de Johansen e da estrutura ORANIG-RD (JOHANSEN, 1960; HORRIDGE, 2002; BETARELLI JUNIOR, 2022). O modelo representa as decisões interdependentes de produtores, investidores, famílias, governo e setor externo. Os produtores minimizam custos sujeitos à tecnologia disponível, enquanto a dinâmica recursiva ocorre principalmente por meio da acumulação de capital e da alocação setorial do investimento. O estoque de capital é atualizado anualmente, e o investimento responde à diferença entre as taxas esperada e normal de retorno. Dessa forma, alterações persistentes nos custos ferroviários podem afetar a produção, a rentabilidade e a trajetória de investimento das concessionárias e dos setores usuários do transporte.

O banco de dados parte da Matriz de Insumo-Produto brasileira de 2015 e de informações do Sistema de Contas Nacionais e da Pesquisa Anual de Serviços (IBGE, 2018). A atividade de transporte terrestre de cargas foi desagregada entre os serviços rodoviário, ferroviário e dutoviário. Posteriormente, o transporte ferroviário foi dividido entre 12 concessionárias, resultando em uma base com 73 produtos e 52 setores econômicos. As margens ferroviárias foram distribuídas entre produtos e concessionárias com base nos fluxos de toneladas-quilômetro úteis, nas distâncias percorridas e nas tabelas tarifárias da ANTT, mantendo-se as receitas totais consistentes com as demonstrações financeiras regulatórias de cada operadora.

A extensão ferroviária da base incorpora, além dos fluxos monetários, medidas físicas de produção em toneladas-quilômetro úteis (TKU) e de consumo de diesel e outros insumos energéticos por concessionária. Essa integração conecta as mudanças físicas no consumo de combustível à estrutura de custos de cada empresa, preservando diferenças de escala, perfil de carga e utilização de insumos.

O BIM-T também contém um módulo ambiental baseado nos modelos MMRF e BeGreen (ADAMS et al., 2010; MAGALHÃES, 2013). As quantidades físicas de diesel-biodiesel e lubrificantes utilizadas pelas concessionárias são convertidas em emissões de gases de efeito estufa por meio dos fatores disponibilizados pelo Programa Brasileiro GHG Protocol. Assim, as mudanças endógenas no consumo desses insumos são diretamente convertidas em variações nas emissões ferroviárias.

3.1 Cenário de referência e construção dos cenários de eficiência

O BIM-T é solucionado sequencialmente para cada ano do horizonte de análise. As simulações compreendem um cenário de referência, denominado *baseline*, e dois cenários

de eficiência energética. Os impactos são calculados pela diferença entre cada cenário de política e a trajetória de referência.

Entre 2016 e 2024, a base é atualizada com as variações observadas do PIB, consumo das famílias, consumo do governo, investimento, exportações, emprego e população. O ano de 2025 constitui o primeiro período prospectivo do *baseline*. Para 2025–2040, assume-se crescimento anual de 2,2% para o PIB e para o consumo do governo e crescimento médio de 0,2% para a população. As demais variáveis macroeconômicas são determinadas endogenamente pelo modelo. Os cenários de eficiência preservam essas hipóteses, diferenciando-se do *baseline* somente pela redução na quantidade de combustível necessária por unidade de serviço ferroviário entre 2026 e 2040.

A construção dos cenários utiliza o indicador de consumo específico de diesel reportado pela ANTT, expresso em litros por mil toneladas-quilômetro brutas (L/1.000 TKB). A TKB inclui tanto a carga útil quanto o material rodante e, por isso, é utilizada como indicador de desempenho energético da operação. No modelo, por sua vez, a produção comercial ferroviária é expressa em TKU, que considera apenas a carga útil transportada.

A evolução histórica desse indicador é apresentada na Figura 1, na Seção 2. Para a calibração dos cenários, calculou-se, para cada concessionária, a taxa média anual composta de variação do consumo específico entre 2015 e 2020:

$$CAGR_c = \left(\frac{CE_{c,2020}}{CE_{c,2015}} \right)^{1/5} - 1$$

em que $CE_{c,2015}$ e $CE_{c,2020}$ representam o consumo específico de diesel da concessionária no início e no final do período. Valores negativos indicam redução no consumo de combustível por unidade de atividade.

As trajetórias apresentaram heterogeneidade entre as concessionárias. O conjunto utilizado na calibração registrou redução média de aproximadamente 2,05% ao ano, mediana de 2,4% e desvio-padrão de cerca de 1,07 ponto percentual. Variações extremas não foram extrapoladas, pois podem estar associadas a processos temporários de reestruturação, expansão de escala ou renovação de ativos.

Com base na região central dessa distribuição, foram definidos dois cenários:

- **cenário moderado:** redução anual de 1,5% no consumo de combustível por unidade de serviço ferroviário;
- **cenário ambicioso:** redução anual de 3,0%.

O primeiro representa a continuidade conservadora de ganhos incrementais, enquanto o segundo corresponde à difusão mais ampla das melhores trajetórias sustentadas observadas entre as concessionárias. Ambos são aplicados anualmente entre 2026 e 2040.

3.2 Implementação dos choques e mensuração dos impactos

Os cenários não representam programas predeterminados de eletrificação, substituição de combustíveis, expansão da frota ou aquisição de locomotivas. Também não impõem volumes exógenos de investimento. Eles representam exclusivamente trajetórias de

redução na quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de serviço ferroviário.

Essas reduções podem resultar de melhorias na condução dos trens, gestão da tração e do tráfego, formação das composições, carregamento, manutenção dos ativos e utilização de sistemas de apoio à operação. O modelo não determina a combinação específica de medidas responsável por cada trajetória, mas estima as consequências econômicas de reduções persistentes e empiricamente plausíveis no consumo específico.

No BIM-T, o choque é introduzido nos coeficientes técnicos de utilização de diesel-biodiesel e de outros produtos do refino pelas concessionárias. Para uma taxa anual de eficiência s , o coeficiente técnico no cenário de política é definido por:

$$a_{f,c,t}^{política} = a_{f,c,t}^{baseline} (1 - s)^{t-2025}$$

em que $a_{f,c,t}$ representa a quantidade do combustível f requerida pela concessionária c para produzir uma unidade de serviço ferroviário no ano t , e s assume os valores de 0,015 ou 0,030.

O choque reduz a quantidade de combustível necessária para determinado nível de produção. Não se trata, portanto, de uma redução exógena da tarifa ferroviária ou de um choque genérico de produtividade aplicado a todos os insumos. A queda dos custos operacionais, as mudanças nos preços dos serviços, a resposta da demanda e os efeitos sobre produção e investimento são determinados endogenamente pelo modelo.

A mesma taxa anual de eficiência é aplicada às 12 concessionárias, mas os resultados variam em função das diferenças de estrutura de custos, escala, composição das cargas e relações com os setores usuários. O investimento também é endógeno: após a redução dos custos de combustível, sua trajetória responde às mudanças na atividade e na taxa esperada de retorno de cada operadora.

Os custos necessários para alcançar os ganhos de eficiência, como aquisição de equipamentos, sistemas, treinamento ou renovação de ativos, não são explicitamente representados. Os resultados correspondem, portanto, aos efeitos econômicos brutos da eficiência energética, antes da dedução dos investimentos e gastos de implementação.

As variações agregadas do consumo de diesel, das emissões e da produção ferroviária são obtidas pela soma dos resultados das concessionárias. As economias de diesel e as emissões evitadas são apresentadas como magnitudes positivas, enquanto as demais variáveis preservam o sinal do desvio em relação ao *baseline*.

4. RESULTADOS

Os resultados são apresentados como diferenças entre cada cenário de eficiência energética e o cenário de referência em 2040. As quantidades físicas correspondem às diferenças absolutas observadas naquele ano, enquanto as variáveis percentuais representam desvios em relação à solução do *baseline*. Inicialmente, analisam-se os efeitos agregados sobre o consumo de diesel, as emissões, os preços e o tráfego

ferroviário. Em seguida, os resultados são desagregados por concessionária e por mercado de carga, antes da apresentação dos efeitos intersetoriais e macroeconômicos.

4.1 Efeitos agregados sobre o setor ferroviário

No cenário de redução anual de 1,5% no consumo específico de combustível, o consumo ferroviário de diesel em 2040 é 324,48 mil m³ inferior ao cenário de referência, o equivalente a 20,16% do consumo projetado para as 12 concessionárias. No cenário de 3%, a economia alcança 617,86 mil m³, correspondendo a 38,39% do consumo do *baseline*.

A redução da utilização de combustível diminui os custos unitários das concessionárias e se transmite aos preços dos serviços ferroviários. O preço médio do frete recua 3,20% no cenário de 1,5% e 6,09% no cenário de 3%. Simultaneamente, o tráfego ferroviário agregado aumenta em 62,64 milhões e 120,09 milhões de TKU, respectivamente. Assim, a economia de diesel não decorre de uma contração da atividade: os dois cenários combinam expansão do serviço ferroviário com redução do consumo total de combustível.

Como as emissões provenientes da combustão variam proporcionalmente à quantidade de combustível consumida no módulo ambiental, as emissões associadas ao diesel diminuem 20,16% e 38,39%. Em termos absolutos, são evitadas 945,47 mil tCO₂e no cenário de 1,5% e 1,80 milhão de tCO₂e no cenário de 3%. Quando comparadas às emissões totais das concessionárias representadas no modelo, essas reduções equivalem a 8,40% e 15,99% do total ferroviário projetado no *baseline* de 2040.

Tabela 1 – Efeitos agregados sobre combustível, emissões, preços e tráfego ferroviário em 2040

Indicador	1,5% ao ano	3,0% ao ano
Economia de diesel (mil m ³)	324,48	617,86
Economia de diesel em relação ao consumo do cenário de referência (%)	20,16	38,39
Emissões evitadas associadas ao diesel (mil tCO ₂ e)	945,47	1.800,32
Emissões evitadas associadas ao diesel como proporção das emissões ferroviárias totais do cenário de referência (%)	8,4	15,99
Variação do preço médio do frete ferroviário (%)	-3,20	-6,09
Variação do tráfego ferroviário (milhões de TKU)	62,64	120,09

Nota: As economias de diesel e as emissões evitadas são apresentadas como magnitudes positivas. As quantidades físicas correspondem às diferenças absolutas entre os cenários de eficiência e o *baseline* em 2040. A variação do preço ferroviário corresponde à média simples dos desvios percentuais observados entre as concessionárias.

Fonte: Resultados das simulações.

Em conjunto, os resultados mostram que os ganhos de eficiência permitem ampliar a atividade ferroviária com uma necessidade substancialmente menor de combustível. A resposta endógena da demanda atenua parte da economia que seria obtida com o tráfego constante, mas não elimina os benefícios energéticos e ambientais: mesmo com a

expansão do TKU, o consumo de diesel e as emissões permanecem significativamente abaixo do cenário de referência.

4.2 Efeitos por concessionária

Os resultados agregados ocultam diferenças relevantes entre as concessionárias. Embora todas recebam as mesmas reduções percentuais anuais nos coeficientes técnicos de combustível, a magnitude das economias de diesel e as respostas de preço, tráfego, atividade, retorno esperado e investimento dependem da escala inicial de cada operação, de sua estrutura de custos e dos mercados de carga atendidos.

Tabela 2 – Efeitos por concessionária em 2040 em relação ao cenário de referência

Painel A – Cenário de eficiência energética de 1,5% a.a. (2040)

Concessionária	Economia de diesel (mil m³)	Emissões evitadas (mil tCO ₂ e)	Preço do frete (%)	Tráfego (milhões de TKU)	Atividade (%)	Taxa esperada de retorno (%)	Investimento (%)
EFC	61,48	179,15	-1,97	1,65	0,25	0,11	0,59
EFPO	0,32	0,93	-4,47	0,08	0,05	0,02	0,12
EFVM	57,97	168,92	-3,09	9,87	0,2	0,09	0,48
FCA	41,94	122,19	-4,60	5,23	0,05	0,02	0,12
FNSTN	3,82	11,14	-1,96	0,43	-0,04	-0,01	-0,05
FTC	0,56	1,63	-1,70	0,28	0,04	0,02	0,12
FTL	1,86	5,41	-3,99	-0,97	-0,04	-0,01	-0,05
MRS	70,2	204,55	-3,33	41,28	0,13	0,05	0,31
RMN	45,93	133,82	-3,23	12,95	0,05	0,02	0,12
RMO	5,2	15,16	-3,04	0,09	0,08	0,03	0,18
RMP	5,92	17,26	-3,37	-8,16	-0,12	-0,03	-0,22
RMS	29,28	85,32	-3,70	-0,08	0,38	0,14	0,83
Total/média	324,48	945,47	-3,20	62,64	—	—	—

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

Fonte: Resultados da pesquisa

Painel B – Cenário de eficiência energética de 3,0% a.a. (2040)

Concessionária	Economia de diesel (mil m³)	Emissões evitadas (mil tCO ₂ e)	Preço do frete (%)	Tráfego (milhões de TKU)	Atividade (%)	Taxa esperada de retorno (%)	Investimento (%)
EFC	117,16	341,39	-3,75	3,08	0,48	0,17	1,03
EFPO	0,61	1,77	-8,50	0,14	0,09	0,03	0,21
EFVM	110,43	321,77	-5,87	18,63	0,39	0,14	0,85
FCA	79,78	232,46	-8,74	10,14	0,09	0,04	0,22
FNSTN	7,27	21,19	-3,72	0,89	-0,08	-0,01	-0,09
FTC	1,07	3,11	-3,24	0,54	0,08	0,04	0,21
FTL	3,53	10,28	-7,59	-1,84	-0,07	-0,01	-0,10
MRS	133,64	389,4	-6,33	78,68	0,25	0,09	0,54
RMN	87,37	254,59	-6,14	25,04	0,1	0,04	0,22
RMO	9,9	28,84	-5,78	0,17	0,15	0,05	0,33

RMP	11,25	32,78	-6,41	-15,47	-0,23	-0,05	-0,38
RMS	55,86	162,75	-7,03	0,08	0,76	0,25	1,54
Total/média	617,86	1.800,32	-6,09	120,09	—	—	—

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

Fonte: Resultados da pesquisa

As economias de combustível apresentam forte concentração. MRS, EFC, EFVM, RMN e FCA respondem conjuntamente por aproximadamente 85,5% da redução total de diesel nos dois cenários. Esse resultado decorre principalmente da escala inicial das operações: concessionárias com maior consumo de combustível no *baseline* apresentam maior potencial absoluto de economia quando seus coeficientes técnicos são reduzidos. Como as emissões associadas à combustão acompanham a utilização de diesel, sua distribuição reproduz essa concentração.

A escala, entretanto, não explica integralmente as respostas econômicas. A EFC apresenta a segunda maior economia absoluta de diesel, mas seu tráfego aumenta apenas 1,65 milhão de TKU no cenário de 1,5% e 3,08 milhões no cenário de 3%. A MRS, por sua vez, combina a maior economia de combustível com a maior expansão absoluta do tráfego, de 41,28 milhões e 78,68 milhões de TKU. FCA e EFPO também apresentam reduções expressivas de preço sem expansões proporcionais do volume transportado. Portanto, enquanto as economias físicas dependem fortemente da escala inicial, a resposta do tráfego também é condicionada pela composição das cargas e pela evolução dos mercados atendidos.

As respostas de rentabilidade e investimento revelam uma dimensão adicional. A RMS registra tráfego praticamente estável, mas apresenta as maiores expansões percentuais de atividade, retorno esperado e investimento. No cenário de 3%, seu TKU aumenta apenas 0,08 milhão, enquanto a atividade cresce 0,76%, a taxa esperada de retorno aumenta 0,25% e o investimento se expande 1,54%. A RMP apresenta comportamento oposto: apesar da redução do preço ferroviário, seu tráfego, atividade, retorno esperado e investimento recuam nos dois cenários. Assim, os benefícios da eficiência podem se manifestar tanto pela expansão do volume transportado quanto pela melhora da rentabilidade e da acumulação de capital.

Os resultados identificam três mecanismos principais: o efeito de escala inicial, que concentra as economias absolutas de combustível e emissões; o efeito de demanda e composição das cargas, que condiciona a resposta do tráfego; e o efeito de rentabilidade, que direciona o investimento. Esses mecanismos podem se reforçar ou produzir respostas divergentes entre as concessionárias.

4.3 Reorganização dos fluxos ferroviários e efeitos intersetoriais

A heterogeneidade entre concessionárias está associada à composição das cargas e aos mercados atendidos por cada corredor. Para evidenciar esse mecanismo, a análise detalhada do tráfego concentra-se no cenário de 3%, no qual os resultados apresentam maior magnitude. O cenário de 1,5% reproduz, em geral, a mesma direção, com efeitos menores.

Tabela 3 - 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	Total
EFC	0	0	3,59	0	0,04	-0,15	0	3,48
EFPO	0,14	0	0	0	0,01	0	0	0,15
EFVM	0	4,88	14,18	0	0,2	-0,79	0	18,47
FCA	14,6	0,64	0,76	0,17	0,4	-6,41	0,05	10,21
FNSTN	4,48	0	0,01	0,01	0,06	-3,67	0	0,89
FTC	0	0,54	0	0	0	0	0	0,54
FTL	0	0	0	0	0,17	-2,02	0	-1,84
MRS	1,3	0,4	76,64	0	1,15	-0,36	0,03	79,16
RMN	25,12	0	0	0,3	0,02	-0,65	0,3	25,09
RMO	0	0	0,09	0	0,07	0,01	0	0,17
RMP	1,59	0	0	0	0	-17,12	0,05	-15,48
RMS	10,18	0,03	0	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 expansão das cargas minerais e agrícolas resulta da combinação entre a queda do preço ferroviário e a melhora da competitividade dos setores usuários. O frete mais baixo reduz o custo de escoamento das atividades que movimentam grandes volumes e dependem intensamente da ferrovia, favorecendo sua produção e elevando a demanda derivada por transporte. O aumento do TKU decorre, portanto, tanto do barateamento do serviço quanto da expansão das cadeias atendidas.

No caso do minério de ferro, o aumento de 95,27 milhões de TKU concentra-se principalmente na MRS e na EFVM. O crescimento do transporte de milho e soja beneficia sobretudo RMN, FCA, FNSTN e RMS. O efeito líquido sobre cada concessionária, contudo, depende da importância relativa dessas cargas e da evolução dos demais produtos transportados.

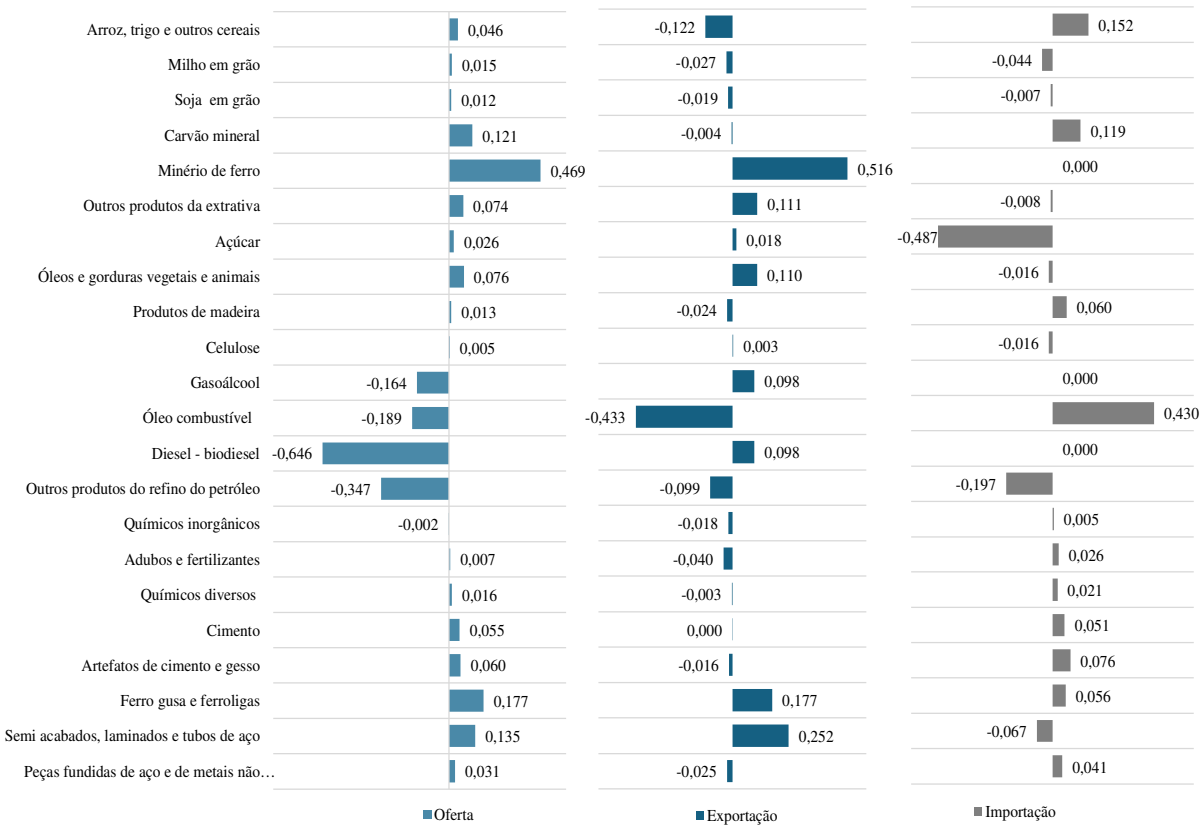
A retração dos produtos energéticos decorre diretamente do próprio ganho de eficiência. Como as concessionárias passam a utilizar menos combustível para produzir o serviço ferroviário, diminui a demanda por diesel, biodiesel e outros derivados do petróleo. O transporte ferroviário de diesel e biodiesel recua 40,76 milhões de TKU, afetando especialmente as concessionárias mais expostas aos graneis líquidos.

Esse mecanismo ajuda a explicar os resultados menos favoráveis da RMP e da FTL. Embora a eficiência reduza seus custos e preços, a demanda por parte relevante dos produtos transportados por essas empresas se contrai no novo equilíbrio. A redução do

custo do serviço, portanto, não garante expansão da atividade quando os mercados atendidos apresentam retração suficientemente intensa.

A redução dos preços ferroviários propaga-se para o restante da economia por meio das relações entre o setor de transporte, seus fornecedores e as atividades usuárias do modal. A intensidade das respostas depende da participação do frete nos custos de cada cadeia, do volume transportado e da destinação da produção entre os mercados doméstico e externo.

Figura 2 – Efeitos intersetoriais sobre produção e comércio em 2040: cenário de 3%



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

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os efeitos positivos concentram-se na cadeia mineral-metalúrgica. No cenário de 1,5%, a produção de minério de ferro aumenta 0,255% e suas exportações crescem 0,280%. No cenário de 3%, essas variações alcançam 0,469% e 0,516%. Os resultados também se estendem aos segmentos metalúrgicos a jusante, incluindo ferro-gusa, ferroligas, produtos semiacabados, laminados e tubos de aço.

Os resultados agrícolas são mais heterogêneos. Milho e soja apresentam pequenas expansões de produção, acompanhadas por redução das exportações, enquanto óleos e gorduras vegetais e animais registram aumento da produção e das vendas externas. Esses resultados mostram que a intensidade no uso da ferrovia não determina isoladamente a

resposta setorial, que também depende da demanda doméstica, dos preços relativos e da destinação da produção.

A cadeia de combustíveis apresenta resposta distinta. A menor demanda ferroviária por diesel e biodiesel reduz sua produção em 0,357% no cenário de 1,5% e em 0,646% no cenário de 3%. Ao mesmo tempo, as exportações desses produtos aumentam, pois a retração da demanda doméstica libera parte da oferta para o mercado externo. Outros produtos do refino apresentam redução tanto da produção quanto das exportações.

Em síntese, a redução do custo ferroviário realoca a atividade em favor das cadeias minerais, metalúrgicas e de outros segmentos intensivos no uso do modal. Paralelamente, atividades associadas aos combustíveis economizados reduzem sua produção ou alteram a destinação de sua oferta. Essa recomposição constitui o principal canal de transmissão entre os ganhos observados nas concessionárias e os efeitos sobre o restante da economia.

4.4 Efeitos macroeconômicos

Os impactos macroeconômicos são positivos, embora moderados em comparação com os resultados observados no setor ferroviário e nas cadeias diretamente conectadas ao modal. Esse padrão é compatível com a natureza setorial do choque, cujos efeitos se propagam por meio dos preços relativos, das relações intersetoriais e da acumulação de capital.

Tabela 4 – Efeitos macroeconômicos em 2040 em relação ao cenário de referência

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

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

Fonte: Resultados da pesquisa.

No cenário de 1,5%, o PIB real aumenta 0,016%, o investimento agregado cresce 0,037%, o estoque de capital 0,012% e o consumo das famílias 0,013%. No cenário de 3%, essas variações alcançam 0,029%, 0,066%, 0,023% e 0,022%, respectivamente.

A resposta do investimento supera a do PIB e do emprego nos dois cenários. A redução persistente dos custos logísticos melhora a rentabilidade dos setores beneficiados, estimula a formação de capital e amplia gradualmente a capacidade produtiva. O estoque de capital incorpora os efeitos acumulados das decisões de investimento realizadas ao longo do período de simulação.

O emprego nacional aumenta 0,002% no cenário de 1,5% e 0,005% no cenário de 3%, enquanto o salário real cresce 0,019% e 0,034%. O ajuste no mercado de trabalho ocorre, portanto, mais intensamente por meio da remuneração real do que pela expansão do número de trabalhadores empregados.

No setor externo, as exportações aumentam 0,019% e 0,037%, enquanto as importações crescem 0,011% e 0,018%. A resposta mais intensa das exportações é consistente com a expansão das cadeias minerais e metalúrgicas. O consumo das famílias e a utilidade também aumentam nos dois cenários, refletindo ganhos de renda real e de bem-estar.

Em conjunto, os resultados mostram que os ganhos de eficiência energética produzem três efeitos principais. Primeiro, reduzem substancialmente o consumo de diesel e as emissões associadas à operação ferroviária, mesmo diante da expansão do tráfego. Segundo, diminuem os preços dos serviços e reorganizam os fluxos entre concessionárias e mercados de carga, com resultados condicionados pela escala, pela composição das cargas e pela rentabilidade das operadoras. Terceiro, propagam-se para o restante da economia, gerando efeitos positivos sobre produção, investimento, renda real, comércio e bem-estar, embora com magnitudes moderadas no agregado nacional e concentração nas cadeias mais dependentes da logística ferroviária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo avaliou os efeitos econômicos, energéticos e ambientais de trajetórias graduais de eficiência energética no transporte ferroviário de cargas brasileiro. Para isso, utilizou-se um modelo de Equilíbrio Geral Computável dinâmico-recursivo que representa individualmente as 12 concessionárias ferroviárias de carga do país. Os ganhos de eficiência foram introduzidos como reduções anuais de 1,5% e 3,0% na quantidade de combustível necessária por unidade de serviço ferroviário entre 2026 e 2040.

Os resultados mostram que a eficiência energética permite expandir a atividade ferroviária com menor consumo total de combustível. Em 2040, a economia de diesel alcança 324,48 mil m³ no cenário de 1,5% e 617,86 mil m³ no cenário de 3,0%, correspondendo a reduções de 20,16% e 38,39% em relação ao cenário de referência. As emissões evitadas associadas ao diesel atingem 945,47 mil tCO_{2e} e 1,80 milhão de tCO_{2e}, equivalentes a 8,40% e 15,99% das emissões ferroviárias totais projetadas. Ao mesmo tempo, os preços médios dos serviços ferroviários recuam 3,20% e 6,09%, enquanto o tráfego agregado aumenta em 62,64 milhões e 120,09 milhões de TKU. Portanto, os benefícios ambientais decorrem da redução da intensidade energética do serviço, e não da retração da atividade ferroviária.

Os efeitos, contudo, não se distribuem uniformemente entre concessionárias e mercados de carga. As maiores economias absolutas de combustível e emissões concentram-se nas operadoras de maior escala, enquanto as respostas de tráfego, atividade, rentabilidade e investimento dependem da composição das cargas e da evolução dos mercados atendidos. A redução dos custos ferroviários favorece especialmente as cadeias mineral-metalúrgicas e outras atividades intensivas em logística, ao passo que a menor demanda por diesel e

derivados provoca retração ou reorganização das atividades ligadas ao fornecimento desses combustíveis. Assim, uma mesma trajetória de eficiência pode produzir resultados distintos entre operadores e corredores ferroviários.

Os efeitos macroeconômicos são positivos, embora moderados, o que é compatível com a natureza setorial do choque. Em 2040, o PIB real aumenta 0,016% e 0,029%, enquanto o investimento agregado cresce 0,037% e 0,066% nos cenários de 1,5% e 3,0%, respectivamente. A resposta relativamente mais intensa do investimento indica que a acumulação de capital constitui um canal relevante de transmissão dos ganhos de eficiência no longo prazo. Também são observados aumentos do consumo das famílias, dos salários reais, das exportações e do bem-estar.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que metas gerais de redução do consumo específico devem ser acompanhadas por avaliações próprias para cada concessionária, corredor e mercado de carga. A economia potencial de diesel não é suficiente para determinar o desempenho econômico de uma operadora, pois os resultados também dependem da capacidade de absorção de tráfego, da composição dos fluxos transportados e da evolução das cadeias produtivas atendidas. Estratégias de eficiência energética devem, portanto, considerar simultaneamente aspectos operacionais, comerciais e de capacidade ferroviária.

Os resultados devem ser interpretados como efeitos econômicos brutos de equilíbrio de longo prazo. Os cenários não identificam tecnologias específicas nem incorporam os investimentos, custos de implementação e necessidades de financiamento necessários para alcançar as trajetórias simuladas. O modelo também não reproduz integralmente gargalos físicos de capacidade, contratos particulares ou decisões estratégicas de cada concessionária. Pesquisas futuras podem incorporar custos tecnológicos, restrições de infraestrutura, substituição modal, expansão da rede e uma representação espacial mais detalhada dos corredores ferroviários, permitindo avaliar os benefícios líquidos e a viabilidade econômica das diferentes estratégias de descarbonização.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Philip D.; DIXON, Janine M.; GIESECKE, James A.; HORRIDGE, Mark J. **MMRF: Monash Multi-Regional Forecasting Model: a dynamic multi-regional model of the Australian economy**. Melbourne: Centre of Policy Studies, Victoria University, 2010. (Working Paper G-223).

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Sistema de Acompanhamento e Fiscalização do Transporte Ferroviário – SAFF/SIADE: dados operacionais das concessionárias ferroviárias**. Brasília, DF: ANTT, [s.d.].

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. **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, Belo Horizonte, 2013.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio; DOMINGUES, Edson Paulo; HEWINGS, Geoffrey John Dennis. 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.

BRASIL. **Segunda Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil – NDC**. Brasília, DF: Governo Federal, 2024.

DOUGLAS, Heather; ROBERTS, Clive; HILLMANSEN, Stuart; SCHMID, Felix. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. **Energy Conversion and Management**, v. 106, p. 1.149–1.165, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional 2024: relatório síntese, ano-base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – FGV. **Ferramenta de cálculo de emissões de gases de efeito estufa: Programa Brasileiro GHG Protocol**. São Paulo: FGVces, [s.d.].

GONZÁLEZ-GIL, Arturo; PALACIN, Roberto; BATTY, Paul. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 374–388, 2013.

HORRIDGE, Mark. **ORANIG-RD: a recursive dynamic version of ORANI-G**. Melbourne: Centre of Policy Studies, Monash University, 2002.

IBGE. **Matriz de Insumo-Produto: Brasil 2015**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018.

IBGE. **Pesquisa Anual de Serviços 2015**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017.

IBGE. **Sistema de Contas Nacionais**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **The Future of Rail: opportunities for energy and the environment**. Paris: IEA, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM – ITF. **ITF Transport Outlook 2021**. Paris: OECD Publishing, 2021.

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.

JOHANSEN, Leif. **A Multi-Sectoral Study of Economic Growth**. Amsterdam: North-Holland, 1960.

LEBEDEVAS, Sergejus; DAIL YDKA, Stasys; JASTREMSKAS, Virgilijus; RAPALIS, Paulius. Research of energy efficiency and reduction of environmental pollution in freight rail transportation. **Transport**, v. 32, n. 3, p. 291–301, 2017.

LIIMATAINEN, Heikki; PÖLLÄNEN, Markus. Trends of energy efficiency in Finnish road freight transport 1995–2009 and forecast to 2016. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7.676–7.686, 2010.

MAGALHÃES, Aline Souza. **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) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MRS LOGÍSTICA. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Juiz de Fora: MRS Logística, 2024.

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.

RUMO LOGÍSTICA. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2024**. Curitiba: Rumo Logística, 2024.

SAUNDERS, Harry D. et al. Energy efficiency: what has research delivered in the last 40 years? **Annual Review of Environment and Resources**, v. 46, p. 135–165, 2021.

SCHEEPMAKER, Gerben M.; GOVERDE, Rob M. P.; KROON, Leo G. Review of energy-efficient train control and timetabling. **European Journal of Operational Research**, v. 257, n. 2, p. 355–376, 2017.

SHAHRAKI, Hamed Shahrokhi; BACHMANN, Chris. Designing computable general equilibrium models for transportation applications. **Transport Reviews**, v. 38, n. 6, p. 737–764, 2018.

SIMS, Ralph et al. Transport. In: EDENHOFER, Ottmar et al. (ed.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 599–670.

SORRELL, Steve; DIMITROPOULOS, John; SOMMERVILLE, Matt. Empirical estimates of the direct rebound effect: a review. **Energy Policy**, v. 37, n. 4, p. 1.356–1.371, 2009.

TOLLIVER, Denver; LU, Pan; BENSON, Douglas. **Analysis of Railroad Energy Efficiency in the United States**. Fargo: Upper Great Plains Transportation Institute, North Dakota State University, 2013. (MPC Report n. 13-250).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies**. Nairobi: UNEP, 2022.

VILLEN, Felipe Borim; FERREIRA, Tiago Toledo; NUNES, Bernardo Furtado; DALTO, Edson José; PINTO, Marco Aurélio Cabral; COSTA, Paulo Marcelo Raposo Machado. Descarbonização no transporte de cargas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. 5–55, set. 2024.

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