ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO TRANSPORTE DE CARGAS: EMISSÕES DE CO_2 E CUSTOS FINANCEIROS ENTRE OS MODAIS RODOVIÁRIO E FERROVIÁRIO NA BR-262/MS EM CENÁRIO DE MODERNIZAÇÃO DA MALHA OESTE

Bruno de Macedo Barbato[1], Andréa T. R. Barbosa[1], Erlandson Ferreira Saraiva[1]

[1]Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande – MS, Brasil (e-mail: bruno.barbato@ufms.br)

Resumo: A eficiência energética no transporte de cargas é estratégica para reduzir emissões e custos logísticos. Este estudo compara os modais rodoviário e ferroviário no trecho Corumbá–Campo Grande (BR-262/MS), considerando emissões de CO_2, consumo de diesel e custos financeiros. Foram utilizados dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT, 2023) e a metodologia de Silva et al. (2020), baseada em fatores de consumo, emissão e custos por tonelada-quilômetro útil (TKU). Devido à indisponibilidade de dados operacionais da concessionária, o desempenho ferroviário foi estimado para um cenário hipotético de modernização da Malha Oeste. Os resultados indicam que, sob as hipóteses adotadas, o modal ferroviário pode reduzir aproximadamente 30% das emissões de CO_2 e do consumo de diesel, além de proporcionar economias superiores a 50% nos custos de transporte. Os resultados reforçam o potencial da modernização da Malha Oeste para ampliar a eficiência energética e a sustentabilidade logística regional.

Palavras-chave: eficiência energética; emissões de CO_2; transporte ferroviário; custos logísticos; BR-262

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm se consolidando como uma das maiores ameaças globais do século XXI. Entre os principais fatores que contribuem para o agravamento do efeito estufa está a crescente emissão de dióxido de carbono (CO_2), resultado direto da queima de combustíveis fósseis em processos industriais e no setor de transportes. Nesse contexto, a eficiência energética na indústria de transportes ganha protagonismo, uma vez que o setor é responsável por parcela significativa do consumo energético mundial e, particularmente no Brasil, responde por cerca de 44% do consumo de derivados de petróleo (EPE, 2018).

O setor de transportes é a segunda maior fonte de emissões de CO_2 em todo o mundo, contribuindo com 25% do total de emissões relacionadas à energia (UNEP, 2022), devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis. A literatura científica nacional e internacional vem reforçando a necessidade de diversificação da matriz de transporte como medida de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, Bartholomeu et al. (2023) avaliam estratégias de logística sustentável voltadas à redução das emissões de CO_2 no transporte rodoviário de cargas, reforçando a relevância da transição para modais mais eficientes. Apesar dos avanços tecnológicos e das discussões internacionais, o aumento da demanda por transporte de cargas continua a pressionar a matriz logística nacional, predominantemente rodoviária. Essa predominância gera não apenas impactos ambientais relevantes, como também implica em altos custos logísticos e riscos à segurança viária, comprometendo a competitividade da indústria brasileira.

A eficiência ambiental e econômica dos modais de transporte constitui um dos pontos-chave na construção de uma infraestrutura verdadeiramente sustentável. Nesse contexto, o modal ferroviário ressurge como uma alternativa promissora, não apenas pela capacidade de transportar grandes volumes de carga com menor consumo de energia por tonelada-quilômetro (TKU), mas também pelo potencial de redução significativa das emissões de CO_2 e dos custos logísticos. Estudos como Kuzior e Staszek (2021) destacam que o transporte ferroviário consome menos de 2% da energia do setor, com eficiência energética até 8 vezes superior ao modal rodoviário. Essa eficiência é atribuída à capacidade de transportar grandes volumes com menor consumo específico de energia, além da possibilidade de integração com fontes energéticas mais limpas.

No contexto brasileiro, o transporte ferroviário de cargas desempenha um papel estratégico, porém ainda subutilizado, na matriz logística nacional. As ferrovias respondem por apenas 20% do transporte de cargas no país, um percentual significativamente inferior ao de nações com sistemas logísticos mais equilibrados.

Apesar dessa participação limitada, as ferrovias destacam-se por sua alta eficiência ambiental, sendo um pilar essencial para o escoamento de *commodities* de alto volume, como grãos, minério de ferro e produtos agroindustriais. De acordo com a ANTF (2024), as emissões das ferrovias de carga representam apenas 2,63% do total de Gases de Efeito Estufa gerados pelo setor de transportes no Brasil.

Essa eficiência ambiental decorre da menor intensidade de carbono do modal ferroviário. Em média, as ferrovias emitem 8,35 gCO_2/TKU, uma fração dos 52,77 gCO_2/TKU emitidos pelo transporte rodoviário, que domina com cerca de 60% das cargas transportadas no país (ANTF, 2024). Essa disparidade resulta em uma redução potencial de aproximadamente 85% nas emissões de CO_2 ao migrar o transporte de cargas do modal rodoviário para o ferroviário, posicionando as ferrovias como ferramenta crucial para mitigar os impactos climáticos do setor logístico. Nesse sentido, Santos e Marques (2020), ao analisarem comparativamente o índice de intensidade de carbono do transporte rodoviário em diferentes unidades da federação, evidenciam como as características regionais da frota e da matriz logística influenciam diretamente os níveis de emissão.

A subutilização das ferrovias no Brasil reflete desafios estruturais históricos. A malha ferroviária nacional, com cerca de 29 mil quilômetros, é inferior à de países como México e Argentina. Décadas de priorização do transporte rodoviário resultaram em uma infraestrutura ferroviária obsoleta, com trechos de baixa capacidade e falta de integração intermodal. Além disso, a dependência de caminhões eleva os custos logísticos, estimados em torno de 15% do PIB brasileiro, frente a aproximadamente 8% em economias desenvolvidas como os Estados Unidos, e aumenta os impactos ambientais, dado o maior consumo de diesel e a fragmentação das operações (ILOS, 2025).

Os benefícios do modal ferroviário vão além da redução de emissões. A maior capacidade de carga por viagem, comboios de 5.000 a 7.000 toneladas contra 37 a 50 toneladas de caminhões, e a menor necessidade de mão de obra tornam as ferrovias mais econômicas e seguras. Segundo o Bradesco (2017), o custo do transporte ferroviário (R$ 20,50/1.000 t·km) é cerca de 50% inferior ao rodoviário (R$ 40,00/1.000 t·km); essa vantagem econômica do modal ferroviário por tonelada-quilômetro útil é corroborada por estudos científicos no contexto brasileiro (Eller et al., 2011). Adicionalmente, a menor densidade de veículos nas rodovias contribui para reduzir acidentes, fator crítico em um país que ocupa o terceiro lugar em mortes no trânsito.

Este trabalho tem como foco a análise comparativa de eficiência energética entre os modais rodoviário e ferroviário no trecho entre Corumbá/MS e Campo Grande/MS, ao longo da BR-262, considerando como variáveis principais as emissões de CO_2 e os custos financeiros relacionados ao transporte de cargas. A escolha do trecho se justifica por seu papel estratégico na logística de exportação de minério de ferro e grãos provenientes do Pantanal Sul-Mato-Grossense e do Cerrado Centro-Oeste, e pela possibilidade real de substituição modal por meio da reativação e modernização da Malha Oeste. Ao integrar o desenvolvimento regional à sustentabilidade ambiental, este estudo busca oferecer subsídios técnicos e econômicos para decisões de política pública e investimentos em infraestrutura de transporte, tendo como referência os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os que tratam da ação climática e infraestrutura resiliente.

O enfoque regional na BR-262/MS e na Malha Oeste é oportuno, pois existem poucos estudos quantitativos específicos para essa região. Adicionalmente, a integração entre emissões de CO_2, consumo energético e custos financeiros confere ao estudo um caráter multidimensional, tornando-o potencialmente útil para subsidiar processos de tomada de decisão relacionados ao planejamento logístico e à formulação de políticas públicas. Cabe destacar, contudo, que toda a análise ferroviária foi conduzida sob as hipóteses e os parâmetros operacionais propostos por Silva et al. (2020); diante da indisponibilidade de dados operacionais públicos da concessionária, os resultados aqui apresentados correspondem a um cenário hipotético de operação de uma Malha Oeste modernizada, e não às suas condições atuais.

MATERIAL E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos propostos, a metodologia adotada envolveu as seguintes etapas principais: delimitação do trecho a ser analisado; levantamento de dados operacionais de transportes do trecho proposto, por meio do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) de 2023; tratamento e análise dessas informações utilizando a metodologia proposta por Silva (2015) e adaptada por Silva et al. (2020); apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Os inventários de poluentes atmosféricos têm como objetivo calcular as emissões ocorridas em uma região específica ao longo de um determinado período, possibilitando a avaliação de seus impactos sobre a qualidade do ar, sendo o dióxido de carbono o gás mais importante a ser medido para efeitos de emissão. A metodologia utilizada aplica fatores de consumo por tonelada-quilômetro (TKU) e fatores de emissão baseados nas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006).

Na tentativa de corroborar resultados anteriores em pesquisas onde a eficiência energética e financeira do modal ferroviário em relação ao rodoviário já foram

demonstradas, como no trabalho de Silva et al. (2020) no trecho Uberaba/MG–Santos/SP, onde foram observadas reduções de até 37% nas emissões de CO_2 e 40% nos custos financeiros, foi adotado o trecho de Corumbá (MS) a Campo Grande (MS), dada sua importância para a região e por ter traçados semelhantes quando comparada a Rodovia BR-262 com a ferrovia Malha Oeste.

A. Transporte Rodoviário

Para o transporte rodoviário, foram utilizados os dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT, 2023) para o volume de caminhões bitrem (7 eixos) e rodotrem (9 eixos) registrados nos pontos km 387,55 (Terenos, MS) e km 594,11 (Miranda, MS) na BR-262, no sentido Corumbá → Campo Grande, com distância rodoviária de 428 km. O ponto km 387,55 (16.726 bitrens, 19.407 rodotrens) foi selecionado como cenário principal por capturar maior tráfego, enquanto km 594,11 (1.448 bitrens, 1.404 rodotrens) constitui o cenário secundário. A emissão de CO_2 para caminhões bitrem e rodotrem é calculada por veículo e multiplicada pelo número de veículos registrados. A fórmula, extraída de Silva et al. (2020), é:

$$Er = Dr \times Tr \times EFr \quad (1)$$

onde: Er = emissão de CO_2 por caminhão ($kgCO_2$); Dr = distância percorrida (428 km); Tr = fator de consumo de combustível por tonelada-km útil (l/TKU), sendo 0,009234 l/TKU para o Bitrem (baseado em consumo de 1,9 km/l e carga útil de 37 t) e 0,009009 l/TKU para o Rodotrem (baseado em consumo de 1,5 km/l e carga útil de 50 t); EFr = fator de emissão de CO_2 por litro de diesel (2,671 $kgCO_2$/l, conforme o Ministério do Meio Ambiente — MMA, 2011).

A partir desses parâmetros, os valores resultantes por caminhão são: Bitrem — TKU por caminhão = 37 t × 428 km = 15.836 TKU, consumo = 15.836 × 0,009234 = 146,23 litros, emissão = 146,23 × 2,671 = 390,52 $kgCO_2$ por caminhão. Rodotrem — TKU por caminhão = 50 t × 428 km = 21.400 TKU, consumo = 21.400 × 0,009009 = 192,79 litros, emissão = 192,79 × 2,671 = 514,82 $kgCO_2$ por caminhão. O custo financeiro rodoviário é calculado pela fórmula C = Cb × Dr × Ctr, onde Cb é a carga bruta total, Dr a distância e Ctr = R$ 0,04/t·km (Bradesco, 2017).

B. Transporte Ferroviário

Devido à ausência de dados específicos da Rumo Logística, concessionária da Malha Oeste, foi adotado o mesmo modelo de comboio ferroviário utilizado por Silva et al. (2020), fornecido pela VLI Logística: 80 vagões e 2 locomotivas modelo SD70ACe, totalizando 7.400 toneladas brutas e 5.231,7 toneladas úteis por composição, com distância ferroviária de 420 km pela Malha Oeste. Diante da indisponibilidade de dados operacionais públicos da concessionária, assume-se como premissa que a Malha Oeste, uma vez recuperada e modernizada, apresentaria desempenho energético equivalente ao do sistema analisado por Silva et al. (2020), hipótese retomada e discutida entre as limitações do estudo. A emissão de CO_2 para o comboio é calculada por trem, considerando o número de trens equivalentes à carga total dos caminhões. A fórmula é:

$$Ef = Df \times V \times Tf \times EFf \quad (2)$$

onde: Ef = emissão de CO_2 por trem ($kgCO_2$); Df = distância percorrida (420 km); V = carga transportada (5.231,7 t úteis por trem); Tf = fator de consumo de combustível por TKU (0,0064504 l/TKU, conforme Silva et al., 2020); EFf = fator de emissão de CO_2 por litro de diesel (2,63 $kgCO_2$/l, IPCC, 2006).

Embora ambos os modais utilizem óleo diesel, adotaram-se fatores de emissão de fontes distintas, MMA (2011) para o rodoviário e IPCC (2006) para o ferroviário, em conformidade com as referências originais de cada metodologia. A diferença entre os valores (2,671 e 2,63 $kgCO_2$/l) é inferior a 1,6% e decorre das premissas de cada fonte, sendo o primeiro um fator nacional médio e o segundo um fator padrão internacional. A adoção de um fator único para ambos os modais seria igualmente defensável e alteraria os resultados de forma desprezível; optou-se por preservar os fatores originais de cada referência para manter a comparabilidade com Silva et al. (2020).

O TKU por trem resulta em 5.231,7 × 420 = 2.197.314 TKU. Assim, o consumo por trem é de 2.197.314 × 0,0064504 = 14.174,07 litros, e a emissão por trem é de 14.174,07 × 2,63 = 37.275,00 $kgCO_2$ por composição. Cabe ressaltar que a conversão do volume de carga rodoviária para trens foi feita dividindo a carga útil total dos caminhões pela capacidade do trem (5.231,7 t/trem). O custo financeiro ferroviário segue a fórmula C = Cb × Df × Ctf, onde Ctf = R$ 0,0205/t·km (Bradesco, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Cálculos para o Ponto Km 387,55 (Terenos)

No ponto km 387,55, foram registrados 16.726 caminhões bitrem e 19.407 caminhões rodotrem ao longo do ano de 2023, totalizando 1.589.212 toneladas de carga útil e 2.389.500 toneladas de carga bruta. As emissões totais do modal rodoviário para este ponto resultaram em: Bitrem — 390,52 × 16.726 = 6.530.638,52 $kgCO_2$ (≈ 6.530,64 tCO_2); Rodotrem — 514,82 × 19.407 = 9.991.075,74 $kgCO_2$ (≈ 9.991,08 tCO_2). Ou seja, para o cenário considerado, as emissões totais do transporte rodoviário atingiram 16.521,72 tCO_2.

Quanto à normalização, o TKU útil total é de (16.726 × 15.836) + (19.407 × 21.400) = 680.222.736 TKU, resultando em 0,02428 $kgCO_2$/TKU e 38.601,21

kgCO₂/km. Os custos financeiros foram: Bitrem — 953.382 × 428 × 0,04 = R$ 16.321.899,84; Rodotrem — 1.436.118 × 428 × 0,04 = R$ 24.586.340,16; totalizando R$ 40.908.240,00.

Para o equivalente ferroviário, a carga de 1.589.212 t úteis requer 1.589.212 ÷ 5.231,7 ≈ 304 trens. As emissões resultam em 37.275,00 × 304 = 11.331.600 kgCO₂ (≈ 11.331,60 tCO₂), com normalização de 0,01697 kgCO₂/TKU e 26.980,00 kgCO₂/km. Ou seja, o transporte ferroviário emite 30,11% menos CO₂ por quilômetro do que o rodoviário neste cenário. O custo ferroviário é de 2.249.600 t × 420 km × 0,0205 = R$ 19.369.056,00, uma economia de 52,67%.

B. Cálculos para o Ponto Km 594,11 (Miranda)

No ponto km 594,11, o cenário secundário apresentou 1.448 bitrens e 1.404 rodotrens no sentido decrescente, totalizando 123.776 t úteis e 186.432 t brutas. As emissões rodoviárias resultaram em: Bitrem — 390,52 × 1.448 = 565.472,96 kgCO₂ (≈ 565,47 tCO₂); Rodotrem — 514,82 × 1.404 = 722.807,28 kgCO₂ (≈ 722,81 tCO₂); totalizando 1.288,28 tCO₂. A normalização resultou em 0,02432 kgCO₂/TKU e 3.010,00 kgCO₂/km. Os custos totalizaram R$ 3.191.715,84.

O equivalente ferroviário para Miranda requer 123.776 ÷ 5.231,7 ≈ 24 trens, com emissões de 37.275 × 24 = 894.600 kgCO₂ (≈ 894,60 tCO₂), normalização de 0,01697 kgCO₂/TKU e 2.130,00 kgCO₂/km. Ou seja, o modal ferroviário emite 30,22% menos por TKU. O custo ferroviário resulta em R$ 1.529.136,00, uma redução de 52,09%.

C. Dados Brutos Mensais

A Tabela 1 apresenta os dados mensais agregados de contagem de veículos e emissões calculadas para o ponto km 387,55 (Terenos), abrangendo os 345 dias com dados disponíveis no Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) para o ano de 2023, considerando ambos os sentidos de tráfego.

Tabela 1. Dados mensais — Km 387,55 (Terenos) — 2023.

Mês	Bitrens	Rodotrens	Em. Bit. (tCO₂)	Em. Rod. (tCO₂)	Total (tCO₂)
Jan	1.558	2.025	608,43	1.042,51	1.650,94
Fev	1.039	1.234	405,75	635,29	1.041,04
Mar	1.219	1.528	476,04	786,64	1.262,68
Abr	1.451	2.010	566,64	1.034,79	1.601,43
Mai	1.700	1.911	663,88	983,82	1.647,70
Jun	1.352	1.391	527,98	716,11	1.244,09
Jul	1.744	1.774	681,07	913,29	1.594,36
Ago	1.732	1.990	676,38	1.024,49	1.700,87
Set	1.588	1.569	620,15	807,75	1.427,90
Out	1.417	1.523	553,37	784,07	1.337,44
Nov	1.255	1.470	490,10	756,79	1.246,89
Dez	671	982	262,04	505,55	767,59
Total	**16.726**	**19.407**	**6.531,84**	**9.991,11**	**16.522,93**

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nos dados do PNCT (DNIT, 2023) e na metodologia de Silva et al. (2020).

A Tabela 2 apresenta os dados mensais para o ponto km 594,11 (Miranda), sentido decrescente (Corumbá → Campo Grande), abrangendo 314 dias com registros.

Tabela 2. Dados mensais — Km 594,11 (Miranda, sentido decrescente) — 2023.

Mês	Bitrens	Rodotrens	Em. Bit. (tCO₂)	Em. Rod. (tCO₂)	Total (tCO₂)
Jan	245	236	95,68	121,50	217,18
Fev	217	231	84,74	118,92	203,66
Mar	195	256	76,15	131,79	207,94
Abr	128	154	49,99	79,28	129,27
Mai	90	95	35,15	48,91	84,06
Jun	87	75	33,98	38,61	72,59
Jul	111	93	43,35	47,88	91,23
Ago	123	75	48,03	38,61	86,64
Out	117	121	45,69	62,29	107,98
Nov	87	38	33,98	19,56	53,54
Dez	48	30	18,74	15,44	34,18
Total	**1.448**	**1.404**	**565,47**	**722,81**	**1.288,27**

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nos dados do PNCT (DNIT, 2023) e na metodologia de Silva et al. (2020).

D. Síntese Comparativa

A Tabela 3 consolida a comparação entre os modais rodoviário e ferroviário para ambos os pontos de contagem, incluindo as reduções percentuais em emissões e custos.

Tabela 3. Comparação de emissões, custos e reduções (2023).

Ponto	Modal	Emissões (tCO_2)	Red. (%)	$kgCO_2/TKU$	Red. (%)	Custo (R$ milhões)	Red. (%)
Km 387,55	Rodov.	16.521,72	—	0,02428	—	40,908	—
(Terenos)	**Ferrov.**	**11.331,60**	**31,42**	**0,0169**	**30,11**	**19,369**	**52,67**
Km 594,11	Rodov.	1.288,28	—	0,02432	—	3,194	—
(Miranda)	**Ferrov.**	**894,60**	**30,56**	**0,0169**	**30,22**	**1,529**	**52,09**

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nos dados do PNCT (DNIT, 2023), na metodologia de Silva et al. (2020) e no relatório do Bradesco (2017).

As Figuras 1 e 2 ilustram, respectivamente, a comparação das emissões de CO_2 e dos custos financeiros entre os modais para ambos os pontos. Observa-se que, embora a emissão do comboio ferroviário equivalente seja superior à de cada tipo de caminhão isoladamente, ela é significativamente inferior ao total rodoviário, evidenciando o ganho de eficiência energética da substituição modal.

E. Análise Mensal das Emissões

A Figura 3 apresenta a evolução mensal das emissões de CO_2 do transporte rodoviário ao longo de 2023, desagregadas por tipo de veículo, para ambos os pontos de contagem. Observa-se que o ponto de Terenos concentra volume de tráfego significativamente maior do que Miranda, o que era esperado dada sua localização mais próxima a Campo Grande, principal centro logístico da região.

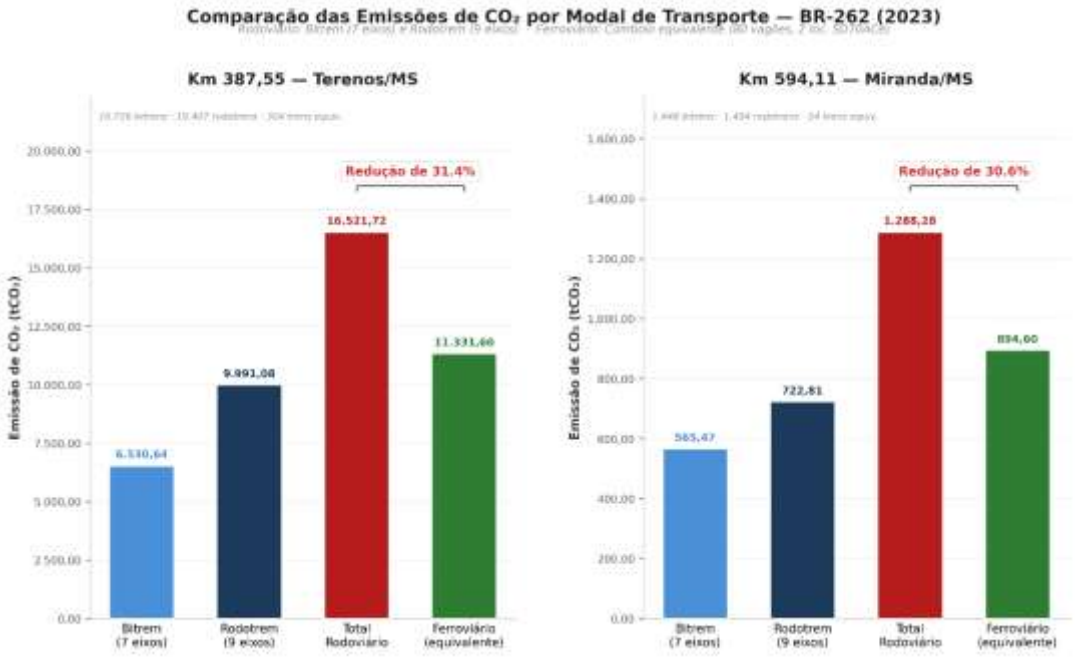


Figura 1. Comparação das emissões de CO_2 (tCO_2) entre os modais rodoviário (bitrem e rodotrem) e ferroviário equivalente, para os pontos km 387,55 (Terenos) e km 594,11 (Miranda), ano de 2023.

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nos dados do PNCT (DNIT, 2023) e na metodologia de Silva et al. (2020).

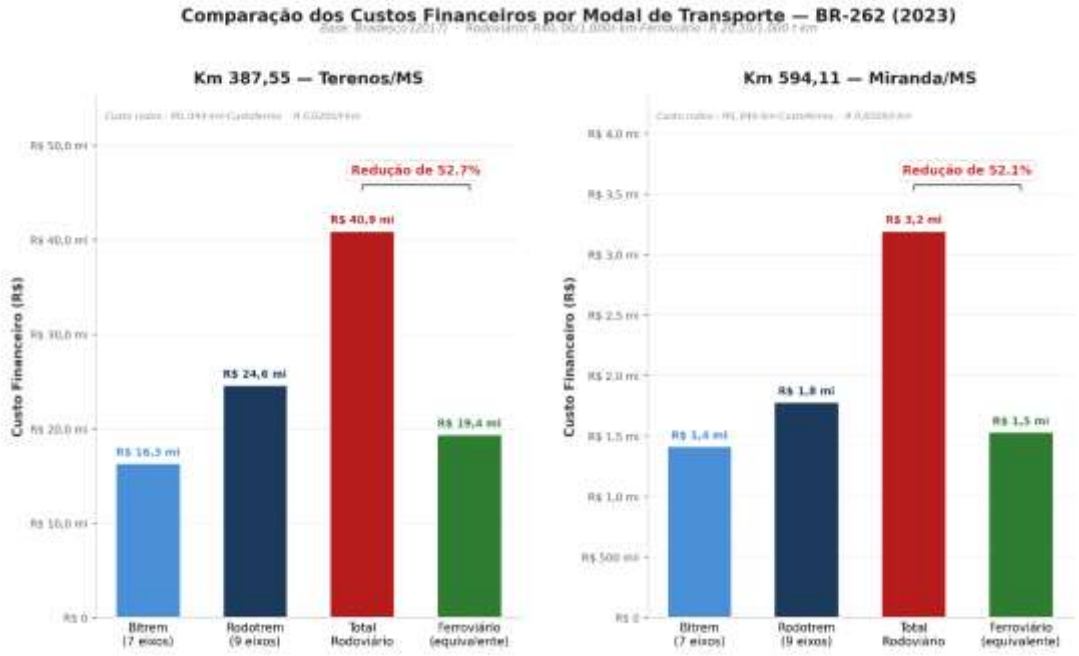


Figura 2. Comparação dos custos financeiros (R$) entre os modais rodoviário e ferroviário equivalente, para os pontos km 387,55 (Terenos) e km 594,11 (Miranda), ano de 2023.

Base de custos: Bradesco (2017). Fonte: Elaboração própria (2026).

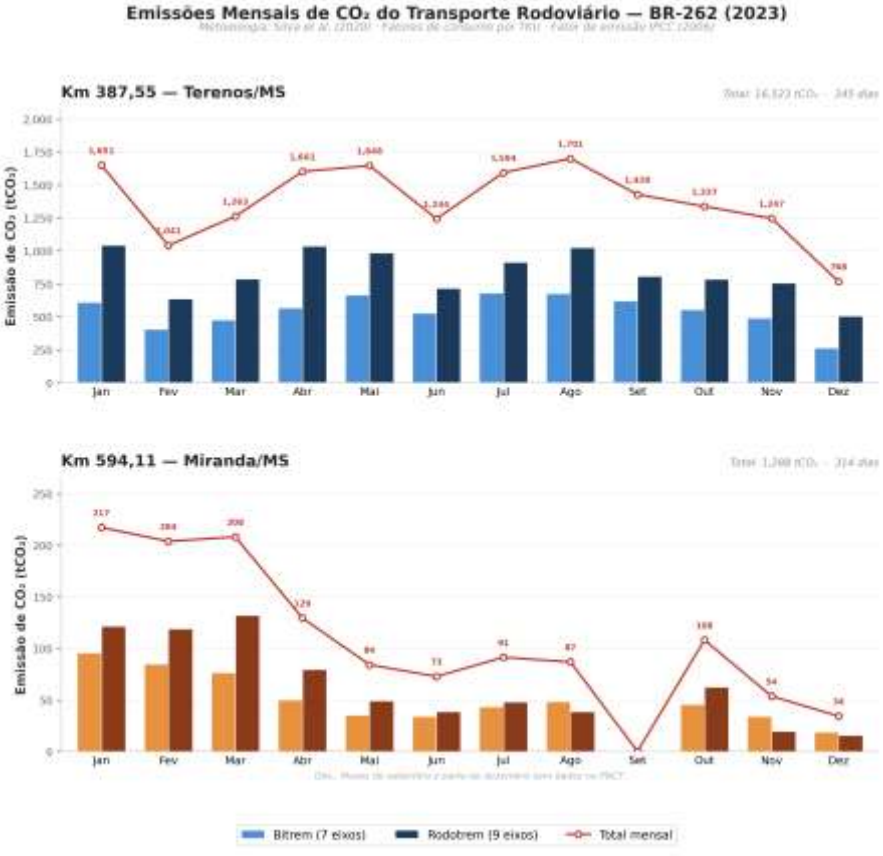


Figura 3. Emissões mensais de CO_2 do transporte rodoviário na BR-262, por tipo de veículo e ponto de contagem (2023).

Metodologia: Silva et al. (2020). Fonte: Elaboração própria (2026), com base nos dados do PNCT (DNIT, 2023).

Os resultados demonstram a superioridade do modal ferroviário tanto em eficiência energética quanto em viabilidade econômica (Figuras 1 e 2). Em Terenos, o transporte rodoviário de 16.726 bitrens e 19.407 rodotrens, totalizando 1.589.212 t úteis, consumiu aproximadamente 6.187.319 litros de diesel, emitindo 16.521,72 tCO_2 (0,02428 $kgCO_2$/TKU útil). O equivalente ferroviário, com 304 comboios (80 vagões, 2 locomotivas SD70ACe, 5.231,7 t úteis cada), consumiu 4.308.907 litros de diesel, emitindo 11.331,60 tCO_2 (0,01697 $kgCO_2$/TKU útil), representando uma redução de 31,42% nas emissões e de 30,36% no consumo de combustível.

Em Miranda, o rodoviário (1.448 bitrens, 1.404 rodotrens, 123.776 t úteis) consumiu 482.418 litros, emitindo 1.288,28 tCO_2 (0,02432 $kgCO_2$/TKU útil), enquanto o ferroviário (24 comboios) consumiu 340.177 litros, emitindo 894,60 tCO_2 (0,01697 $kgCO_2$/TKU útil), uma redução de 30,56% nas emissões e de 29,49% no consumo. A consistência dos resultados entre os dois pontos de monitoramento reforça a robustez da análise.

Financeiramente, as reduções foram ainda mais expressivas (Figura 2): 52,67% em Terenos (R$ 40.908.240,00 vs. R$ 19.369.056,00) e 52,09% em Miranda (R$ 3.191.715,84 vs. R$ 1.529.136,00). Esses valores refletem a economia de escala do comboio ferroviário (5.231,7 t/trem vs. 37–50 t/caminhão) e a proporção de custos de 2:1 entre os modais.

Comparado com Silva et al. (2020), que reportaram reduções de 37% nas emissões e 40% nos custos no trecho Uberaba–Santos, este estudo encontrou emissões 6–7% menos reduzidas. A redução de custos, porém, foi 12–13% maior, refletindo características específicas do trecho analisado. Cabe ressaltar que, ajustando o custo ferroviário para R$ 0,03/t·km, a redução de custos se alinha mais aos 40% reportados por aqueles autores.

Sob a ótica da eficiência energética na indústria de transportes, a diferença de consumo de combustível entre os modais é particularmente reveladora. Para transportar o mesmo volume de carga no cenário Terenos, a indústria rodoviária demandou aproximadamente 1,88 milhão de litros de diesel a mais do que a alternativa ferroviária. Essa diferença representa não apenas um custo financeiro direto para as empresas transportadoras, mas também uma ineficiência sistêmica da cadeia logística que impacta toda a indústria de exportação de *commodities* do estado, elevando o custo Brasil e comprometendo a competitividade internacional.

Além da eficiência ambiental e econômica, o modal ferroviário reduz consideravelmente a demanda por condutores. Em Terenos, 36.133 caminhões requerem igual número de motoristas, enquanto 304 comboios exigem aproximadamente 1.520 tripulantes (5 por trem), diminuindo o risco de acidentes. Essa dimensão social é relevante considerando que o Brasil é o terceiro país em mortes no trânsito.

A análise mensal apresentada na Figura 3 revela padrões sazonais no fluxo de caminhões, com picos observados nos meses de janeiro e agosto em Terenos, e queda expressiva em Miranda a partir de maio. Essa sazonalidade está associada ao calendário agroindustrial da região, com períodos de safra e entressafra impactando diretamente o volume de cargas transportadas. A identificação desses padrões pode subsidiar o planejamento operacional de uma futura operação ferroviária mais eficiente no trecho.

Atualmente, a matriz de transporte no trecho Corumbá–Campo Grande reflete um cenário desafiador. O modal rodoviário, movido majoritariamente a diesel, domina o escoamento de cargas, enquanto o ferroviário, subutilizado, enfrenta problemas como frota envelhecida (ANTF, 2024). A BR-262 suporta um alto fluxo de caminhões bitrem, enquanto a Malha Oeste está praticamente desativada (DNIT, 2023). Essa predominância do modal rodoviário eleva tanto as emissões quanto os custos logísticos, impactando a competitividade regional do Mato Grosso do Sul, que depende do escoamento de minério e grãos para exportação.

Por fim, cabe explicitar as principais limitações do estudo. A mais relevante refere-se ao desempenho ferroviário adotado: diante da ausência de dados operacionais publicamente disponíveis da Rumo Logística, concessionária da Malha Oeste, assumiu-se que o trecho operaria com eficiência energética equivalente à do sistema moderno analisado por Silva et al. (2020), baseado em locomotivas SD70ACe da VLI Logística. Considerando que a Malha Oeste encontra-se atualmente fora de operação, os resultados aqui apresentados devem ser interpretados como um cenário potencial, associado a uma operação modernizada, e não como o desempenho da infraestrutura em sua condição atual; a eficiência real, antes de investimentos em recuperação da via e renovação da frota, tende a ser inferior à estimada. Soma-se a isso o uso de dados de contagem volumétrica do PNCT e de fatores médios de consumo e emissão, que não capturam variações operacionais específicas, como condições de rampa, sazonalidade da carga e taxa de ocupação dos veículos. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros incorporem dados primários da concessionária e avaliem a sensibilidade dos resultados a diferentes níveis de desempenho operacional, a fim de refinar as estimativas de redução de emissões e custos.

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência energética do setor de transportes de cargas no trecho Corumbá–Campo Grande, comparando os modais rodoviário e ferroviário por meio do inventário de emissões de CO_2 e análise de custos financeiros. A análise baseou-se nos dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) de 2023 para os pontos km 387,55 (Terenos) e km 594,11 (Miranda), empregando a metodologia de Silva et al. (2020). As principais conclusões são:

1) Sob as hipóteses consideradas, os resultados indicam que o modal ferroviário pode apresentar eficiência energética superior à do rodoviário, com redução de aproximadamente 30% tanto no consumo de diesel quanto nas emissões de CO_2, coerência esperada, dado que os fatores de emissão dos dois modais são praticamente equivalentes (2,671 e 2,63 $kgCO_2/l$). A emissão normalizada do ferroviário (0,01697 $kgCO_2/TKU$) é consistentemente inferior à do rodoviário (0,02428 a 0,02432 $kgCO_2/TKU$) em ambos os pontos analisados.

2) A redução de custos financeiros atinge aproximadamente 52% ao substituir o modal rodoviário pelo ferroviário, passando de R$ 0,04/t·km para R$ 0,0205/t·km. Essa economia impacta diretamente a competitividade da indústria exportadora de *commodities* do Mato Grosso do Sul.

3) A análise mensal das emissões evidencia sazonalidade vinculada ao calendário agroindustrial da região, informação relevante para o planejamento logístico e dimensionamento de uma futura operação ferroviária no trecho.

4) Os resultados corroboram estudos anteriores, como Silva et al. (2020), e reforçam que a modernização da Malha Oeste e a diversificação da matriz de transportes constituem estratégias efetivas para a melhoria da eficiência energética na indústria logística do estado, com benefícios ambientais e econômicos alinhados ao Acordo de Paris, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e às metas de competitividade industrial do país.

Por fim, os achados deste estudo contribuem para o planejamento logístico regional, promovendo benefícios socioambientais e aproximando a produção acadêmica das demandas concretas do mercado e da indústria de transportes do Centro-Oeste brasileiro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). Relatório de Emissões de GEE do Setor Ferroviário. [S.l.]: ANTF, 2024.

BANCO BRADESCO. Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. Transporte Ferroviário. jun. 2017. Disponível em: https://www.economiaemdia.com.br. Acesso em: 15 maio 2026.

BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO_2 no transporte rodoviário de cargas. Journal of Transport Literature, v. 10, n. 3, p. 15-19, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Plano Nacional de Contagem de Tráfego: Relatório 2023. [S.l.]: DNIT, 2023.

ELLER, R. A. G.; SOUSA JUNIOR, W. C.; CURI, M. L. C. Custos do transporte de carga no Brasil: rodoviário versus ferroviário. Journal of Transport Literature, v. 5, n. 1, p. 50-64, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2018. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018.

ILOS – INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. Custos logísticos e o impacto nas empresas brasileiras. Rio de Janeiro: ILOS, 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [S.l.]: IPCC, 2006.

KUZIOR, A.; STASZEK, M. Energy management in the railway industry: a case study of rail freight carrier in Poland. Energies, v. 14, n. 6875, 2021. DOI: 10.3390/en14216875.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Primeiro inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários. Brasília: MMA, 2011.

SANTOS, M. L. M.; MARQUES, G. S. Emissões de CO_2 e o setor de transporte rodoviário: análise comparativa do Índice de Intensidade de Carbono do Distrito Federal e Amazonas. Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 2, p. 437-450, 2020.

SILVA, P. B. Metodologia para inventário de emissões do transporte ferroviário de cargas. 2015.

SILVA, P. B.; RIBEIRO, R. L.; VIEIRA, F. A.; BRASIL, A. C. M.; RIBEIRO, R. P. Potencial de redução de emissão de CO_2 pelo uso de transporte ferroviário: um estudo de caso no Brasil. RIPE, v. 6, p. 1-17, 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Emissions Gap Report 2022: the closing window — climate crisis calls

for rapid transformation of societies. Nairobi: UNEP, 2022.