

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

Julia Almeida Cabral Schroder

**Avaliação da variabilidade da carga de minério na eficiência energética e na emissão
de gases de efeito estufa no transporte ferroviário**

Juiz de Fora

2025

Julia Almeida Cabral Schroder

**Avaliação da variabilidade da carga de minério na eficiência energética e na emissão
de gases de efeito estufa no transporte ferroviário**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária. Área de concentração: Mudanças Climáticas.

Orientadora: Prof^ª. D.Sc. Aline Sarmiento Procópio

Coorientador: Milton Marques Brovini

Juiz de Fora

2025

Schroder, Julia Almeida Cabral .

Avaliação da variabilidade da carga de minério na eficiência energética e na emissão de gases de efeito estufa / Julia Almeida Cabral Schroder. -- 2025.

44 p. : il.

Orientadora: Aline Sarmento Procopio

Coorientador: Milton Marques Brovini

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

1. emissões de gases de efeito estufa. 2. transporte ferroviário. 3. eficiência energética. I. Procopio , Aline Sarmento , orient. II. Brovini , Milton Marques , coorient. III. Título.

Julia Almeida Cabral Schroder

**Avaliação da variabilidade da carga de minério na eficiência energética e na emissão
de gases de efeito estufa**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária. Área de concentração: Mudanças Climáticas.

Aprovada em 19 de agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA

D.Sc. Aline Sarmiento Procópio - Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Milton Marques Brovini - Coorientador
MRS Logística

Ênio Gomes da Silva Júnior
MRS Logística

D.Sc. Otavio Eurico de Aquino Branco
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho aos meus pais,
que sempre me apoiaram em todos os
momentos da minha vida, independentemente
de qualquer circunstância.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu chegar até aqui. Agradeço aos meus pais, Affonso e Andreia, que nunca me deixaram desamparada e me apoiaram em todos os momentos da minha vida, me incentivaram, acreditaram em mim e nunca deixaram de investir em mim (em todos os aspectos). Ao Vitor, que sempre esteve ao meu lado, me ouvindo, apoiando e incentivando em todos os momentos. Agradeço também aos meus amigos Bruna, Felipe, João e Thiago, sem vocês a faculdade não seria $\frac{1}{3}$ do que foi para mim. Vocês foram minha força e meu amparo em todos os momentos. Não poderia deixar de lado aos colegas da MRS, que sempre me apoiaram e me incentivaram a não desistir e a persistir, em especial a Aline, ao Aulus, ao Josemar e ao Zé Geraldo, que possibilitaram a existência desse trabalho.

Agradeço também à minha orientadora Aline que me ouviu lamentar vários problemas pessoais sem julgamentos e me ajudou a chegar até aqui.

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) vêm aumentando continuamente nas últimas décadas, ocasionando um aumento da temperatura na Terra e mudanças no clima. Estudos que visam diminuir essas emissões são extremamente importantes e estão sendo realizados em vários setores. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da variabilidade no carregamento de minério sobre a eficiência energética e as emissões de GEE no transporte ferroviário, buscando otimizar esse processo. Por meio da obtenção do combustível utilizado para transportar a carga na malha ferroviária da MRS Logística, da aplicação das metodologias de cálculo do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), traduzido nacionalmente por meio do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, e do uso de ferramentas para quantificação e gerenciamento de emissões, juntamente com a proposição de diferentes cenários de carregamento, foi possível estimar os efeitos da variabilidade do carregamento nos indicadores mencionados. Os resultados mostraram que a variação de carga traz efeitos expressivos na eficiência e nas emissões do transporte. Espera-se, com isso, que sejam realizados ainda mais investimentos em uma melhor qualidade do carregamento, uma vez que melhorias na eficiência energética impactam na emissão de gases do efeito estufa. A mudança na cultura do carregamento, visando uma menor variabilidade de carga dos trens de minério, pode ser uma estratégia de mitigação de GEE, contribuindo para o combate da crise climática.

Palavras-chave: emissões de gases de efeito estufa; transporte ferroviário; eficiência energética.

ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions have been progressively increasing in recent decades, causing an increase in Earth's temperature and climate change. Studies intended at reducing these emissions are extremely important and are being carried out in several sectors. This study aimed to evaluate the effects of variability in ore loading on energy efficiency and GHG emissions in rail transportation, seeking to optimize this process. By obtaining the fuel used to transport the cargo on the MRS Logística rail network, applying the calculation methodologies of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), translated nationally through the Brazilian GHG Protocol Program, and using tools for quantifying and managing emissions in different loading scenarios, it was possible to estimate the effects of load variability on the mentioned indicators. The results showed that load variation has significant effects on transportation efficiency and emissions. It is expected that further investments will be made in improving the quality of loading, as improvements in energy efficiency directly impact GHG emissions. Changing the loading culture, aiming at less variability in the load of ore trains, can be a GHG mitigation strategy, contributing to combating the climate crisis.

Keywords: greenhouse gas emissions; rail transport; energy efficiency.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	8
1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Inventários de emissão de gases do efeito estufa.....	12
3.2 Emissões nacionais de gases de efeito estufa.....	13
3.2.1 Emissões no setor de transporte de cargas	16
3.3 A MRS Logística	18
3.4 A Sistemas de carregamento de carga.....	20
3.5 Combustíveis no transporte ferroviário.....	22
4. MÉTODOS.....	24
4.1 Cenários de carregamento	24
4.2 Determinação do volume de combustível.....	24
4.3 Cálculo da eficiência energética	26
4.4 Cálculo das emissões de gases do efeito estufa	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1 Combustível consumido.....	28
5.2 Eficiência energética	30
5.3 Emissões totais de GEE	31
5.4 Hipóteses para diferentes frações do biocombustível no diesel.....	33
6. CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE A – DADOS OBTIDOS PELO SDT	41

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho foi elaborado e avaliado no formato de monografia, de acordo com as normas definidas Resolução nº 17/2023 do Colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFJF, como pré-requisito para aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso II (ESA098).

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2025, p. 1), “as mudanças climáticas são transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima”. Elas ocasionam alterações nos ecossistemas terrestres, das águas doces e dos oceanos, afetando diversos ambientes e aspectos, como a disponibilidade hídrica, padrões de precipitação, pesca, turismo, saúde e na vida humana, dentre outros fatores. É válido dizer que os danos se tornam cada vez mais irreversíveis, além do fato de que as extensões e magnitudes dos mesmos estão bem maiores do que as estimativas em estudos passados (IPCC, 2023).

A principal causa das mudanças climáticas é a queima de combustíveis fósseis, com emissões significativas de gases de efeito estufa (GEE). Nas últimas décadas o crescimento destas emissões aumentou significativamente, considerando-se três dos principais GEE, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Conseqüentemente, a concentração desses gases aumentou consideravelmente na superfície terrestre (IPCC, 2023).

Isso acaba por gerar alterações na temperatura da Terra, que entre 2011 e 2020 aumentou cerca de 1,1 °C em relação ao período pré-industrial, chegando a variações equivalentes ao período mais quente em 100 mil anos, que ocorreu a cerca de 6.500 anos atrás, durante o período do holoceno (IPCC, 2023). Cabe citar, que o aumento de temperatura em algumas regiões do globo resultou em um aumento da mortalidade e da incidência de algumas doenças, como as transmitidas pela água e alimentos. Além disso, com o aumento da temperatura, a produtividade agrícola diminuiu, os eventos extremos se intensificaram, e houve aumento da poluição atmosférica em grandes centros urbanos (IPCC, 2023).

Devido à intensidade das mudanças climática e objetivando um fortalecimento das respostas globais à estas alterações, foi aprovado em 2015 por 195 países o Acordo de Paris, que visa reduzir as emissões globais de GEE (Ministério do Meio Ambiente, 2025). Um dos objetivos finais do acordo é manter abaixo de 2,0° C o aumento da temperatura acima dos níveis pré-industriais, sendo desejável que o aumento permaneça abaixo de 1,5°C. Porém, a temperatura do planeta vem apresentando um constante crescimento e, segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2025), 2024 foi o ano mais quente já registrado, com recordes mensais de temperatura e com a temperatura média anual de 1,55°C, extrapolando a meta desejável estabelecida no Acordo de Paris. As projeções globais para as emissões de GEE apresentadas antes da Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2021,

demonstravam que a probabilidade de que o aquecimento superasse os 1,5° C, o que de fato ocorreu (IPCC, 2023).

É válido ressaltar que o aumento das temperaturas causa diversos prejuízos que impactam diretamente na vida na terra. O aquecimento global traz consigo consequências em diversas regiões, sendo projetadas enchentes, secas agrícolas e ecológicas, precipitações fortes, ondas de calor, riscos de eventos naturais como os ciclones, etc. Todos eles, além de intensificados, têm o prognóstico de aumento de frequência. Tais consequências geram danos aos ecossistemas, ocasionando deslizamentos, incêndios, inundações, aumento dos efeitos de ilhas de calor, dos poluentes atmosféricos, proliferação de patógenos e mudanças de sazonalidade (IPCC, 2023). Com isso, são gerados impactos diretos na vida humana. Separadamente ou em conjunto, esses fatores podem levar a diversas consequências, seja na saúde humana, como problemas respiratórios e alérgicos, até problemas ocasionados em cascata, como a sobrecarga do sistema de saúde, desnutrição, migração e pobreza, além de conflitos e queda da produção agrícola. Ainda, de acordo com o Painel Governamental sobre as Mudanças Climáticas (IPCC), os riscos são diversos na América do Sul, como o aumento de epidemias, gerando efeitos graves à saúde, inundações, deslizamentos, tempestades e riscos à segurança hídrica (IPCC, 2023).

O IPCC (2023) ressalta que as atividades humanas são grandes causadoras do aquecimento global, principalmente com as contribuições de emissões de GEE dos setores de energia, agropecuária e uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. Com o aumento populacional é notório o aumento na demanda dos setores que sustentam a vida humana, como os setores de energia, indústria, uso dos produtos, agricultura, silvicultura, usos da terra e tratamento de resíduos. Consequentemente, tem-se o aumento das emissões de GEE, ficando evidente a necessidade de adotar-se medidas de mitigação e adaptação no enfrentamento da crise climática.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho foi avaliar os efeitos da variabilidade no carregamento de minério, em toneladas, sobre a eficiência energética e as emissões de gases do efeito estufa no transporte ferroviário.

Os objetivos específicos foram: determinar diferentes cenários de carregamento de minério; estimar o consumo de combustível por tonelada de carga transportada; estimar as emissões de GEE para cada cenário; e identificar e apontar o melhor cenário capaz de contribuir para a mitigação de GEE.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inventários de emissão de gases do efeito estufa

Criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o IPCC tem como objetivo unificar todas as informações científicas para o desenvolvimento de ações de combate às mudanças climáticas. O IPCC fornece relatórios que compilam milhares de artigos científicos para que seja possível verificar quais são os impulsionadores de mudanças climáticas, seus riscos e impactos, além das adaptações e formas de mitigação (IPCC, 2025). Dividido em três grupos de trabalho que falam sobre a base da ciência física das mudanças climáticas, impactos das mudanças climáticas, adaptação e vulnerabilidade e sobre a mitigação das mudanças climáticas e em uma Força Tarefa sobre os inventários nacionais de gases do efeito estufa, o IPCC tem suas diretrizes reconhecidas e utilizadas internacionalmente (IPCC, 2025).

As diretrizes do IPCC (2006) para inventários nacionais de GEE foram refinadas em 2019 (IPCC, 2019), disponibilizando as metodologias necessárias para a formulação e melhoria dos mesmos. Tais inventários são ferramentas para quantificar as fontes de GEE nas atividades de uma empresa, de um setor econômico, cidade, estado ou país. O conhecimento da emissão de GEE para a atmosfera é de extrema importância para identificação de possíveis formas de mitigação das emissões destes gases (FGV, 2009).

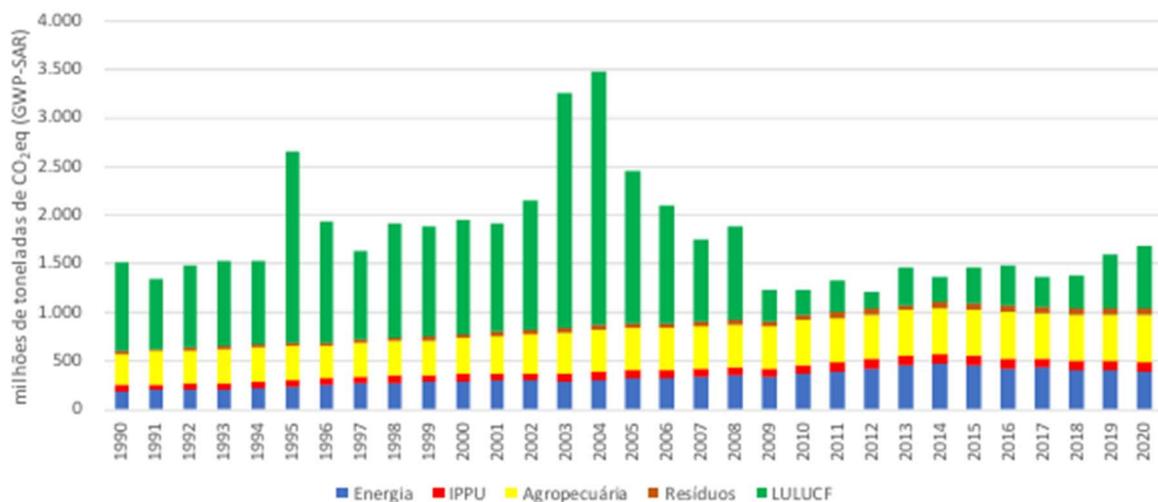
O documento disponibilizado pelo IPCC (2006) para elaboração de inventários se divide em 5 setores: energia, processos industriais e utilização de produtos, agricultura, silvicultura e outros usos da terra, resíduos sólidos e outros. As estimativas abrangem GEE, como o dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorocarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF₆), dentre outros (IPCC, 2006).

Cada um desses gases possui um potencial de aquecimento (*global warming potential* – GWP) diferente, portanto, para fins de comparação entre eles utiliza-se o CO₂ como referência, visto que seu GWP é o menor de todos, tendo como valor uma unidade. Criou-se então, as unidades de CO₂ equivalente, que compara o aquecimento causado por um gás em relação à mesma quantidade de CO₂ (IPCC, 2006). Assim, compara-se o forçamento radiativo de uma tonelada de um GEE em um determinado período de tempo comparado a uma tonelada do gás de referência, o CO₂. Chega-se, assim, em emissões totais de CO₂ equivalente (CO_{2eq}) (IPCC, 2006).

3.2 Emissões nacionais de gases de efeito estufa

Como mencionado anteriormente, de acordo com o IPCC (2023) existem setores contribuintes para as emissões de GEE. Eles se dividem em energia, processos industriais e uso de produtos, agropecuária, uso da terra, mudança do uso da terra e florestas e resíduos. No Brasil a maior parte das emissões se dá por conta das mudanças do uso da terra e floresta, seguido do setor agropecuário, setor de energia, processos industriais e, por fim, o setor de resíduos (MCTI, 2022), conforme pode ser observado na figura 1. Em 2020, as emissões totais de GEE foram 13,7% maiores do que as de 2016.

Figura 1- Emissões de gases do efeito estufa no Brasil de 1990 a 2020 (GtCO₂eq)



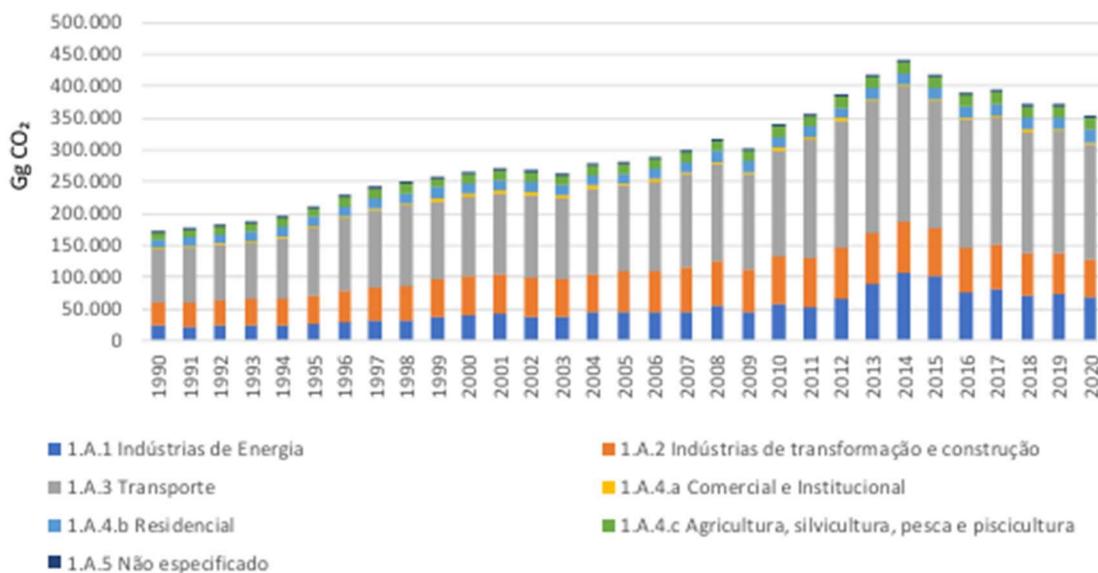
Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022).

De todos os setores, o setor de energia ocupa o terceiro lugar nas emissões de CO₂eq, sendo válido ressaltar que, em 2020, este setor apresentou 8,3% de redução nas emissões comparado a 2016. Isso pode ser justificado pela redução na atividade industrial do país e pela redução no consumo pelo transporte rodoviário, que é um dos grandes contribuintes para as emissões, além da redução energética do país ocasionada pela pandemia COVID 19 em 2020 (MCTI, 2022).

As emissões do setor de energia têm origem na produção, transformação, transporte e consumo de energia, e representaram 23,2% das emissões totais brasileiras, com 94,2% provindas de CO₂ (MCTI, 2022). A queima de combustíveis fósseis se destaca por ter

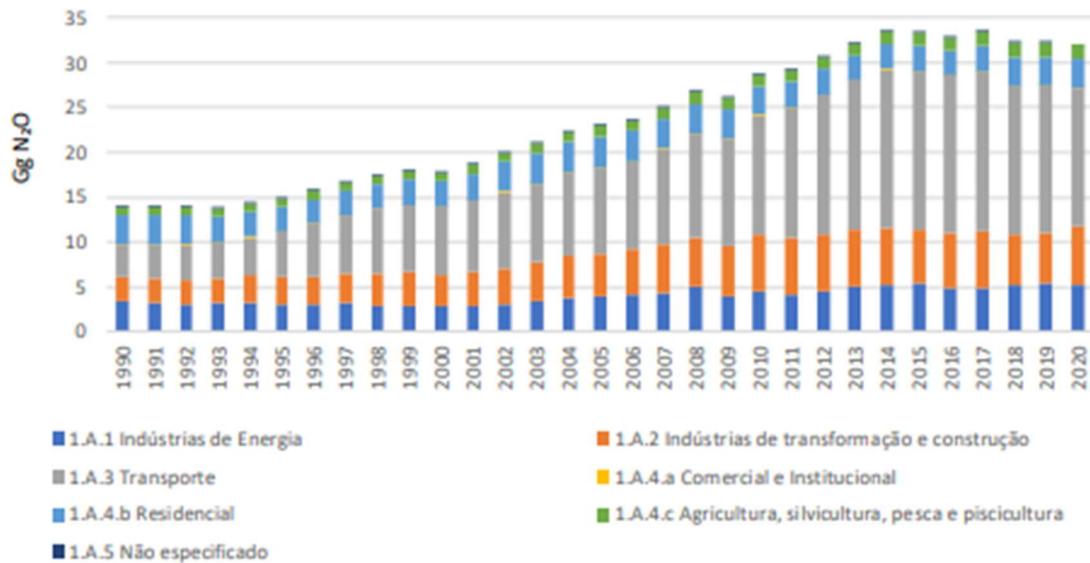
contribuído com mais de 90% das emissões do setor de energia em 2020. Nas figuras 2, 3 e 4 é possível observar ainda que o setor de transportes é o maior contribuinte para esse elevado número, principalmente levando-se em consideração a emissão de CO₂ e de N₂O. Entretanto, quando se observa as emissões de CH₄, a contribuição do setor de transportes não é a maior contribuinte, sendo, nesse caso, o setor residencial o maior responsável pelas emissões. Ainda é possível observar que as emissões referentes às indústrias de transformação e construção apresenta uma crescente evolução desde 1990. Também se percebe em todas as figuras que as emissões referentes a agricultura, silvicultura, pesca e piscicultura é bem pequena quando comparada às outras atividades. (MCTI, 2022).

Figura 2- Emissões de CO₂ nas atividades do subsetor de energia - atividade de queima de combustíveis fósseis



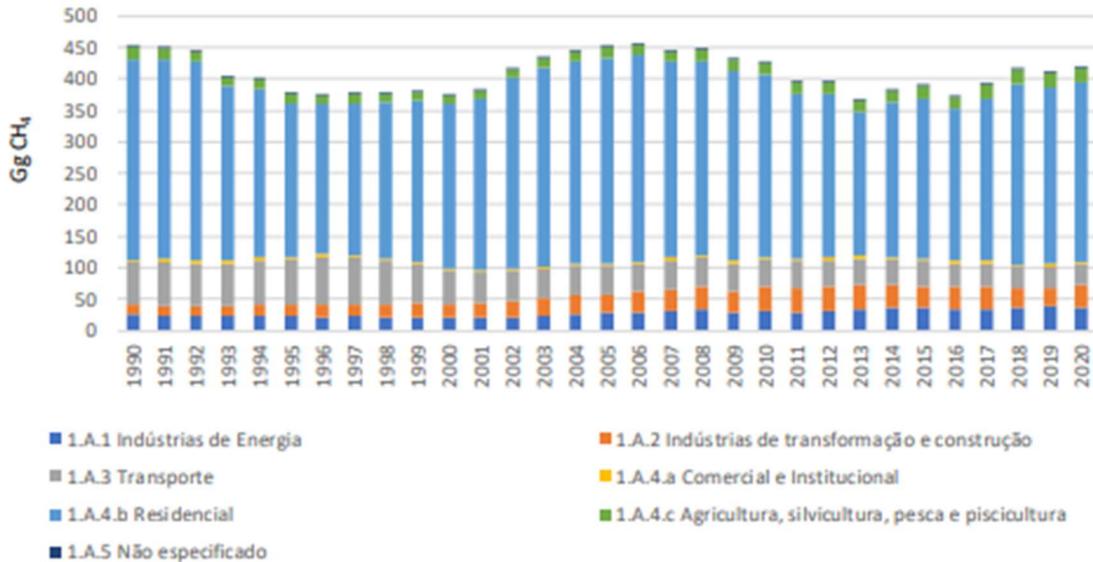
Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022).

Figura 3- Emissões de N₂O nas atividades do subsetor de energia - atividade de queima de combustíveis fósseis



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022).

Figura 4- Emissões de CH₄ nas atividades do subsetor de energia - atividade de queima de combustíveis fósseis



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022).

Dentro do setor de transportes, o combustível com maior contribuição foi o óleo diesel, utilizado, de acordo com a Petrobras (2025), em transporte de passageiros e cargas leves, pesados e extrapesados, máquinas e veículos para uso agrícola, além de uso em mineração, obras civis, geradores de energia, usinas térmicas, locomotivas de ferrovias, dentre outras.

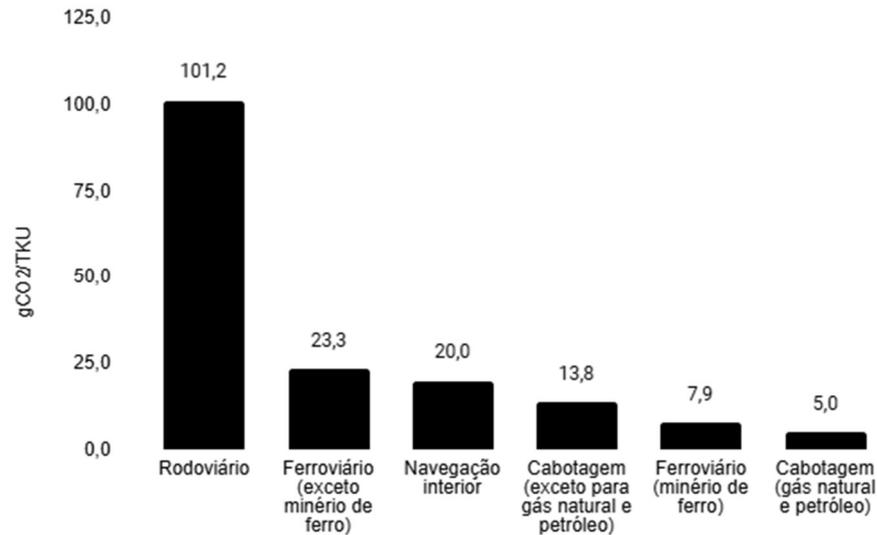
O capítulo 10 do relatório publicado pelo Grupo III, do IPCC (2022) ressalta que, em 2019, enquanto 70% das emissões globais relacionadas à energia eram provenientes de veículos rodoviários, 12% vieram de aviação, 11% do transporte marítimo e 1% do transporte ferroviário. No Brasil, comparando-se os modais de transporte no ano de 2020, de acordo com MCTI (2022), nota-se que o transporte rodoviário ficou responsável por 94,84% das emissões de CO₂, seguido de navegações domésticas com 2,01%, setor ferroviário com 1,65% e outros, com 1,5% das emissões.

Em Minas Gerais, o setor de transportes se destacou pelo aumento da frota veicular em 18,7% entre os anos de 2015 e 2019, e por apresentar a maior rede ferroviária para os transportes de carga entre os estados brasileiros, transportando, em 2018, mais de 270 milhões de toneladas úteis de carga (FEAM, 2022). Ainda segundo a FEAM (2022), dentro do setor de energia, o setor responsável pela maior parte das emissões é o de fontes móveis, com o modal rodoviário emitindo em média, mais de 90% das emissões, enquanto o ferroviário fica responsável por uma parcela média de apenas 3%. Deve-se destacar a participação do óleo diesel, com contribuição em mais de 64% das emissões de GEE.

3.2.1 Emissões no setor de transporte de cargas

Segundo o Ministério dos Transportes (MT, 2020) aproximadamente 75% das mercadorias movimentadas no Brasil são realizadas através do modal rodoviário, que possui aproximadamente 65.000 km de malha pavimentada (ANTT, 2024). Ainda, de acordo com o boletim de informações gerenciais da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2024), o setor rodoviário teve um crescimento de 8% de 2022 para 2023. A figura 5 apresenta as emissões de CO₂, em gramas de CO₂ por tonelada- quilômetro útil no Brasil, onde percebe-se que, em 2018, setor responsável pela maior parte das emissões é o rodoviário, contribuindo com mais de 100 gramas de CO₂ por tonelada por quilômetro útil. Em nível de comparação, o setor ferroviário soma pouco mais de 30 gramas, com destaque ao minério de ferro, com 7,9 gramas (Simão, Scariot e Cezne, 2022).

Figura 5- Emissões de CO₂, em gramas de CO₂ por tonelada-quilômetro útil



Fonte: Simão, Scariot e Cezne (2022).

A Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2024) realça a importância do setor para o país, visto que o mesmo gera competitividade, é um meio seguro, com baixo impacto ambiental e com geração de empregos. As ferrovias transportaram 60% do que se chega aos portos para exportação, tendo registrado, em 2023, apenas 700 acidentes no país quando comparado aos 17 mil registrados pelo setor rodoviário (ANTF, 2024). O setor ferroviário também proporciona um transporte com maior eficiência energética, com consumo de cerca de 3,33 litros de diesel para transportar 1 tonelada de carga por quilômetro útil (TKU), enquanto um caminhão gasta mais de 21 litros para a mesma situação (ANTF, 2024).

A ANTT (2024) ressalta que há 15 concessões vigentes no Brasil, totalizando 30,6 km de malha ferroviária, se dividindo em Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO), Estrada de Ferro Carajás (EFC), Estrada de Ferro Vitória Minas (EFMV), Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), Ferrovia Norte-Sul - Tramo Norte (FNSTN), Ferrovia Tereza Cristina (FTC), MRS Logística (MRS), Ferrovia Transnordestina Logística (FTL), Rumo Malha Central (RMC), Rumo Malha Norte (RMN), Rumo Malha Oeste (RMO), Rumo Malha Paulista (RMP) e Rumo Malha Sul (RMS).

O volume transportado pelo setor é de grande expressividade: em 2023 foram 531 milhões de toneladas de carga transportada, sendo destes, 382,4 milhões de minério de ferro, 99,4 milhões do setor agrícola, extração vegetal e celulose, 34,2 de indústria siderúrgica, cimento e construção civil, 8,3 de combustíveis, derivados do petróleo e álcool, e 6,3 milhões de outras mercadorias (ANTT, 2024).

A empresa entende como ponto de importância o combate às mudanças climáticas, reconhecendo que o setor ferroviário desempenha um papel importante nessa questão. Assim, como preconiza o *GHG Protocol* (2009) a empresa divide suas emissões em três escopos, a fim de estabelecer padrões de contabilização das emissões, tal divisão é importante para melhorar a transparência das organizações, uma vez que são úteis para políticas climáticas (Fundação Getúlio Vargas, 2009).

- Escopo 1: emissões diretas;
- Escopo 2: emissões indiretas decorrentes de processos de vaporização, aquecimento ou resfriamento ou compra de eletricidade;
- Escopo 3: emissões indiretas que estão fora do controle da empresa.

Na MRS, em 2023, cerca de 63,6% das emissões quantificadas são oriundas dos escopos 1 e 2. Destes, 98,5% das emissões foram provenientes do consumo de diesel pela frota de locomotivas, emitindo cerca de 619 mil toneladas de CO₂eq, número maior que o comparado a 2022, principalmente devido ao maior volume de carga transportada e, conseqüentemente, maior volume de diesel consumido (MRS, 2023). Já no ano de 2024 as emissões dos escopos apresentaram uma queda de 2,4% em relação ao ano de 2023, em decorrência, principalmente pelo aumento da parcela do biodiesel (MRS, 2024).

Assim como empresas norte-americanas e europeias, a MRS também possui um indicador de eficiência energética, que busca reduzir o consumo específico de diesel por tonelada-quilômetro bruta (TKB) transportada. O que além de estar diretamente relacionado à competitividade e aos custos operacionais da companhia, esse indicador contribui, como consequência, para a redução das emissões específicas de gases de efeito estufa (GEE). Na companhia, a eficiência energética é medida através da quantidade de litros consumidos no transporte de mil toneladas brutas em um quilômetro (litros por mil TKB). O indicador global da empresa une a eficiência energética de três grupos: minério, agrícolas e carga geral (MRS, 2023).

A empresa se preocupa constantemente em melhorar o indicador e, para isso, são realizadas algumas iniciativas que visam o aumento da eficiência energética, como aumento de velocidade em alguns trechos, redução de paradas de trens e melhoria de alguns procedimentos operacionais (MRS, 2023). A MRS está com foco atual na melhoria da qualidade dos carregamentos dos trens, para que se aumente o peso médio dos vagões, com a garantia da segurança operacional e objetivando melhorar o indicador. É válido ressaltar que uma

variabilidade no carregamento pode afetar significativamente o indicador e as emissões específicas dos GEE.

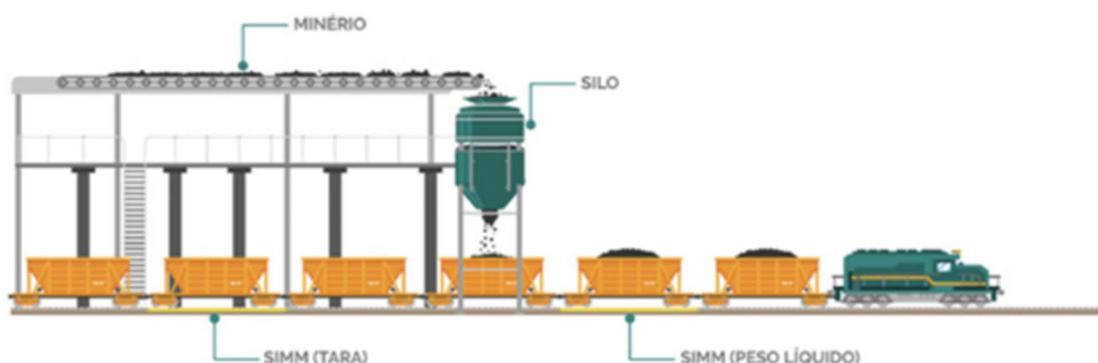
Conforme mencionado anteriormente, a empresa transporta vários tipos de carga divididos em dois grandes grupos, mineração e carga geral. Se tratando especificamente de minério, a carga é transportada por trens que por padronização são trens compostos por duas locomotivas (preferencialmente do modelo AC) e 136 vagões, nomeados tabelas. Tais vagões são GDT 120, GDT 130 e GDU, com capacidade de 120, 130 e 144 toneladas brutas, respectivamente. Atualmente, para circulação, apesar de sua capacidade máxima, por questões de suporte da malha ferroviária, o modelo GDU é utilizado com carga máxima de 130 toneladas brutas (informação verbal)¹

3.4 A Sistemas de carregamento de carga

É plausível dizer que o aproveitamento de toda carga do vagão é fundamental para que se possa transportar o maior volume de carga possível. Entretanto nem sempre isso é possível devido aos sistemas de carregamento existentes, como silo, pá carregadeira e caminhão, que podem ocasionar anomalias nas cargas. De acordo com Cury (2006) cada um possui sua particularidade, o que impacta diretamente na qualidade do carregamento.

O sistema de carregamento por silo (figura 7) fica localizado acima da linha férrea e funciona através de um sistema composto por correias transportadoras. As correias levam o minério até o silo, que posteriormente libera o material em cima do vagão, com o objetivo de preencher a caixa do mesmo. O sistema possui pesagem de cargas.

Figura 7- Sistema de carregamento por silo



¹ Informações fornecidas pela Engenharia de Transportes – MRS Logística em outubro de 2024.

Fonte: MASSA Pesagem e Automação Industrial (2024).

O sistema de carregamento por correia transportadora (figura 8) é bem similar ao sistema de silo, no entanto não conta com o mesmo, sendo composto por correias transportadoras que levam o material até o vagão. A correia permite uma maior mobilidade do operador sobre os vagões, permitindo um preenchimento com maior igualdade dos mesmos.

Figura 8- Sistema de carregamento por correia transportadora



Fonte: Cury (2006).

O sistema de carregamento por pá carregadeira (figura 9) é um dos mais utilizados no país; as pás recolhem o minério das pilhas e preenchem o vagão. É um sistema muito utilizado devido ao menor custo de instalação e operação (Cury, 2006). A pesagem, no entanto, na maioria das vezes é estimada pela quantidade de pás que é levada ao vagão, ou em casos de pás mais modernas, com computadores de bordos e balanças integradas nas pás.

Figura 9- Sistema de carregamento por pá carregadeira



Fonte: Cury (2006)

Apesar da constante busca por modernização, cada um dos sistemas de carregamento pode apresentar desvantagens por algumas anomalias. No caso do silo, as anomalias são causadas por uma possível imprecisão da quantidade de carga que é carregada dentro de cada vagão (Cury, 2006). Apesar da informação das pesagens de cada correia transportadora, a distribuição de carga e a quantidade de carga carregada no vagão fica por conta do operador do carregamento, sendo passível de pequenas variações.

Na correia transportadora a situações se assemelha ao silo. A ausência do silo causa ainda uma certa falta de precisão, o que acaba por necessitar de uma maior experiência do operador do carregamento (Cury, 2006).

E, se tratando da pá carregadeira, as falhas podem ser mais críticas ao carregar cada vagão, principalmente no caso de pás mais antigas, nas quais a carga é estimada pela quantidade de pás que são levadas até o vagão. Porém, o derramamento de cargas durante o processo e a experiência do operador contam muito para um carregamento adequado (Cury, 2006).

3.5 Combustíveis no transporte ferroviário

O óleo diesel é um tipo de combustível derivado do petróleo (ANP, 2020). De acordo com a Petrobrás (2024) existem três classes de diesel, no que se diz respeito à componentes renováveis, sendo elas A, B e C. O tipo óleo diesel tipo B trata-se do óleo diesel tipo A ou C

com a adição de biodiesel e é destinado a veículos como caminhões, tratores, locomotivas, entre outros. O biodiesel surgiu como alternativa para a diminuição das emissões de GEE. Desde 2004, quando o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi lançado, os estudos e o tema avançaram no país (MMA, 2025). O biodiesel nada mais é do que um biocombustível derivado de fontes renováveis, tais como óleos vegetais e de origem animal. Ele é capaz de substituir parcial ou totalmente o óleo diesel fóssil conforme afirmado pela Secretaria Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (MMA, 2025).

Em 2017 foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (ANP, 2023), o RenovaBio, buscando uma redução do carbono na matriz energética do país, reduzindo a emissão de GEE e trazendo melhores resultados à eficiência energética. Tal política vai de encontro aos compromissos traçados no Acordo de Paris para o Brasil. Hoje em dia o país já conta com mais de 50 usinas capazes de produzir e comercializar o biodiesel (MMA, 2021). Desde março de 2024, a fração do biodiesel no diesel vendido no Brasil era de 14%, havendo uma previsão de aumento para 15% em março de 2025, alteração esta que somente ocorreu em 01 de agosto 2025 (MME, 2025).

O uso do biodiesel apresenta vantagens como a economia nas importações de petróleo e óleo diesel, além da redução de impactos ambiental (MMA, 2025). Um exemplo cabível de citar foi a redução de 3,7% das emissões específicas totais no escopo 1 da MRS, de 2022 para 2023, devido ao aumento da parcela de biodiesel no diesel, proveniente do Renovabio (MRS, 2023). Além disso, as emissões específicas dos escopos 1 e 2 da MRS, em 2024, mostraram redução de cerca de 5,6% comparadas ao ano base de 2022, tendo como principais alavancas as melhorias no indicador global de eficiência energética da empresa, assim como o aumento da fração de biodiesel no diesel (MRS,2024).

É válido ressaltar que a parcela de biodiesel presente no combustível contribui para redução da emissão do dióxido de carbono, quando comparado ao diesel. O biodiesel, em termos de emissão de CO₂, é considerado neutro ou próximo de emissão zero, pois o carbono emitido na sua queima foi absorvido durante o crescimento da planta durante a fotossíntese para produzir biomassa. No entanto, as parcelas de CH₄ e N₂O que são emitidos na queima do combustível são contabilizadas, conforme diretrizes do IPCC (2006).

4. MÉTODOS

4.1 Cenários de carregamento

Considerando-se possíveis variações que ocorrem no ato do carregamento dos trens de minério, e que atualmente, na empresa, os vagões GDT 130 compõem a maior parte da frota da mesma, foram estabelecidos quatro cenários de carregamento:

- Cenário 1: 2 locomotivas do tipo AC, 136 vagões GDT 130 carregados com 130 toneladas brutas (111 toneladas de minério de ferro e 19 toneladas da tara do vagão);
- Cenário 2: 2 locomotivas do tipo AC, 136 vagões GDT 130 carregados com 128 toneladas brutas (109 toneladas de minério de ferro e 19 toneladas da tara do vagão);
- Cenário 3: 2 locomotivas do tipo AC, 136 vagões GDT 130 carregados com 125 toneladas brutas (106 toneladas de minério de ferro e 19 toneladas da tara do vagão);
- Cenário 4: 2 locomotivas do tipo AC, 136 vagões GDT 130 carregados com 120 toneladas brutas (101 toneladas de minério de ferro e 19 toneladas da tara do vagão);

A partir destes cenários definidos foram realizadas simulações e cálculos para que fosse possível comparar os efeitos de tal variabilidade na eficiência energética e na emissão de GEE.

4.2 Determinação do volume de combustível

O volume de combustível utilizado por viagem, para cada cenário, foi gerado pelo Simulador de Desempenho de Trens (SDT) (informação interna)², da Engenharia de Transportes da MRS, o qual leva em consideração os perfis de via desde a origem da simulação até seu destino, além das informações técnicas das locomotivas em uso, peso dos vagões e a distância entre origem e destino. O simulador leva em conta o peso específico do diesel, os trechos de parada, as entradas e saídas de auxílio (locomotivas adicionais que auxiliam o trem a vencer rampas durante o trajeto), as velocidades ao longo do trecho (incluindo as restrições), além das rampas ao longo do trecho. Apesar de seus dados serem gerados esperando-se uma condução perfeita, ou seja, não são levados em consideração eventuais perdas devido a erros humanos e desgastes de motores mais antigos, visto o objetivo do trabalho em questão, tal ponto não será relevante.

² Simulador interno da Engenharia de Transportes – MRS Logística, outubro 2024.

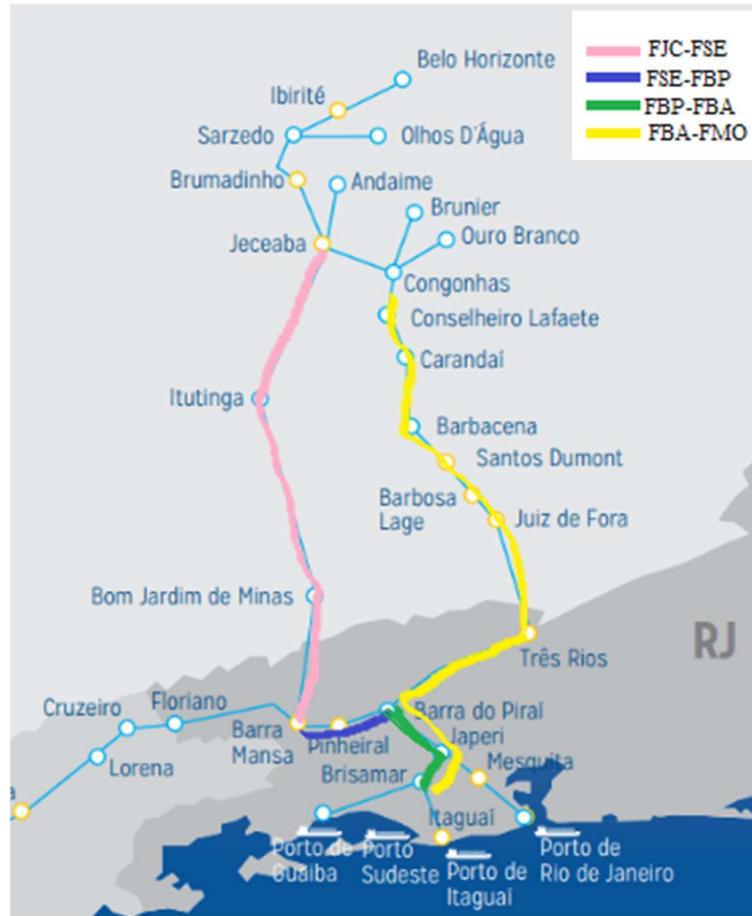
Com o objetivo de realizar testes comparáveis, foi utilizada a mesma locomotiva (GE-AC44MIL_8101) e os mesmos vagões GDT 130 (GDT_99706), com tara de 19 toneladas brutas, para todas as simulações, mantendo-se assim a mesma tecnologia da locomotiva e as mesmas condições de tara do vagão.

Na empresa, os trens partem das origens de carregamento de minério após serem carregados na região central de Minas Gerais, passando por FJC (Pátio do P1-07), localizado em São Brás do Suaçui, Minas Gerais, seguindo até a sua descarga. Posteriormente, o trem retorna com os vagões vazios passando por FMO (Mário Castilho), em Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, destinando-se para as origens onde serão carregados novamente. Por isso, as simulações foram realizadas relativas aos trechos com maior representatividade da empresa, onde se dá a passagem da maioria dos trens carregados de minério, conforme indicado na figura 10. É válido ressaltar que o SDT permite a simulação por trechos, sendo então necessário simular o volume de litros para cada subtrecho, realçados com cores: FJC (P1-07 - São Brás do Suaçui - Jeceaba) a FSE (Saudade), rosa, com 293,46 km; FSE a FBP (Barra do Piraí), azul, com 52,91 km; FBP a FBA (Brisamar), verde, com 75,32 km; e FBA a FMO (Mário Castilho - Região de Conselheiro Lafaiete), amarelo, com 444,2 km, os quais são somados ao final.

Em todos os cenários os trens partem das origens nas quais foram carregados, passando por FJC, FSE e FBP, até descarregar em FBA. Depois voltam vazios passando pelo trecho FBA para FMO até chegar as origens de carregamento onde são carregados novamente. Ao todo foram realizadas 12 simulações, contemplando os 4 cenários estabelecidos, cada qual percorrendo os 4 trechos determinados acima.

Adicionalmente realizou-se mais uma simulação, do trecho FBA a FMO, correspondente ao trecho por onde o trem circula após a descarga dos vagões, a fim de se quantificar qual o gasto de combustível para um retorno do trem para o terminal de carga. Esse volume de combustível foi acrescentado em todos os 4 cenários.

Figura 10- Malha MRS - Trechos de utilizados para simulações



Fonte: Adaptado de MRS Logística (2024).

4.3 Cálculo da eficiência energética

De acordo com Figueiredo (2015), a eficiência energética de um processo pode ser definida como a saída útil de um processo pela entrada de energia do mesmo. A eficiência energética foi calculada para cada cenário pelo consumo de diesel utilizado para transportar mil toneladas brutas em um quilômetro útil, conforme apresentado na equação 1 (MRS, 2023):

$$EE = \frac{L}{kTKB} \quad (1)$$

Onde:

EE: Eficiência energética (L/TKB);

L: Volume de combustível (L);

kTKB: mil toneladas brutas por quilômetro (kTKB).

4.4 Cálculo das emissões de gases do efeito estufa

As emissões dos gases do efeito estufa (dióxido de carbono, metano e óxido nitroso) foram estimadas para os 4 cenários, através da equação 2 adaptada da metodologia do IPCC (2006).

$$Emissões = \Sigma (C * F) * GWP \quad (2)$$

Onde:

E: Emissões (kg);

C: Consumo de diesel (L);

F: Fator de emissão (kg/L);

GWP: Potencial de aquecimento.

O GWP foi inserido na equação a fim de que se chegue no valor de emissões em CO₂eq. A tabela 1 apresenta, para cada GEE, os fatores de emissão, obtidos através da ferramenta de estimativa de gases de efeito estufa para fontes intersetoriais da Fundação Getúlio Vargas (2024), levando-se em consideração o combustível utilizado na empresa. Os valores de GWP foram determinados no IPCC (2013). A fração de biodiesel foi adotada em 14%, conforme último valor definido em 2024 (MDIC, 2023).

Tabela 1 – Fatores de emissão e potencial de aquecimento dos GEE

Gás	Fator de emissão do diesel (kg/L)	Fator de emissão biodiesel (kg/L)	GWP
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,603	-	1
Metano (CH ₄)	0,0001385	0,000331595	28
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,001025	0,000019896	265

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

As emissões totais para cada cenário foram calculadas considerando-se o volume total de minério transportado pela MRS no ano de 2023, podendo-se, assim, estimar-se a quilometragem total percorrida neste ano, para cada cenário, visto que cada um considera uma capacidade diferente de carregamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Combustível consumido

O SDT fornece a distância percorrida pelo trem, além do consumo de diesel de cada trecho. A tabela 2 apresenta para cada cenário o peso de cada vagão do trem, além do peso do trem completo, com os 136 vagões. Ainda exibe a distância de cada um dos trechos, com seus respectivos consumos e consumo médio por quilômetro, com seu consumo total final.

Tabela 2– Consumo de combustível obtido pelo SDT para cada cenário, nos trechos de ida (carregados) e volta (vazios)

Cenário	Peso por vagão (TB)	Peso total transportado por trem (TB)	Trecho	Distância (km)	Consumo (L)	Média de consumo (L/km)	Consumo total (L)
1	130 (carregado)	17.680	FJC - FSE	293,46	9.226	31,44	12.553
			FSE - FBP	52,91	1.231	23,27	
			FBP-FBA	75,32	2.096	27,83	
	19 (vazio)	2.584	FBA-FMO	444,20	8.677	19,53	8.677
2	128 (carregado)	17.408	FJC - FSE	293,46	9.124	31,09	12.443
			FSE - FBP	52,91	1.223	23,12	
			FBP-FBA	75,32	2.096	27,83	
	19 (vazio)	2.584	FBA-FMO	444,20	8.677	19,53	8.677
3	125 (carregado)	17.000	FJC - FSE	293,46	8.974	30,58	12.219
			FSE - FBP	52,91	1.204	22,76	
			FBP-FBA	75,32	2.041	27,10	
	19 (vazio)	2.584	FBA-FMO	444,20	8.677	19,53	8.677
4	120 (carregado)	16.320	FJC - FSE	293,46	8.724	29,73	11.895
			FSE - FBP	52,91	1.184	22,38	
			FBP-FBA	75,32	1.987	26,38	
	19 (vazio)	2.584	FBA-FMO	444,20	8.677	19,53	8.677

Fonte: Autoria própria (2024).

Se tratando do trem carregado, observa-se na tabela 2, conforme esperado, que quanto maior a carga transportada, maior é o consumo de diesel ao longo do trecho. Ainda, observa-se que, mesmo transportando o peso dos próprios vagões, há um consumo de 8.677 litros, para os vagões utilizados na simulação. Outro ponto importante a se destacar é a diferença no consumo médio de combustível por quilômetro percorrido em cada trecho da ida. Isso se dá devido à diferenças nas características dos percursos percorridos, como a inclinação das rampas a serem vencidas. As inclinações e variações das velocidades estão apresentadas no apêndice A, através dos gráficos obtidos pelo SDT. Paralelamente é possível notar nas figuras do apêndice A que, mesmo que sutilmente, nos trechos com maior rampa (como os trechos referentes aos km 105, 143 e 154), há uma menor variação de velocidade nos trens com menor carga a ser transportada, indicando assim um menor esforço.

Tomando-se por base o volume de minério transportado no ano de 2023 pela empresa (MRS, 2023) de 122.120.000 toneladas úteis (TU) foi possível comparar o combustível consumido ao longo de um ano, considerando-se o número de viagens necessárias em cada um dos cenários, conforme tabela 3. É possível observar um aumento de 6,49% do consumo total de combustível do cenário 1 para o cenário 4, com 11.154.141 de litros a consumidos mais. Nota-se que, apesar do consumo médio ser maior no cenário 1, o maior número de viagens necessárias para transportar o mesmo volume aumenta do cenário 1 ao 4, aumentando-se assim, o consumo total de combustível no cenário 4.

Tabela 3 – Consumo total anual de combustível para cada cenário, para o trecho FJC-FBA (ida) e trecho FBA-FMO (volta)

Cenário	Carga útil transportada por trem (TU)	Consumo (L)	Volume total transportado em 2023 (TU)	Número de viagens	Consumo total trem carregado (ida) anual (L)	Consumo total trem vazio (volta) anual (L)	Consumo total trem carregado anual (L)
1	15.096	12.553	122.120.000	8.090	101.553.770	70.196.930	171.750.700
2	14.824	12.443	122.120.000	8.238	102.505.434	71.481.126	173.986.560
3	14.416	12.219	122.120.000	8.471	103.507.149	73.502.867	177.010.016
4	13.736	11.895	122.120.000	8.891	105.758.445	77.147.207	182.905.652

Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 Eficiência energética

A tabela 4 apresenta os valores de eficiência energética ao longo do ano para os trechos de ida, para cada cenário. Os cálculos foram realizados com a carga bruta transportada (carga de minério mais tara dos vagões), a fim de que se possa comparar com os valores de eficiência energética realizados pela empresa e por estudos anteriores.

Os cálculos foram realizados considerando-se apenas a viagem de ida, com os vagões carregados com minério. Na tabela 4 observa-se os resultados para uma viagem, onde já se observa que, apesar de um maior consumo no cenário 1 a eficiência energética é melhor, variando de 0,045 L/TKB com 10 toneladas de diferença (cenário 4 - cenário 1). Isso se dá pelo maior volume de carga transportado em uma mesma distância. Observa-se que, apesar de um maior consumo, o transporte da carga máxima é melhor, reforçando a importância do carregamento total do vagão.

Tabela 4 – Eficiência energética, considerando-se o número de viagens anuais para cada cenário, para o trecho FJC-FBA (ida)

Cenário	Carga bruta transportadas por vagão (TB)	Carga bruta transportada por trem (TB)	Trecho	Distância (km)	Consumo total (L)	Eficiência Energética (L/TKB)
1	130	17.680	FJC-FBA	421,69	12.553	1,684
2	128	17.408	FJC-FBA	421,69	12.443	1,695
3	125	17.000	FJC-FBA	421,69	12.219	1,704
4	120	16.320	FJC-FBA	421,69	11.895	1,728

Fonte: Autoria própria (2024)

A MRS (2023), no ano de 2023, obteve um indicador de eficiência energética referente ao transporte de minério equivalente a 2,138 L/kTKB. Tal valor ainda é bem diferente do valor encontrado para o pior cenário de carregamento obtido (cenário 4). Uma possível explicação para isso se dá principalmente pelas particularidades do SDT, que considera uma condução perfeitas, ignorando eventuais gastos pontuais nas conduções e que possam ocorrer em um dia a dia na ferrovia.

Os valores de eficiência energética obtidos nos quatro cenários simulados neste trabalho variaram entre 1,684 e 1,728 L/TKB. Ao confrontar esses resultados com os de Carvalho (2023) observa-se que a configuração mais eficiente estudada na Estrada de Ferro Carajás, composta por quatro locomotivas de corrente contínua, atingiu 1,408 L/TKB. Este valor, inferior aos obtidos neste trabalho, evidencia maior eficiência no contexto analisado por Silva,

possivelmente devido à tecnologia embarcada nas locomotivas, ao perfil longitudinal da via, e à estratégia de tração adotada, aspectos que influenciam significativamente o consumo específico de combustível por tonelada-quilômetro bruta.

5.3 Emissões totais de GEE

Para os cálculos de emissões de GEE para o escopo 1, contabilizados em tCO₂eq, utilizou-se o volume útil transportado pela companhia em 2023, que foi de 122.120.000 toneladas (MRS, 2023). Para fins de comparação, no inventário da empresa, as emissões do escopo 1 foram de 617.918,953 tCO₂eq.

Na tabela 5 é possível observar a variação de emissão entre os cenários com apenas uma viagem nos trechos de ida, onde é possível perceber que as emissões totais acabam por ser maiores no cenário 1, conforme esperado, por este ter maior consumo médio por quilômetro. No entanto, na tabela 6, a qual apresenta as emissões para o volume total de carga útil transportada em 2023, observa-se o contrário da tabela 5. Com um maior número de viagens, as emissões ficam maiores no cenário 4 e menores no cenário 1.

Tabela 5 –Emissões de GEE (tCO₂eq) para uma viagem

	Total de carga transportada por trem (TU)	Consumo total (L)	Emissões de CO ₂ (tCO ₂)	Emissões de CH ₄ (tCO ₂ eq)	Emissões de N ₂ O (tC ₂ Oeq)	Emissões totais de GEE (tCO ₂ eq)
Cenário 1	15.096	12.553	28,101	0,058182	2,941615	31,101
Cenário 2	14.824	12.443	27,855	0,057672	2,915838	30,828
Cenário 3	14.416	12.219	27,353	0,056634	2,863347	30,273
Cenário 4	13.736	11.895	26,628	0,055133	2,787422	29,470

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 6 – Emissões de GEE (tCO₂eq) por volume total transportado em 2023

	Número de viagens	Total de carga transportada (TU)	Distância (km)	Consumo total (L)	Emissões totais em tCO ₂ eq
Cenário 1	8.090	122.120.000,0	3.411.447,8	101.553.770,0	251.604,6
Cenário 2	8.238	122.120.000,0	3.473.857,5	102.505.434,0	253.962,4
Cenário 3	8.471	122.120.000,0	3.572.110,6	103.507.149,0	256.444,2
Cenário 4	8.891	122.120.000,0	3.749.219,1	105.758.445,0	262.021,9

Fonte: Autoria própria (2024)

Os valores encontrados são bem menores que o realizado pela empresa, de 617.918,953 tCO₂eq, e se justificam pela mesma razão da diferença em eficiência energética, em decorrência das simulações realizadas pelo SDT, visto que o simulador considera uma condução perfeita. Adicionalmente, no inventário da empresa, as emissões do escopo 1 contemplam, ainda, as emissões de todos os tipos de carga transportados pela empresa (minério, carga geral e agrícolas), emitidas pelo consumo de diesel das locomotivas da empresa, contemplando cerca de 98,7% das emissões do escopo.

Com o objetivo de quantificar como as viagens de volta, com o trem vazio, impactam nas emissões, foram realizados os cálculos considerando o combustível gasto em todo percurso, levando em conta o trem vazio e o trem carregado, considerando as toneladas brutas transportadas em todo o processo. Isso foi considerado em decorrência de não haver tonelada útil no trecho de volta do trem.

Com a tabela 7 observa-se o aumento das emissões totais do cenário 1 para o cenário 4, variando em mais de 27 mil toneladas de CO₂ equivalente emitidas a mais.

Tabela 7 –Emissões de gases do efeito estufa por volume total transportado em 2023

	Trecho	Emissões de CO ₂ (t)	Emissões de CH ₄ (t)	Emissões de N ₂ O (t)	Emissões de CH ₄ (tCO ₂ eq)	Emissões de N ₂ O (tCO ₂ eq)	Emissões totais de GEE (tCO ₂ eq)
Cenário 1	FJC-FBA	227.336,24	16,81	89,80	470,69	23.797,67	251.604,60
	FBA-FMO	157.141,44	11,62	62,07	325,36	16.449,64	173.916,44
	total	384.477,68	28,43	151,88	796,05	40.247,31	425.521,04
Cenário 2	FJC-FBA	229.466,61	16,97	90,64	475,11	24.020,68	253.962,40
	FBA-FMO	160.016,22	11,83	63,21	331,31	16.750,57	177.098,10
	total	389.482,83	28,80	153,85	806,42	40.771,25	431.060,50
Cenário 3	FJC-FBA	231.709,03	17,13	91,53	479,75	24.255,41	256.444,19
	FBA-FMO	164542,05	12,17	65,00	340,68	17224,34	190.265,22
	total	396251,08	29,30	156,53	820,43	41479,75	446.709,41
Cenário 4	FJC-FBA	236.748,74	17,51	93,52	490,18	24.742,97	262.021,89
	FBA-FMO	172.700,19	12,77	68,22	357,57	18.078,34	191.136,11
	total	409.448,93	30,28	161,74	847,76	42.861,31	453.158,00

Fonte: Autoria própria (2024)

Um número significativamente menor de emissões no cenário 1 reforça a importância de um carregamento total do vagão. Além das vantagens em emissões, um menor número de viagens acarreta economia em inúmeros outros gastos para a empresa, como mão de obra para carregamento e transporte da carga, menor tempo para levar um volume estimado ao destino final, entre outros.

Quanto menor a carga transportada por vagão, maior o número de viagens, e consequentemente, maior o consumo de combustível.

5.4 Hipóteses para diferentes frações do biocombustível no diesel

Com o objetivo de entender a relevância do uso de biocombustíveis, foram realizados testes com a variação de seu percentual no diesel. Levando-se em consideração a evolução do cenário do biodiesel adicionado ao diesel, além do cálculo realizado para o percentual atual,

foram propostos três novos cenários, com variações nas parcelas de biodiesel no combustível. Atualmente a mesma é de 15%, porém também foi realizado o cálculo para os 14% que estavam em vigor anteriormente e foram utilizados de base para os cálculos deste trabalho. E, além disso, foram propostos outros cenários, avaliando as emissões com 50% e 100% de biodiesel. A tabela 8 apresenta os valores de emissões totais anuais de cada cenário de acordo com valores de biodiesel já existente e já acordado para o ano de 2025, além dos dois outros cenários propostos. Observa-se a vantagem de uma maior parcela de biodiesel no combustível, chegando a reduzir em grandes proporções as emissões com um combustível 100% composto pela parcela de biodiesel, restando apenas a parcela referente aos gases CH₄ e N₂O.

Tabela 8 – Resultados dos cenários da variação da parcela do biocombustível

	Frações de biodiesel no diesel			
	14%	15%	50%	100%
	Emissões totais em CO ₂ eq			
Cenário 1	251.604,600	248.696,155	146.900,575	1.478,318
Cenário 2	253.962,395	251.026,695	148.277,186	1.492,172
Cenário 3	256.444,195	253.479,806	149.726,196	1.506,754
Cenário 4	262.021,895	258.993,030	152.982,764	1.539,526

Fonte: Autoria própria (2024)

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a variabilidade na carga dos vagões impacta significativamente a eficiência energética e a emissão de gases do efeito estufa no transporte ferroviário. A simulação de diferentes cenários mostra que a carga transportada dentro dos limites operacionais além de reduzir o número de viagens necessárias, reduz o consumo total de diesel e as emissões de CO₂ equivalentes.

Em relação à eficiência energética observou-se que uma redução de carga no vagão resulta em um aumento no consumo do combustível por tonelada transportada, se tratando do cenário anual. Evidencia-se, assim, a importância de uma carga com maior proximidade à capacidade máxima permitida no vagão, visto que uma carga menor por vagão acaba por resultar em um maior número de viagens, evidenciando também a importância da qualidade do carregamento.

Além disso, os resultados também mostraram que as emissões de GEE sofrem efeito semelhante ao de eficiência energética. Com apenas uma viagem os resultados não apresentam uma vantagem, no entanto quando se olha seu efeito em um cenário anual, as emissões são menores em trens carregados próximo à carga máxima do vagão.

Ademais, é notória a importância do investimento em um combustível com parcelas provenientes de fontes limpas, como os biocombustíveis, pois possuem um grande potencial na redução das emissões. Nota-se redução nas emissões com apenas 1% de parcela de biocombustível a mais no diesel, sendo que as diferenças se destacam ainda mais quando comparado aos cenários hipotéticos de 50% e 100%.

Observa-se, então que a variação de carga nos vagões de trens de minério é um tema de suma importância, impactando diretamente em benefícios ambientais, financeiros e logísticos para a empresa. Com isso, é vista a necessidade de estratégias para minimizar as variações de carga nos vagões. O investimento em formatadores de carga, por exemplo, é um deles.

Outro ponto de importante destaque é a relevância do investimento no transporte ferroviário, que se mostra muito eficiente por transportar uma maior carga que quando comparado a outros modais, como o rodoviário. O investimento nesse tipo de transporte pode desempenhar um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas e das emissões de carbono no país.

Todas essas ações podem contribuir, e muito, para a redução do impacto ambiental, além do auxílio para o cumprimento de metas como as estabelecidas no Acordo de Paris. Pesquisas

futuras podem aprofundar a análise sobre a viabilidade técnica e econômica da adoção de novas tecnologias de carregamento e combustíveis renováveis no transporte ferroviário.

A adoção de sistemas mais automatizados para o carregamento dos trens, capacitação para os operadores e um monitoramento constante da qualidade do carregamento mostram-se essenciais quando se visa carregamento completo do vagão.

Espera-se, com isso, uma sensibilização quanto à importância das melhorias na eficiência energética, promovendo uma mudança de cultura que vise à menor variabilidade no carregamento dos trens de minério, contribuindo para um cenário de mitigação climática. O investimento em tecnologias e em combustíveis renováveis torna-se essencial para que se alcance, cada vez mais, melhores resultados com relação às emissões.

Por fim, recomenda-se aprofundamento nos estudos para diferentes tipos de tecnologias nas locomotivas, além de variações de tipos de combustíveis utilizados em cada transporte, uma vez que a alteração deles pode afetar diretamente em eficiência energética e nas emissões de gases do efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- ANTF (Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários) *Porque o Brasil vai bem de trem*. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.antf.org.br/por-que-o-brasil-vai-bem-de-trem/>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). *Panorama do Setor: 2023-2024: Boletim de Informações Gerenciais*. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/informacoes-estrategicas/publicacoes/panorama-do-setor.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). *Sobre o RenovaBio*. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/sobre-o-renovabio>. Acesso em: fev. 2025.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). *Óleo Diesel*. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel>. Acesso em: jan. 2025.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). *Especificação do biodiesel*. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel#:~:text=Em%20dezembro%20de%202004%2C%20o,biodiesel%20na%20matriz%20energ%C3%A9tica%20brasileira>. Acesso em: fev. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *CNPE aprova aumento da mistura do biodiesel ao diesel*. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-aumento-da-mistura-do-biodiesel-ao-diesel>. Acesso em fev. 2025.
- CARVALHO, Enniogleiser Pereira de. *Produções de Tecnologia Social nos programas de pós-graduação da Universidade Federal do Maranhão: perspectivas e possibilidades*. Dissertação (Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023. Disponível em: <https://tede2.ufma.br/jspui/handle/tede/2489>. Acesso em: mai. 2025.
- CURY, Queiroz Bruno. *Pesquisa das anomalias nos carregamentos de minério de ferro da MRS Logística S.A.* 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente). *4º Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa* – Estado de Minas Gerais. Governo do Estado de Minas Gerais; Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM); Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD); CDP Latin America; ICLEI América do Sul; UK PACT; Foreign, Commonwealth & Development Office (Reino Unido). Belo Horizonte: 2022. Disponível em: [link]. Acesso em: ago. 2025

FGV (Fundação Getúlio Vargas). *Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de gases do efeito estufa*. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo: FGV, 2009. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/cartilha_ghg_online.pdf. Acesso em 02 fev. 2025.

FGV (Fundação Getúlio Vargas). *Ferramenta de Estimativa de Gases do Efeito Estufa para Fontes Intersectoriais do Programa Brasileiro GHG Protocol: versão 2024.0.2*. São Paulo: FGV, 2024. Acesso em: jan. 2025.

FIGUEIREDO, José Nelson. *Metodologia de cálculo da eficiência energética para o transporte ferroviário de carga*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2015.

IPCC (Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças do Clima). *Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa: Volume 2 – Energia*. [Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (eds.)]. Instituto de Estratégias Ambientais Globais para o IPCC. Japão, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. Acesso em: fev. 2025.

IPCC (Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças do Clima). *About the IPCC*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: fev. 2025.

IPCC (Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças do Clima). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 1535 p, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: jan. 2025.

IPCC (Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças do Clima). *Transport*. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022. doi: 10.1017/9781009157926.012. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-10/>. Acesso em: jan. 2025.

IPCC (Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças do Clima). *Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima* [Equipe Principal de Redação, H. Lee e J. Romero (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: fev. 2025.

IPCC (Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças do Clima). *Refinement To The 2006 IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories*. Overview. Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: fev. 2025.

MASSA PESAGEM E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. *Caso Carajás*. Disponível em: <https://massa.ind.br/cases/carajas>. Acesso em: fev. 2025.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). *Estimativas de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Brasília - DF, 6ª edição, 2022. Disponível em: www.gov.br/mcti. Acesso em: jan. 2025.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços). *CNPE aprova antecipação do B14 para março de 2024 e B15 para março de 2025, incentivando a produção de biocombustíveis e a transição energética*. Brasília, 19 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/dezembro/cnpe-aprova-antecipacao-do-b14-para-marco-de-2024-e-b15-para-marco-de-2025-incentivando-a-producao-de-biocombustiveis-e-a-transicao-energetica>.

MME (Ministério de Minas e Energia). *Perguntas Frequentes sobre Biodiesel*. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/perguntas-frequentes>. Acesso em 27 fev. 2025.

Ministério do Meio Ambiente. *Acordo de Paris*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: fev. 2025.

MRS LOGÍSTICA S.A. *Malha ferroviária e Frota: Integrando a região mais produtiva do país*. [S.l.], 2024, Disponível em: <https://www.mrs.com.br/empresa/ferrovia-frota/>. Acesso em: fev. 2025.

MRS LOGÍSTICA. *Quem somos*. [S.l.], 2023a. Disponível em: <https://www.mrs.com.br/empresa/quem-somos/>. Acesso em: fev. 2025.

MRS LOGÍSTICA. *Relatório de Sustentabilidade 2023*. [S.l.], 2023b. Disponível em: <https://www.mrs.com.br/wp-content/uploads/2024/05/MRS-Relatorio-de-Sustentabilidade-2023.pdf>. Acesso em: jun. 2024.

MRS LOGÍSTICA. *Relatório de Sustentabilidade 2024*. [S.l.], 2025. Disponível em: https://www.mrs.com.br/wpcontent/uploads/2016/06/Relatorio_de_Sustentabilidade_MRS_2024.pdf. Acesso em: jun. 2025.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL (ONU Brasil). *O que são mudanças climáticas?*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: fev. 2025.

OMM (Organização Meteorológica Mundial). *OMM confirma 2024 como o ano mais quente já registrado, com cerca de 1,55°C acima do nível pré-industrial*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: fev. 2025.

PETROBRÁS. *Óleo Diesel: O combustível que movimenta o país*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/oleo-diesel>. Acesso em fev. 2025.

PETROBRÁS. *Óleo Diesel: Informações Técnicas*. [S. l.], 2024. Disponível em <https://petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/Manual%20de%20Diesel%20Novemb>

ro%202024.pdf/3104b5b1-f6a9-4ca6-d0fa-17b5ada49e61?version=1.0&t=1732913958000&download=true. Acesso em: jan. 2025.

SIMÃO, Luiz Eduardo; SCARIOT, Gêssica Luiza; CEZNE, Marcos Antonio. *Transporte rodoviário de cargas: como selecionar um método para cálculo de emissão de CO₂ da sua frota?* 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí - SC, 2022.

APÊNDICE A – DADOS OBTIDOS PELO SDT

A seguir seguem os gráficos gerados pelo SDT com a variação de velocidade nos trechos e a inclinação da rampa para os cenários 1, 2, 3 e 4.

Figura 1- Variação de velocidade (linha vermelha) e perfil da rampa (linha azul), nos trechos FJC – FSE, FSE-FBP e FBP-FBA, respectivamente, para o cenário 1.

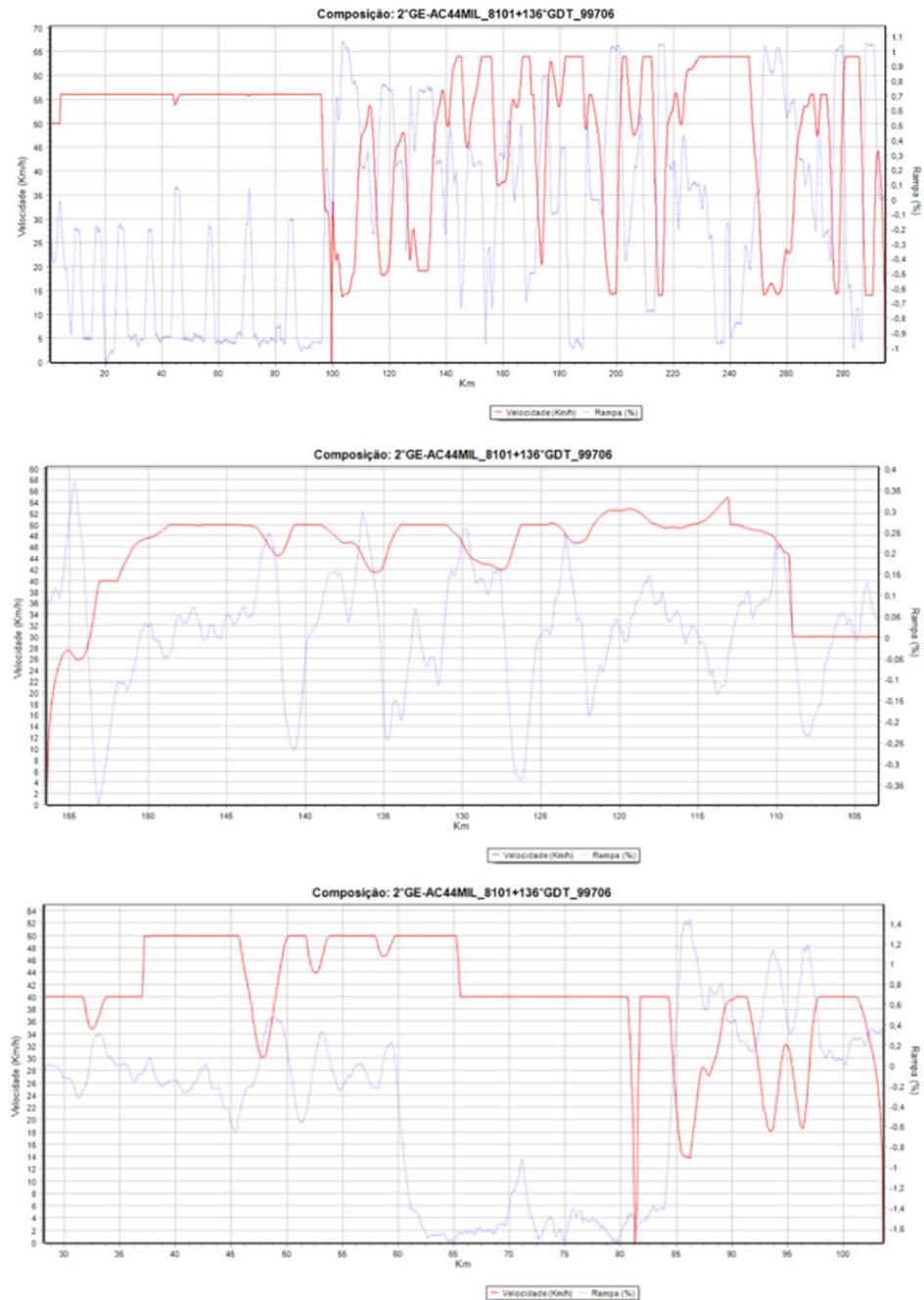


Figura 2- Variação de velocidade (linha vermelha) e perfil da rampa (linha azul), nos trechos FJC – FSE, FSE-FBP e FBP-FBA, respectivamente, para o cenário 2.

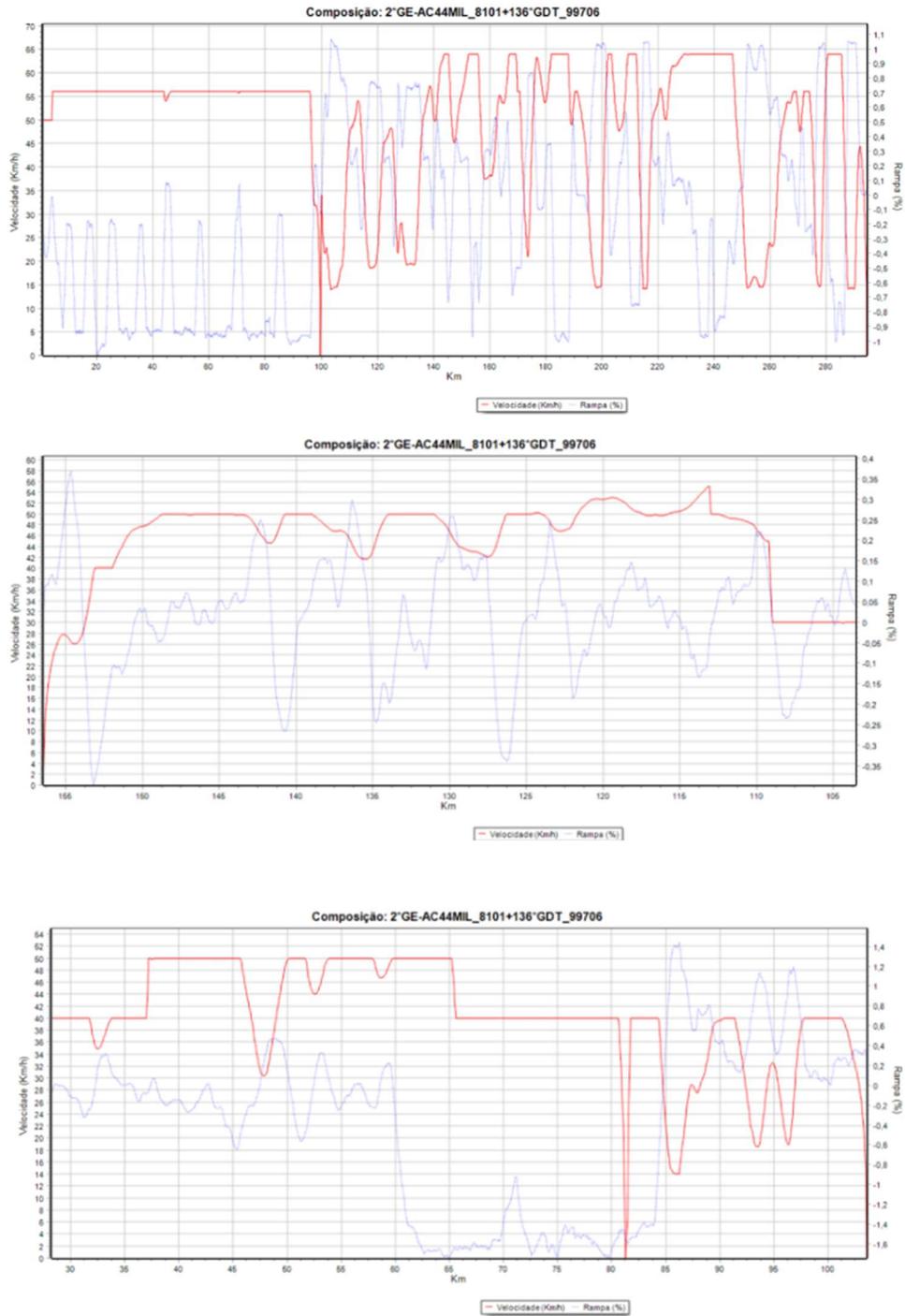


Figura 3- Variação de velocidade (linha vermelha) e perfil da rampa (linha azul), nos trechos FJC – FSE, FSE-FBP e FBP-FBA, respectivamente, para o cenário 3.

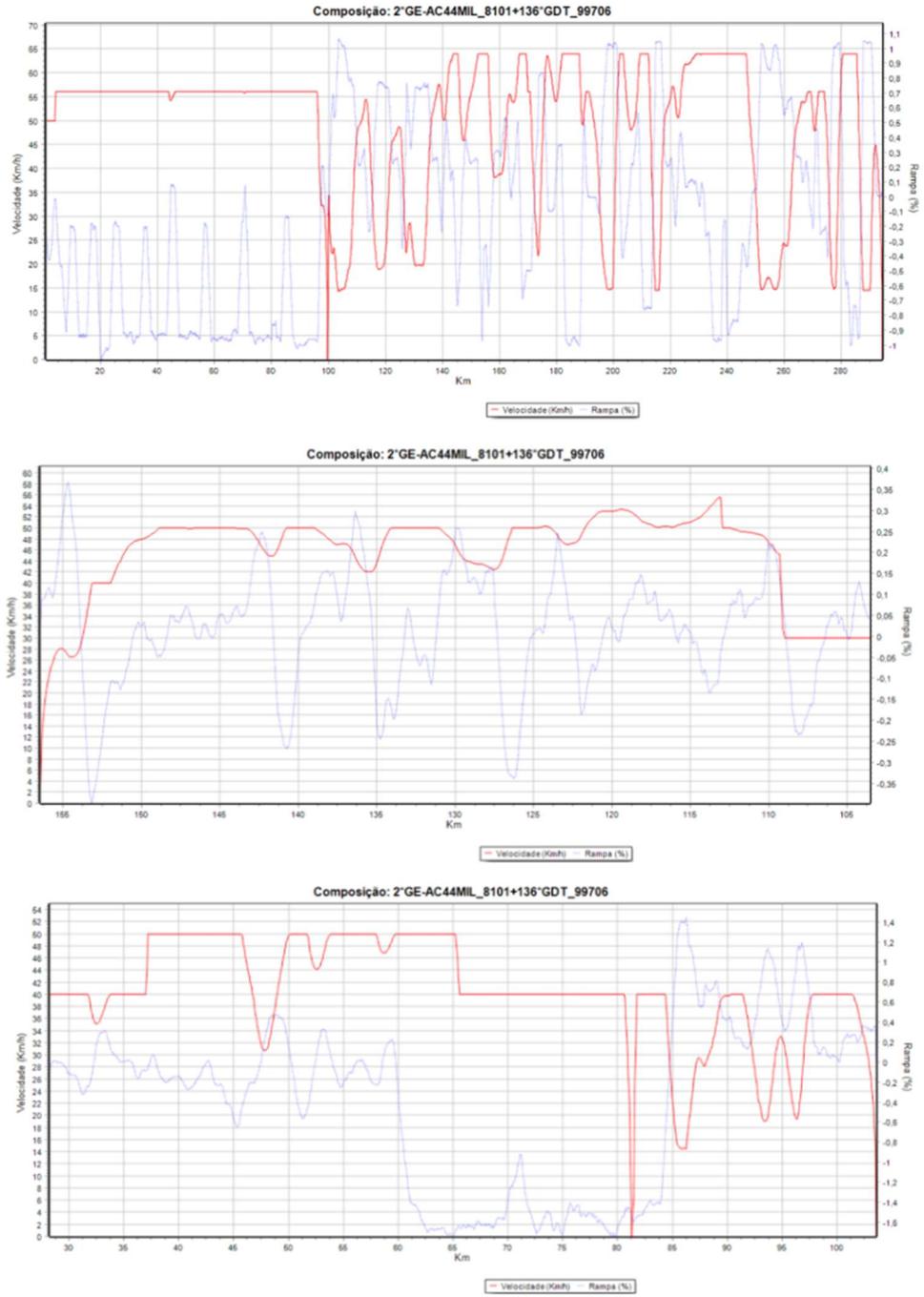


Figura 4- Variação de velocidade (linha vermelha) e perfil da rampa (linha azul), nos trechos FJC – FSE, FSE-FBP e FBP-FBA, respectivamente, para o cenário 4.

