



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS – CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E
GESTÃO TERRITORIAL

Guilherme Peres dos Santos

**Proposta de *Framework* para avaliar alternativas de transporte de produtos agrícolas
por rodotrilhos na região Sul do Brasil**

Florianópolis

2023

Guilherme Peres dos Santos

Proposta de *Framework* para avaliar alternativas de transporte de produtos agrícolas por rodotrilhos na região Sul do Brasil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Orientador: Prof. Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Guilherme Peres dos
Proposta de Framework para avaliar alternativas de
transporte de produtos agrícolas por rodotrilhos na região
Sul do Brasil / Guilherme Peres dos Santos ; orientador,
Ricardo Villarroel Dávalos, 2023.
120 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial,
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2.
Framework. 3. Lógica difusa. 4. Rodotrilho. 5. Modelos de
simulação. I. Dávalos, Ricardo Villarroel. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Guilherme Peres dos Santos

Proposta de *Framework* para avaliar alternativas de transporte de produtos agrícolas por rodotrilhos na região Sul do Brasil

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. João Carlos Souza, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Oscar Ciro Lopez Vaca, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, área de concentração em Sistemas de Transportes.

Prof^a. Ana Maria Benciveni Franzoni, Dra.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação

Prof. Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Kátia da Silva Peres e Carlos César Oliveira dos Santos pelo apoio e incentivo à minha continuidade do desenvolvimento acadêmico, tornando possível a conclusão deste trabalho. Aos meus irmãos Leonardo e Rodrigo Peres dos Santos por estarem sempre ao meu lado me proporcionando momentos de descontração e alegria. À minha noiva, Juliana Arguello de Oliveira pela paciência e companheirismo durante o curso do Programa de Pós-Graduação.

Ao meu orientador, Dr. Ricardo Dávalos pela disponibilidade e também por contribuir significativamente para a conclusão desta pesquisa durante sua orientação. Aos membros da banca Dr. Marcos Noronha, Dr. João Carlos Souza e Dr. Oscar Lopez pela avaliação e contribuições voltadas ao aprimoramento do trabalho proposto. Ao meu colega Igor Furtado pela participação no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos que contribuíram indiretamente para o desenvolvimento da dissertação.

À Universidade Federal da Grande Dourados, que não apenas me possibilitou o título de bacharel em Engenharia Civil, como também me proporcionou uma importante bagagem de conhecimento pertinente ao meio acadêmico durante o período em que atuei nesta instituição como professor.

Aos meus amigos que estiveram sempre presentes nos jogos de sinuca, rodas de tereré e churrascos ocorridos durante esse período.

Nada de lamúrias, camaradas, haveremos de vencer, porque temos razão.

(Ulianov, Vladimir Ilyich)

RESUMO

A distribuição do transporte de mercadorias no Brasil concentra mais da metade de suas atividades na movimentação por rodovias. Entretanto, tal arranjo torna o frete dependente desta modalidade, além de ser mais oneroso e prejudicial ao meio ambiente. Isso faz com que seja necessária uma realocação dos serviços por outras modalidades. Entre possíveis causas para o atual cenário estão os incentivos ao setor rodoviário brasileiro, somados aos desinvestimentos e crises no setor público ferroviário. Uma forma de aprimorar os indicadores dos serviços de transporte é o recurso à intermodalidade, dentre as quais, uma opção é o sistema de rodotrilhos, em que o semirreboque pode ser movimentado tanto por rodovias como por ferrovias. A metodologia adotada consiste em um estudo de caso para determinar o nível de serviço para transporte de graneis agrícolas, em que se delimita parte do estado do Paraná atendida por rodovias e ferrovias, a título de comparação. A pesquisa é classificada como uma abordagem quantitativa, de proposta descritiva e natureza aplicada. O presente trabalho propõe um *framework* de suporte à decisão para processos de alocação de mercadorias quanto ao modo de transporte a ser utilizado, tendo como objeto de avaliação o sistema rodotrilho e sistemas individuais rodoviário e ferroviário, sendo o segundo delimitado pela rede ferroviária da Rumo (concessão da Malha Sul), constituído por modelagem de sistemas de simulação e avaliação por lógica de difusa. Para isso, são utilizados indicadores de tempo de transporte, custos e impactos ambientais, a fim de estruturar um modelo de apoio a decisão baseado na inferência pelo Método de Mamdani. Os resultados indicam menores variações no índice de níveis de serviço pelo sistema de rodotrilhos para determinados processos de sequenciamento, dados os cenários de priorização de cada indicador. Pelo fato de o transporte ferroviário apresentar menores custos por tonelada transportada e menores índices de poluição, os casos em que o trecho é majoritariamente percorrido por trens são favorecidos quando há priorização dos indicadores de custo e impactos ambientais. Considerando a participação dos caminhões, o sistema de rodotrilho também apresenta flexibilidade nas entregas porta a porta, o que não se verifica no transporte ferroviário individualmente, impactando positivamente no tempo de transporte. Dessa forma, propõe-se um *framework* a partir dos modelos de simulação e avaliação através de um sistema de lógica difusa, visando avaliar cenários relevantes para a escolha das rotas e modalidades mais convenientes aos embarcadores.

Palavras-chave: Framework; Lógica difusa; Rodotrilho; Modelos de simulação; Sistemas de transporte.

ABSTRACT

Goods transportation distribution in Brazil concentrates more than half of its activities on transit by roadway. However, such arrangement makes freight dependent on this modality, in addition to being more expensive and environmentally harmful. That makes necessary a service relocation through other modalities. Among possible causes for current situation are incentives to Brazilian road sector, added to divestments and crises in railway public sector. One way to improve transportation service indicators is the use of intermodality, in which, roadrailers system is an option, whereupon the cargo compartment may be moved both by roadway and railway. The adopted methodology consists in a case study case to determine the service level for agricultural bulk transportation, in which part of Parana state served by roadway and railway is delimited, by way of comparison. The research is classified as a quantitative approach, descriptive proposal and applied nature. This work proposes a framework to support transportation alternatives involving roadrailers, and individual roadway and railway systems, being the second one bounded by the rail company's network Rumo (Malha Sul lease), consisting by simulation systems modeling and fuzzy logic. For that, transport time, cost and environmental impacts are used as indicators, in order to structure a decision support model based on Mamdani Method inference. The results indicate lower variations for service levels index on roadrailers system for certain sequencing processes, given prioritization scenarios of each indicator. By the fact that railway presents lower cost per transported ton and lower pollution rates, cases in which the path is mostly made by trains are favored when cost and environmental impacts indicators are prioritized. Considering trucks participation, roadrailers system also presents flexibility at door-to-door deliveries, which is not verified in rail transportation individually, affecting transport time positively. Thus, it is proposed a framework from simulation models and assessment by a fuzzy logic system, aiming to evaluate relevant scenarios for route selection and more convenient modalities for shippers.

Keywords: Framework; Fuzzy logic; Roadrailer; Simulation models; Transport systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição do transporte de carga no brasil ao longo do tempo.....	25
Figura 2 – Classificação das rodovias segundo o estado de conservação	26
Figura 3 – Condição da superfície de pavimento da malha brasileira.....	27
Figura 4 – Relação entre os componentes de um Framework.....	28
Figura 5 – Etapas de um framework para modelos de previsão	29
Figura 6 – Atributos avaliados para uma escolha de modalidade de transporte.....	32
Figura 7 – Graus de pertinência da variável “temperatura”	33
Figura 8 – Sistema de avaliação por conjuntos nebulosos	34
Figura 9 – Comparativo de desempenho entre os modos terrestres	36
Figura 10 – Custo logístico por mercadoria como justificativa de desconto de preço	37
Figura 11 – Emissão global de CO2 por modo de transporte (2005).....	38
Figura 12 – Elementos do trem bimodal de rodotrilho.....	40
Figura 13 – Processo de montagem do rodotrilho.....	41
Figura 14 – Acoplamento dos semirreboques ao truque para composição de rodotrilho.....	42
Figura 15 – Sistema de classificação de vagões	44
Figura 16 – Processo genérico de modelagem em um estudo de simulação.....	46
Figura 17 – Representação de um sistema de filas.....	47
Figura 18 – Notação de Kendall-Lee.....	47
Figura 19 – Sequência das etapas metodológicas.....	50
Figura 20 – Velocidade Média Anual do Transporte Ferroviário pela Rumo (km/h).....	51
Figura 21 – Elementos de simulação e suas condições	53
Figura 22 – Etapas da modelagem do sistema.....	54
Figura 23 – Região compreendida para escoamento da carga.....	57
Figura 24 – Framework descritivo da pesquisa	58
Figura 25 - Modelo computacional de transbordo de carga	64
Figura 26 – Modelo computacional de composição dos rodotrilhos.....	64
Figura 27 – Alocação de vagões para carregamento dos trens tipo.....	68
Figura 28 – Relação entre velocidade e distância de frenagem para médias e baixa velocidades em terrenos sem declividade	69
Figura 29 – Características geográficas das localidades dos terminais.....	70

Figura 30 – Velocidades usualmente praticadas nos ramais adotados	70
Figura 31 – Processo de composição do trem tipo em ATT	72
Figura 32 – Complementação do trem tipo iniciado em Seara LLD.....	73
Figura 33 – Classe de veículo 2S3 para o modelo de simulação.....	74
Figura 34 – Silos agrícolas metálicos	75
Figura 35 – Grafo ponderado da malha rodoviária com os caminhos mais curtos	77
Figura 36 – Modelo de macro simulação rodoviária com origem em Londrina	78
Figura 37 – Diagrama de configurações da movimentação de produtos.....	79
Figura 38 – Custo de transporte e transbordo das movimentações de carga.....	83
Figura 39 – Variações do volume transportado e consumo energético (Rumo Malha Sul).....	84
Figura 40 – Produção e transporte de soja para o cálculo da emissão de poluentes	84
Figura 41 – Sequência de movimentação estruturada (Greet®).....	85
Figura 42 – Dados de entrada para o cálculo de emissão dos modos de transportes	85
Figura 43 – Parâmetros de configuração das modalidades (Greet®).....	86
Figura 44 – Funções de pertinência na classificação das variáveis independentes	87
Figura 45 – Conjunto de consequentes da regra de inferência	87
Figura 46 – Parâmetros de simulação para a amostra piloto do terminal ATT.....	91
Figura 47 – Curvas de distribuição para operação de transbordo.....	93
Figura 48 – Curvas de distribuição para operação de montagem do rodotrilho.....	94
Figura 49 – Custo total de transporte dos grãos com origem em Londrina.....	96
Figura 50 – Custo total de transporte dos grãos com origem em Maringá.....	97
Figura 51 – Emissão agrupada dos poluentes em cada alternativa.....	98
Figura A.1 – Dados de saída dos terminais de Londrina.....	113
Figura A.2 – Dados de saída dos terminais de Maringá.....	114
Figura B.1 – Desempenho operacional do modo rodoviário.....	115
Figura C.1 – Armazéns de carga em Londrina e arredores	116
Figura C.2 – Armazéns de carga em Maringá e arredores	116
Figura D.1 – Emissão calculada nos trechos com origem em Londrina	117
Figura D.2 - Emissão calculada nos trechos com origem em Maringá.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de seleção dos modos de transporte por setores industriais.....	31
Tabela 2 – Composição da matriz de carga.....	38
Tabela 3 – Emissão de poluentes por modalidade de transporte.....	39
Tabela 4 – Descrição de notações de Kendall-Lee.....	48
Tabela 5 – Capacidade diária de vagões por terminal.....	59
Tabela 6 - Dados de tempo para carregamento de trens.....	60
Tabela 7 – Dados de tempo das operações de rodotrilhos e containers	61
Tabela 8 – Tempo de montagem de rodotrilhos	62
Tabela 9 – Trens tipo para o transporte	65
Tabela 10 – Valores típicos de aceleração e desaceleração em função do material rodante....	68
Tabela 11 – Dados de entrada para estimativa de custo de transporte e transbordo	81
Tabela 12 – Custo unitário de transbordo padrão.....	82
Tabela 13 – Custo do transporte de acordo com as origens	83
Tabela 14 – Normalização das variáveis em escala	86
Tabela 15 – Média e desvio padrão do tempo de operação dos modelos de simulação.....	90
Tabela 16 – Redimensionamento do número de iterações para o modelo de transbordo	92
Tabela 17 – Número de replicações corrigido para simulação de transbordo.....	92
Tabela 18 – Tempo decorrido para cada terminal (carregamento e trânsito).....	95
Tabela 19 – Índices defuzzificados dos níveis de serviço	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Frameworks apoiado por sistemas de lógica difusa	34
Quadro 2 – Adaptações dos terminais ao sistema rodotrilho	45
Quadro 3 – Propriedades impositivas para a modelagem do sistema de simulação.....	52
Quadro 4 – Restrições do problema de alocação de vagões.....	67
Quadro 5 – Sequenciamento das modalidades de transporte	80
Quadro 6 – Coeficientes das funções intermediárias.....	88
Quadro 7 – Cenários de priorização	89
Quadro E.1 – Relação entre regras e consequentes	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMÁTICA	19
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	JUSTIFICATIVA	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	O SISTEMA DE TRANSPORTES BRASILEIRO	24
2.1.1	Transporte rodoviário	25
2.1.2	Transporte ferroviário	27
2.2	FRAMEWORK PARA AVALIAR AS ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE	28
2.2.1	Comparativo entre modalidades	30
2.2.2	Indicadores para a tomada de decisão	31
2.2.3	Sistema de lógica difusa	32
2.2.4	Sustentabilidade nas atividades de transporte	34
2.2.4.1	<i>Custo de transporte</i>	35
2.2.4.2	<i>Impactos ambientais</i>	37
2.2.5	Os rodotrilhos e as operações intermodais	40
2.2.5.1	<i>Características básicas</i>	40
2.2.5.2	<i>Terminais de operação</i>	44
2.3	SISTEMAS DE SIMULAÇÃO	45
2.3.1	Simulações de Eventos Discretos (SED)	46
2.3.2	Comportamento das entidades e processos no sistema	46
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	48
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	49
3.1	TIPO DE PESQUISA	49
3.2	ETAPAS METODOLÓGICAS.....	50
3.3	CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE SIMULAÇÃO	50
3.3.1	Formulação do problema	51
3.3.2	Modelo conceitual	51
3.3.2.1	<i>Contexto de simulação</i>	52

3.3.2.2	<i>Conceito e elementos de simulação</i>	52
3.3.3	Modelo de simulação	53
3.4	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	54
4	ESTUDO DE CASO	56
4.1	DEMARCAÇÕES GEOGRÁFICAS	56
4.2	FRAMEWORK PROPOSTO	57
4.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	59
4.3.1	Dados de manuseio de cargas por transbordo	59
4.3.2	Dados de manuseio da carga por rodotrilho	60
4.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL	63
4.4.1	Modelo de micro simulação	63
4.4.2	Modelos de macro simulação	65
<i>4.4.2.1</i>	<i>Sistema de simulação ferroviário</i>	65
4.4.2.1.1	Problema de composição dos trens	66
4.4.2.1.2	Deslocamento entre terminais.....	68
4.4.2.1.3	Modelo computacional ferroviário	72
<i>4.4.2.2</i>	<i>Sistema de simulação rodoviário</i>	73
4.4.2.2.1	Processo de carregamento.....	74
4.4.2.2.2	Roteirização do transporte rodoviário	76
4.4.2.2.3	Modelo computacional rodoviário.....	77
<i>4.4.2.3</i>	<i>Sistema de simulação intermodal</i>	78
4.4.3	Custo de movimentação	80
<i>4.4.3.1</i>	<i>Custos de transbordo</i>	81
<i>4.4.3.2</i>	<i>Custos de transporte</i>	82
4.4.4	Emissão de poluentes	83
4.4.5	Processo de avaliação por lógica difusa	86
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
5.1	OUTPUTS DE DESEMPENHO OPERACIONAL	90
5.1.1	Resultados de tempo para a micro simulação	90
5.1.2	Resultados de tempo para a macro simulação	95
5.2	CUSTO SIMULADO DE MOVIMENTAÇÃO	96
5.3	FATORES DE EMISSÃO DAS ATIVIDADES DE TRANSPORTE	97

5.4	CLASSIFICAÇÃO FINAL DAS ALTERNATIVAS.....	98
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
6.1	CONCLUSÕES.....	103
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

O transporte de carga tem papel central na economia, incluindo movimentações de matérias-primas dos locais de extração até as fábricas, produtos industrializados das fábricas para os centros de distribuição ou direto para o varejo, e dos centros de distribuição ou dos varejos para o consumidor final (SOUTHWORTH, 2003). Partindo deste princípio, é necessária uma infraestrutura adequada que atenda às necessidades das operações de transporte, bem como planejamento e execução satisfatórios desta atividade fundamental dentro da cadeia logística.

A composição de um sistema de transporte de carga se dá pela maneira como as mesmas se movimentam, sendo dividido nos modos rodoviário, ferroviário, aquaviário, aéreo e dutoviário. Além disso, deve-se considerar a forma de relacionamento entre diferentes modalidades, o elemento transportador e os terminais de carga. A escolha do transporte mais adequado para uma determinada mercadoria depende tanto das vantagens e limitações do mesmo, quanto das propriedades e necessidades da carga a ser acomodada (GOULART; CAMPOS, 2018).

No Brasil, a movimentação de carga é realizada majoritariamente por rodovias, sendo razoável afirmar que há uma dependência deste meio de transporte. Quando se fala em movimentação de mercadorias em território nacional, a participação rodoviária nesta atividade corresponde a aproximadamente 61% da matriz de transportes. Essa parcela salta para 95% quando se trata do transporte de passageiros (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2019). Um equilíbrio na distribuição de modalidades para o escoamento de bens de consumo se faz necessária, pois além de amenizar a falta de abastecimento nas diversas regiões devido a problemas que possam atingir o transporte rodoviário, algumas de suas características se mostram desvantajosas em relação aos demais, fazendo com que potenciais benefícios de outros modos deixem de ser usufruídos em maiores proporções.

Por outro lado, o transporte ferroviário tem sua participação muito aquém do ideal. São muitos os problemas presentes na malha brasileira atual, dentre eles podemos citar as barreiras legais, burocráticas, de infraestrutura e operação, os quais ainda são considerados fatores chave na eficiência do setor e, conseqüentemente, em seu grau de participação na matriz de transporte de carga (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2015).

Evidentemente, uma maior participação do transporte ferroviário de carga no Brasil não ocorrerá de maneira abrupta, visto que a distribuição atual tem se mostrado praticamente estagnada nos últimos anos. É necessária a consideração de diversos fatores no que tange o planejamento da movimentação de carga, de modo que as práticas operacionais se deem através

um sistema sustentável. Tal planejamento com foco na ampliação da logística ferroviária poderia significar potenciais benefícios para o setor.

Em diversas aplicações do transporte é comum encontrar o uso de frameworks, tendo dentre seus objetivos a proposta de modelos sustentáveis de transporte de carga (ASSEMBLEIA GERAL DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017). O conceito de *framework*, para a finalidade deste trabalho, se refere a uma estrutura que concentra modelos matemáticos e de simulação visando a classificação das alternativas levantadas. Assim, a principal contribuição é propor um *framework* para avaliar as alternativas de transporte com rodotrilho na concessão ferroviária Rumo Malha Sul, considerando indicadores operacionais, econômicos e ambientais obtidos a partir das características próprias do sistema.

Considerando o atual momento, evidencia-se uma questão-chave sobre o equilíbrio da distribuição e movimentação de cargas na região em estudo:

Como tornar a repartição modal mais eficiente?

Para chegar a uma resposta, este trabalho propõe a elaboração de modelos de simulação que representem as operações de movimentação de carga por rodotrilho pela malha viária, com ênfase no beneficiamento do transporte ferroviário para que o mesmo gere maior atratividade para os embarcadores quando se avalia outros indicadores além do desempenho operacional. Adota-se como parâmetro o desempenho atual do transporte ferroviário, para que, a partir disso, possa-se implementar um modelo de simulação que aprimore as operações por meio da intermodalidade. O fator de custo de transporte tende a atrair a contratação de serviços para o modo ferroviário, uma vez que este tende a apresentar menor custo por quilômetro.

Os rodotrilhos, nome adaptado do termo *Roadrailer*, compõem um sistema intercambiável de reboque rodoferroviário. Tal sistema baseia-se no manuseio de reboques rodoviários articulados para o acoplamento frontal e traseiro diretamente sobre truques ferroviários nos terminais através de elevação pneumática, mantendo as rodas do eixo rodoviário suspensas acima dos trilhos, o que permite o tráfego destes compartimentos também por meio das ferrovias (LOWE, 2005).

Em relação aos impactos ambientais, parte-se do pressuposto, de acordo com alguns autores, como Winebrake *et al.* (2008), Skrucány *et al.* (2018), Pinchasik *et al.* (2020), Zhang *et al.* (2020), entre outros, de que o transporte ferroviário se mostra mais vantajoso do ponto de vista do consumo energético e conseqüente emissão de poluentes. À medida que as frotas rodoviárias são substituídas por trens, a tendência é que sejam reduzidos os impactos ambientais. Todavia, sua desvantagem reside no maior número de operações necessárias ao

carregamento, além de velocidades operacionais reduzidas em relação às rodovias, o que aumenta o tempo consumido por esse modo de maneira geral.

A partir da seleção dos indicadores (desempenho, custo e impactos ambientais), o *framework* proposto para este trabalho visará análise voltada a níveis de serviço do transporte de carga, servindo como uma ferramenta de apoio a decisão. Este recurso permite a busca de soluções para diferentes gargalos em sistemas de transporte, tanto para transporte urbano de passageiros, como: poluição, escassez de recursos, congestionamentos e segurança na mobilidade (YAN; LIU; TSENG, 2020), quanto para o transporte de carga: capacidade, distâncias, prazos de demanda, características do produto e disponibilidade de outras mercadorias a serem transportadas ao longo da rota (WOXENIUS, 2007), por exemplo.

A combinação de diferentes rotas e modalidades para seleção dos pontos de transição intermodal, e consequente alteração das extensões de transporte por rodovias e ferrovias, impacta diretamente nos indicadores avaliados, uma vez que a distância percorrida é uma variável diretamente associada aos mesmos. Assim, o processo de decisão requer um modelo que defina esses dados quantitativos de maneira ajustada à realidade da rede sob análise.

1.1 PROBLEMÁTICA

O presente trabalho aborda o atual cenário dos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário no Brasil. A opção pela utilização de mais de uma modalidade, portanto, implica em agregar os benefícios de cada uma, que podem se caracterizar tanto pelo serviço, quanto pelo custo (NAZÁRIO, 2000). Por outro lado, a concentração em um modo específico carrega também seus efeitos negativos.

Do ponto de vista operacional, o transporte ferroviário apresenta grande variabilidade em relação ao tempo requerido de movimentações pelo território brasileiro. Somado às baixas velocidades operacionais, muito tempo é dispendido nos terminais durante as operações de transferência das cargas para os trens (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2022), as quais, em muitas instalações, são realizadas pelo processo de transbordo, podendo resultar em longos intervalos entre a emissão da carga em sua origem e a chegada em seu destino. Dada esta característica, o sistema rodoviário torna-se, na maioria dos casos, mais atrativo para os embarcadores que buscam maior flexibilidade e urgência nos serviços.

A participação predominante do transporte rodoviário brasileiro tem como uma de suas características o frete mais oneroso em relação aos modos ferroviário e hidroviário, o que

impacta no custo final dos produtos (COLAVITE; KONISHI, 2015). Apesar de ter sofrido redução nos últimos anos, o transporte rodoviário ainda representa mais de 60% da matriz de carga, que por sua vez, não recebe o suporte de uma infraestrutura adequada que atenda essa demanda (BRAGA, 2019; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2019).

No caso brasileiro, Soliani (2021) aponta lacunas no transporte rodoviário em termos sustentáveis na compreensão econômica, social e ambiental. O autor aponta o modo rodoviário como inadequado e ineficiente em determinadas situações, como no transporte de produtos de baixo valor agregado por longas distâncias ao longo do território, prejudicando o desempenho econômico. Ambientalmente, este sistema concentra um consumo acima de 90% da energia demandada no setor de transporte, além de ser o principal emissor de ruídos em áreas urbanas. Em relação às questões sociais, o transporte rodoviário é prejudicado por índices significativos de acidentes e congestionamentos. Fatores relacionados aos impactos ambientais muitas vezes são ignorados ou, quando não são, se apresentam como menos importantes na seleção do serviço de carga (KOPYTOV; ABRAMOV, 2012).

Havenga *et al.* (2011) destacam que há uma diversidade de desafios no desenvolvimento e implementação de sistemas intermodais de carga domésticos, demonstrando, porém, potenciais benefícios econômicos e ambientais, ao avaliarem o transporte intermodal de contêineres. Atualmente, consta no Plano Nacional de Logística 2035 (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2021) a necessidade de uma visão estratégica, integrada e intermodal da infraestrutura logística, simultânea a um sistema que promova sustentabilidade econômica e ambiental, havendo para o segundo item uma previsão de participação de cerca de 74% das emissões pelo modo rodoviário, o que reforça ainda mais a necessidade de ampliação de outras alternativas para a movimentação de mercadorias.

Uma vez que o sistema de rodotrilho proposto não dispõe de dados abertos quanto ao desempenho nos locais em que opera, o modelo de simulação pode fornecer informações importantes quanto aos indicadores de uma possível implementação deste sistema, utilizando como base o manuseio de produtos agrícolas em terminais ferroviários localizados no estado do Paraná, os quais são atendidos pela rede ferroviária Rumo Malha Sul.

Surge então a hipótese de redução no tempo total de trânsito através de modificações nas atividades dos terminais, dada pela redução do tempo de espera, uma vez que o tempo de trânsito da carga quando em movimento depende de eventuais alterações na infra e/ou superestrutura da via ou do material rodante, o que não faz parte do escopo da pesquisa. Dada a necessidade de apoio aos processos de decisão, a constituição do *framework* tende a agregar informações aos interessados no setor de transporte agrícola.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Implementar um *framework* visando avaliar as alternativas de transporte de grãos sólidos agrícolas por rodotrilho na região Sul do Brasil.

1.2.2Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos para determinar o tempo de transporte nas diferentes modalidades;
- Determinar parâmetros de emissão de poluentes de sistemas de transporte a partir de bancos de dados relacionados a essa atividade;
- Aplicação de inferência difusa como ferramenta de apoio à decisão das alternativas de transporte propostas;
- Demonstrar variações de níveis de serviço das alternativas em função dos cenários, os quais dependem do nível de priorização para cada indicador.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento do presente trabalho se baseia na necessidade de uma melhor distribuição da matriz de carga brasileira, visando reduzir a concentração do transporte rodoviário e suas externalidades negativas. Desta forma, a proposta da pesquisa é avaliar os benefícios voltados à sustentabilidade por meio da intermodalidade dos rodotrilhos, sendo combinadas as características operacionais rodoviárias e ferroviárias. Porém, uma melhor distribuição requer parâmetros que corroborem a preferência por outra modalidade além do transporte rodoviário individual.

Zhang *et al.* (2020) verificam vantagens em termos de custo, emissão de poluentes, confiabilidade e segurança para as ferrovias, sendo complementados por melhores condições de velocidade, frequência, flexibilidade e rastreabilidade das rodovias, o que pode tornar a intermodalidade um sistema satisfatório para os embarcadores. Dai, Yang e Li (2018) relatam comportamento semelhante entre os modos terrestres, apontando o ferroviário como mais eficiente sob os parâmetros de custo e emissão. Pereira, Silva e Santos (2019) avaliam o impacto

da roteirização, considerando diferentes rotas utilizando os transportes rodoviário e intermodal por rodotrilho, constatando um custo proporcionalmente maior para o rodoviário quanto ao quilômetro rodado. Já o fator ambiental vem ganhando cada vez mais espaço em questões envolvendo desenvolvimento e sustentabilidade. O setor rodoviário implica em uma maior quantidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE) (HEINOLD; MEISEL, 2018) e, conseqüentemente, a menor emissão de gases poluentes por parte das locomotivas significaria uma redução dos prejuízos ambientais. As vantagens do transporte ferroviário podem se dar pela menor geração de alguns gases nocivos ao ambiente e à saúde humana, como é o caso do CO₂ e NO_x (MARCHETTI; FERREIRA, 2012; WEE; JANSE; BRINK, 2005).

Entretanto, a comparação de parâmetros individuais não é suficiente para a determinação do modo de transporte mais vantajoso. O processo de escolha de modalidade para o transporte de mercadorias, de acordo com os interesses do contratante dos serviços, pode se mostrar complexo em situações nas quais se dispõe de poucas informações, ou então, quando não há uma ferramenta que agrupe os indicadores de transporte e produza dados de saída que facilitem o julgamento da melhor alternativa. A justificativa principal para esta pesquisa se apoia na necessidade de um mecanismo que receba e processe informações referentes às prioridades atribuídas a cada indicador de um determinado serviço de transporte.

Assim, a consolidação de um *framework* para avaliação dos indicadores dos níveis de serviço para cada alternativa resulta em um recurso de apoio à decisão. Sua estrutura é constituída por sistemas de simulação para o levantamento dos dados de entrada e processados por mecanismos de julgamento (STANK; GOLDSBY, 2000). A utilidade do *framework* estruturado com análise difusa (*fuzzy*) se dá pela sua capacidade de receber variáveis de conceitos subjetivos, como: custo (alto, médio ou baixo); tempo de transporte (longo, médio ou curto); e impactos ambientais (grave, moderado, leve), e convertê-las em fatores numéricos e objetivos, cuja maior precisão facilitaria o processo de decisão de um embarcador.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação encontra-se estruturada por cinco capítulos, as referências bibliográficas e apêndices.

- O Capítulo 1 está constituído pelo tema em estudo, os objetivos Geral e Específicos, a Justificativa e a Estrutura.

- O Capítulo 2 concentra a Revisão Bibliográfica para embasamento da pesquisa. Neste capítulo são abordadas as características das modalidades terrestres, a integração modal dos mesmos e os aspectos operacionais desta integração.
- O Capítulo 3 aborda os processos metodológicos aplicados ao trabalho. Nesta etapa são descritos os procedimentos micro simulações do sistema rodotrilho para avaliação de casos fictícios.
- O Capítulo 4 detalha a estruturação do *framework* proposto, abrangendo modelos de simulação para obtenção dos índices a serem avaliados.
- O Capítulo 5 descreve os resultados e discussões observados no estudo de caso, conforme a descrição do Capítulo 4.
- Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões e estudos que possam complementar o *framework* de suporte à decisão de modalidades no transporte de carga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo serão abordados os elementos chave para a pesquisa, que são os modos rodoviário e ferroviário, suas características operacionais básicas, bem como o comparativo econômico e ambiental entre as duas modalidades.

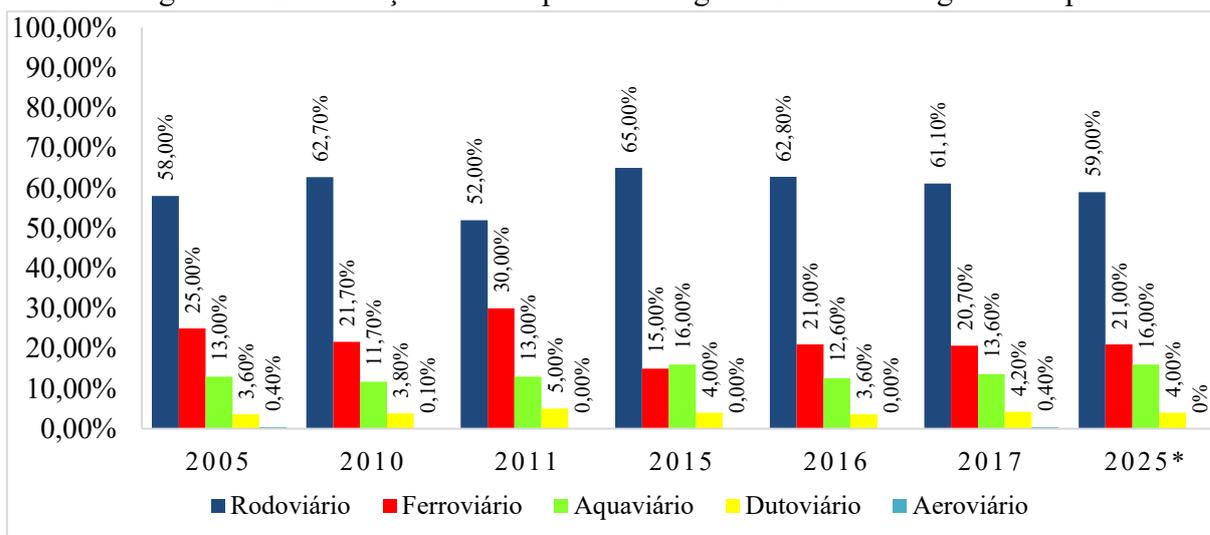
2.1 O SISTEMA DE TRANSPORTES BRASILEIRO

Como mencionado anteriormente, o transporte de carga por caminhões detém a maior parcela de participação no transporte de mercadorias em território nacional. Essa predominância do sistema rodoviário foi impulsionada a partir de 1950, quando o Governo Federal proporcionou investimentos na indústria automobilística, incluindo o ramo de caminhões. Todavia, já em 1920, o então governador de São Paulo, Washington Luís já demonstrava seu favoritismo às rodovias, tornando-se presidente da república em 1926 com o *slogan* “Governar é abrir estradas”. (LANG, 2007; LOBO; VALENTE, 2014).

Simultaneamente ao crescimento do setor rodoviário, o sistema ferroviário brasileiro já se encontrava em decadência durante a década de 1970, tanto pela concorrência com a nova modalidade terrestre em expansão, quanto pela falta de investimentos por parte do Estado e do setor privado (SILVEIRA, 2002). A partir da década de 1980, a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) já enfrentava problemas relacionados ao desequilíbrio técnico-operacional, em decorrência da degradação de seus principais segmentos em bitola métrica e do adiamento da manutenção de material rodante, resultando em uma expressiva perda de competitividade em relação ao modo rodoviário (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2015a).

A Figura 1 ilustra a distribuição do transporte de carga no Brasil, considerando as cinco principais modalidades de transporte de mercadorias, em diferentes períodos de referência, aos quais se teve acesso. Nota-se que o rodoviário sempre se manteve majoritário na movimentação de bens, apesar de sofrer algumas oscilações ao longo do tempo. O modo ferroviário aparece como a segunda modalidade mais utilizada.

Figura 1 – Distribuição do transporte de carga no Brasil ao longo do tempo



(*) Cenário estimado pelo Plano Nacional de Logística para 2025 com as adequações de capacidade (EFVM, EFC, MRS, RMP e FCA).

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2015, 2018); Goulart e Campos (2018); Hijjar (2011); Lobo (2017); Marchetti e Ferreira (2012); Ministério dos Transportes (2012). Nazário, (2000).

2.1.1 Transporte rodoviário

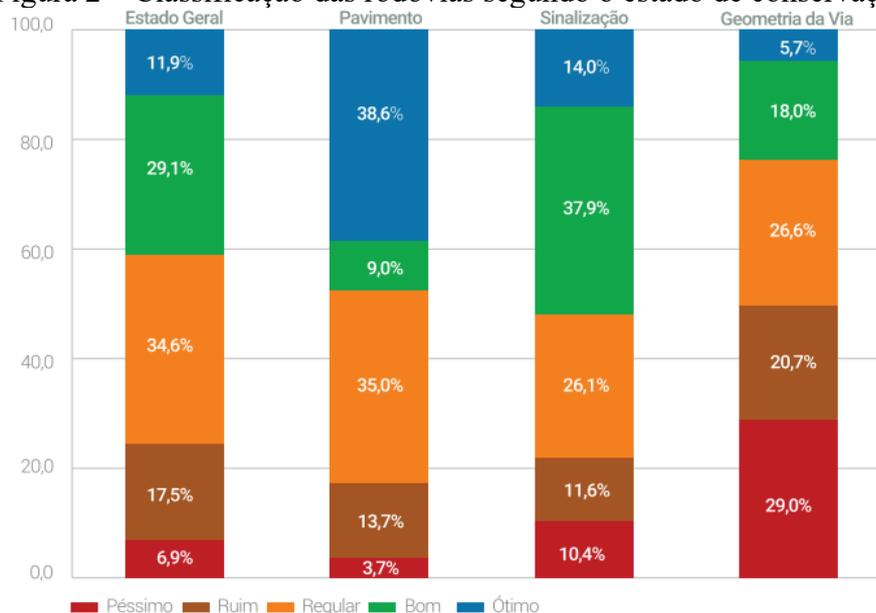
Durante o governo de Juscelino Kubitschek, entre 1956 e 1960, o investimento do Governo Federal, através do Plano de Metas, na atração e implantação da indústria automobilística teve entre suas consequências a ampliação na construção de estradas, além do setor de máquinas, equipamento e autopeças (PAULA, 2008). Entretanto, o salto da preferência pelas rodovias no Brasil se deu a partir da década de 1960, apresentando um crescimento da malha rodoviária federal pavimentada de 8675 km para 47487 km na década de 1980 (CAMPOS NETO; PAULA; SOUZA, 2011).

Apesar deste avanço, Moreira, Freitas Junior e Tolo (2018) estimam que os custos já elevados desta modalidade se tornam ainda maiores, do ponto de vista operacional, ainda devido à precariedade da infraestrutura brasileira. Por outro lado, a revitalização e ampliação da infraestrutura das rodovias pela iniciativa privada implica na cobrança de pedágio para custear tais obras (ROCHA; VANALLE, 2004). Os custos de pedágio, entretanto, podem ser inferiores aos ganhos econômicos promovidos pela melhora na qualidade da via pelos serviços de recuperação, reduzindo o custo total do transporte (TORRES *et al.*, 2017). Bartholomeu e Caixeta Filho (2008) ressaltam que trajetos em melhores condições de infraestrutura resultam em maiores benefícios quanto ao consumo de combustível, tempo de viagem e a manutenção do veículo. No caso brasileiro, as condições observadas das rodovias não é favorável, sendo

apenas 12,4% da malha pavimentada (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2019).

Em relação ao transporte de *commodities*, o aumento dos custos se torna ainda mais impactante, já que se trata de produtos de baixo valor agregado e com grande volume de comercialização (CORREA; RAMOS, 2010), levando ao aumento do número de veículos rodoviários necessários para a movimentação. Há também o problema para o uso de veículos rodoviários quando as características geométricas da pista não são compatíveis com as condições ideais de operação para veículos pesados (PEREIRA NETO; WIDMER, 2008). A Figura 2 indica a classificação das rodovias quando ao seu estado de conservação em função de alguns fatores, dentre eles, a geometria viária.

Figura 2 – Classificação das rodovias segundo o estado de conservação



Fonte: Confederação Nacional dos Transportes (2019)

Ainda segundo a Confederação Nacional dos Transportes (2019), em relação à condição da superfície do pavimento, pouco mais de 75% dos pavimentos da malha brasileira apresentam ao menos algum tipo de deficiência (ver Figura 3). Veículos pesados, o que inclui o transporte de carga, também estão diretamente associados à degradação dos pavimentos rodoviários, o que reduz a vida útil prevista inicialmente para os mesmos de modo proporcional à taxa de sobrecarga (REIS *et al.*, 2017).

Além do pavimento, outros fatores negativos que podem ser encontrados nas rodovias são: seção transversal imprópria, drenagem lateral inadequada, corrugações, excesso de poeira e segregação de agregados, o que também pode contribuir para ocorrência de acidentes ao longo

da via, algo ainda mais grave do que os eventuais prejuízos econômicos (SANTOS; BRITO; SILVA, 2020).

Figura 3 – Condição da superfície de pavimento da malha brasileira



Fonte: Confederação Nacional dos Transportes (2019)

2.1.2 Transporte ferroviário

No Brasil, as primeiras leis de incentivo à infraestrutura ferroviária surgiram a partir da década de 1830. Porém, somente 20 anos depois, foram iniciadas as construções das ferrovias. Entre 1908 e 1914 ocorreu a maior expansão ferroviária brasileira, trazendo consigo um grande peso da dívida externa sobre os incentivos (PAULA, 2008). A partir da década de 1990, é iniciado o processo de desestatização devido à impossibilidade de manter o funcionamento das linhas pela manutenção da infraestrutura e do material rodante, período em que também foram desativadas 8000 km de extensão ferroviária (SILVEIRA, 2002).

Em relação ao transporte de *commodities* agrícolas, o transporte ferroviário representa mais de 45% do montante exportado, sendo que, de modo mais segmentado, o percentual transportado de açúcar, cereais e soja através dos trilhos são cerca de 63%, 42% e 40%, respectivamente (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS, 2020).

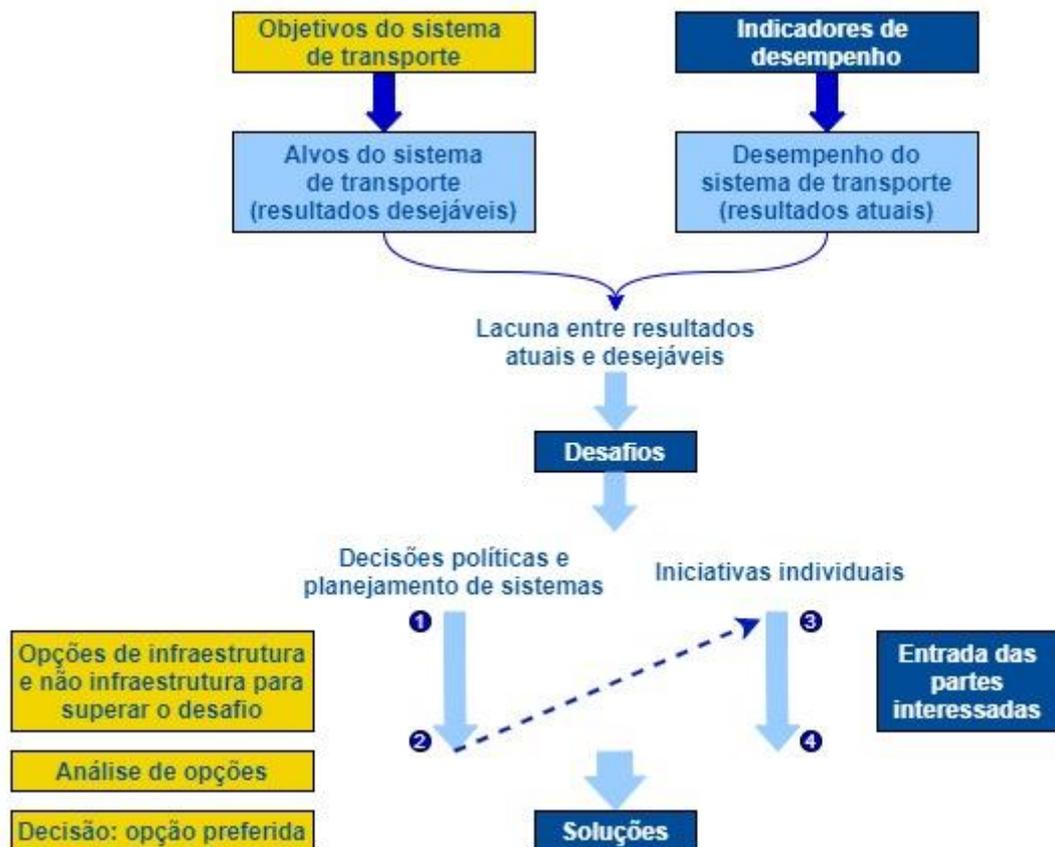
Segundo Alvarenga (2020), é importante que cada modalidade seja utilizada na medida em que se mostra mais favorável em relação aos demais, pois isso proporciona redução dos custos logísticos para os embarcadores e aumenta a competitividade dos produtos a nível

internacional. Além disso, em nível global, a tecnologia ferroviária permitiu uma redução do tempo de deslocamento, aumento da segurança e confiabilidade no transporte de bens e pessoas (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2013).

2.2 FRAMEWORK PARA AVALIAR AS ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE

Segundo o Transport and Infrastructure Council (2022), *framework* é um sistema de apoio a atividades e decisões, com uma abordagem lógica e multi-etapas com finalidade de atingir metas de alto nível e objetivos de um sistema de transporte. Possui como conceitos centrais a definição dos problemas atuais e objetivos a serem alcançados pelo sistema, resultados de avaliação, alternativas e soluções a serem consideradas. A Figura 4 apresenta a estruturação de um *framework* para aprimorar um sistema de transporte.

Figura 4 – Relação entre os componentes de um *framework*



Fonte: adaptado de Transport and Infrastructure Council (2022)

Dadas as ocorrências históricas de queda na expansão da infraestrutura, e consequente mudança de foco para a manutenção e planejamento na utilização da rede já existente, o

desenvolvimento de um *framework*, considerando as principais características do serviço a ser aprimorado, se mostra benéfico na obtenção de melhores práticas para administração do sistema de transporte (ARIF; BAYRAKTAR, 2012). Tal característica pode ser observada na rede Rumo Malha Sul, a qual tem se mostrado estagnada quanto à implantação de novos ramais. A proposta de um *framework* também se adequa ao desenvolvimento de modelos de previsão para o planejamento de políticas de longo prazo em sistemas transporte (HE; HAASIS, 2020), uma característica comum em relação aos sistemas de simulação (ver Figura 5).

Figura 5 – Etapas de um *framework* para modelos de previsão



Fonte: adaptado de Popper (2008)

Para avaliação de índices de sustentabilidade, Jeon e Amekudzi (2014) destacam diversas abordagens de *frameworks* quanto aos indicadores e métricas de um sistema em análise, sendo um exemplo o modo como índices econômicos, sociais e ambientais podem ser afetados pelos agentes dentro do sistema de transporte. Fatores adicionais podem ser incluídos, como avalia Wang (2014) ao considerar os seguintes indicadores na comparação do nível de sustentabilidade entre duas megalópoles: 1) consumo de petróleo, emissão de NO_x, uso do solo e níveis de excesso de ruído como fatores ambientais; 2) número de acidentes, perdas nos acidentes e veículos de transporte público por 10000 habitantes como fatores sociais; 3) proporção de gastos com tráfego, investimentos em sistemas de transporte e valores de saída na

indústria de transporte como fatores econômicos; 4) extensão de ferrovias e rodovias, densidade da rede de transporte, rotatividades total e por área dos passageiros como fatores de mobilidade.

Miller, Witlox e Tribby (2013) relacionam abordagens para avaliação de indicadores para os serviços de transporte, citando como exemplo de abordagem indireta a análise multicritério, voltada para a normalização de indicadores individuais, onde atribui-se pesos relacionados ao grau de importância a cada indicador a ser atendido. Porém, outros métodos também podem compor um *framework* de análise, como o custo-benefício (DE RUS *et al.*, 2022), processos de decisão em geral (STANK; GOLDSBY, 2000), pesquisa de campo e inferência (FLORA; EWBANK; VIDAL VIEIRA, 2019), entre outros.

2.2.1 Comparativo entre modalidades

A movimentação de cargas exige que a modalidade adotada atenda da melhor forma às necessidades do embarcador, do destinatário e também se adeque às propriedades da carga em si. Ocorre que, para cada exigência, uma determinada alternativa se sobressai em relação a outra. Desta forma, independentemente da ordem na qual a operação intermodal de transportes ocorra, sua essência está no aproveitamento de características chave de cada sistema, a fim de extrair as principais vantagens para cada uma das especificidades, além de simplesmente o custo, tais como frequência dos serviços, rapidez na entrega, disponibilidade de instalações específicas de manuseio, atendimento a requisitos específicos de embalagem, segurança ou a capacidade de movimentação de grandes volumes (LOWE, 2005). As características individuais de cada modo devem ser compreendidas para que sejam incorporadas nos processos de planejamento do sistema de transporte, ao passo em que os mesmos se complementam no que diz respeito a seus atributos funcionais. (HOEL; GARBER; SADEK, 2010).

Segundo Nazário (2000), no Brasil, a Lei N° 9.611 de 19 de fevereiro de 1998, a multimodalidade é definida como o transporte regido por um único contrato que utiliza duas ou mais modalidades de transporte, desde a origem até o destino, sendo executado sob responsabilidade única de um Operador de Transporte Multimodal, de maneira que o mesmo possua ativos suficientes para executar a movimentação.

Entende-se como transporte intermodal de cargas a utilização de dois ou mais sistemas que, combinados, sejam adequados para a formação de um sistema de transportes integrado que visa alcançar a eficiência operacional, um bom custo-benefício na entrega de bens e de modo sustentável do ponto de vista ambiental desde o ponto de origem até o destino final. Na maioria dos casos, invariavelmente consegue-se uma movimentação eficiente utilizando-se apenas duas

modalidades de transporte. A combinação mais comum é a coleta e entrega final através de rodovias junto ao transporte intermediário no tronco principal através de ferrovias, conhecida como combinação rodoferroviária (LOWE, 2005).

Segundo a *European Conference of Ministers of Transport* (1993) apud Nazário (2000), considera-se intermodalidade o movimento de bens em uma única unidade de carregamento, que usa sucessivos modos de transporte sem manuseio dos bens na mudança de um modo para outro. Há também a teoria que classifica o transporte intermodal como um subtipo de transporte multimodal, cuja principal peculiaridade, como mencionado anteriormente, é o fato de não haver manuseio da carga transportada (STEADIESEIFI *et al.*, 2014). Portanto referir-se às operações de rodotrilho como intermodais se mostra mais apropriado, embora algumas características do conceito multimodal sejam pertinentes ao sistema de rodotrilhos.

2.2.2 Indicadores para a tomada de decisão

Segundo Punakivi e Hinkka (2006), estão entre os critérios mais comuns para escolha de modalidade: as práticas do setor contratante, características dos produto, preço do serviço, expectativas do mercado e dos clientes, bem como os cronogramas da rede de fabricação. Os autores identificam como vários setores da indústria priorizam determinadas características no critério de escolha do modal mais adequado (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Critérios de seleção dos modos de transporte por setores industriais

	Eletrônicos	Farmacêutica	Maquinário	Construção
Critério 1	Qualidade*	Velocidade	Preço	Preço
Critério 2	Velocidade	Conveniência**	Confiabilidade	Cronograma
Critério 3	Preço	Segurança	Pontualidade	Pontualidade
Critério 4	Conveniência**	Fluência	Velocidade	Conveniência**

(*) Inclui confiabilidade, acurácia e segurança em um único critério.

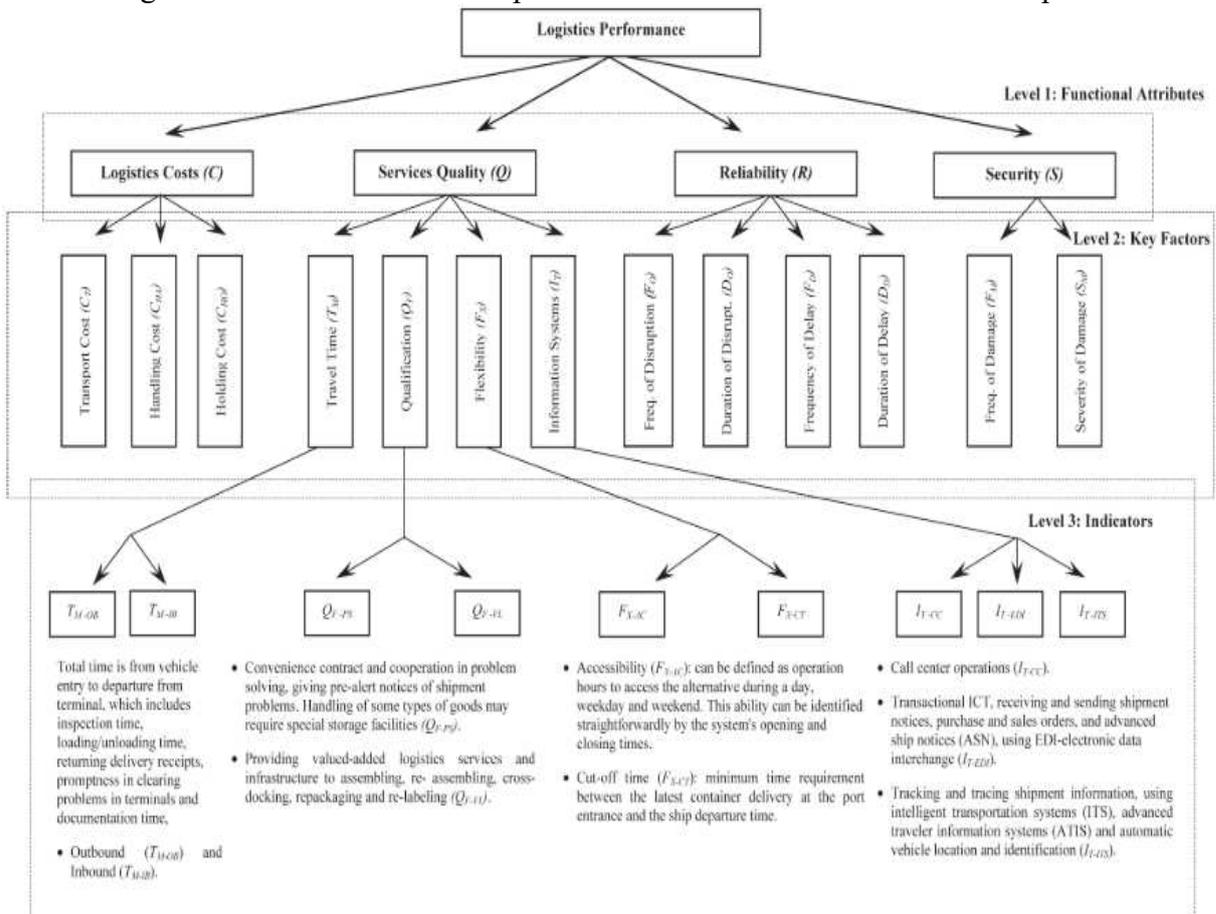
(**) Capacidade de levar em consideração características de produtos específicos.

Fonte: elaborado com base em Punakivi e Hinkka (2006)

Para o transporte de mercadorias, evidencia-se uma priorização do custo de movimentação, assim como do tempo em trânsito (BONK E KOWALSKA, 2020; MACHARIS; MEERS E VAN LIER, 2015). Em seguida, são identificados outros quesitos que pesam no momento da escolha, como frequência de oferta de serviço e confiabilidade (FEO; ESPINO E GARCÍA, 2011), sendo estes, em alguns casos, mais importantes que o tempo de transporte (DZEMYDIENĖ; BURINSKIENĖ E MILIAUSKAS, 2021).

Utilizando um procedimento de análise hierárquica de lógica difusa, Kunadhamraks e Hanaoka, (2008) avaliam diferentes atributos que impactam na escolha da modalidade, bem como seus subatributos: custos (transporte, manuseio e estoque); qualidade (tempo de viagem, qualificação, flexibilidade e sistemas de informação); confiabilidade (frequências e durações nas atividades de desmembramento e atrasos); e segurança (frequência e severidade de danos). Na Figura 6 são destacados os atributos e subatributos avaliados pelos autores.

Figura 6 – Atributos avaliados para uma escolha de modalidade de transporte



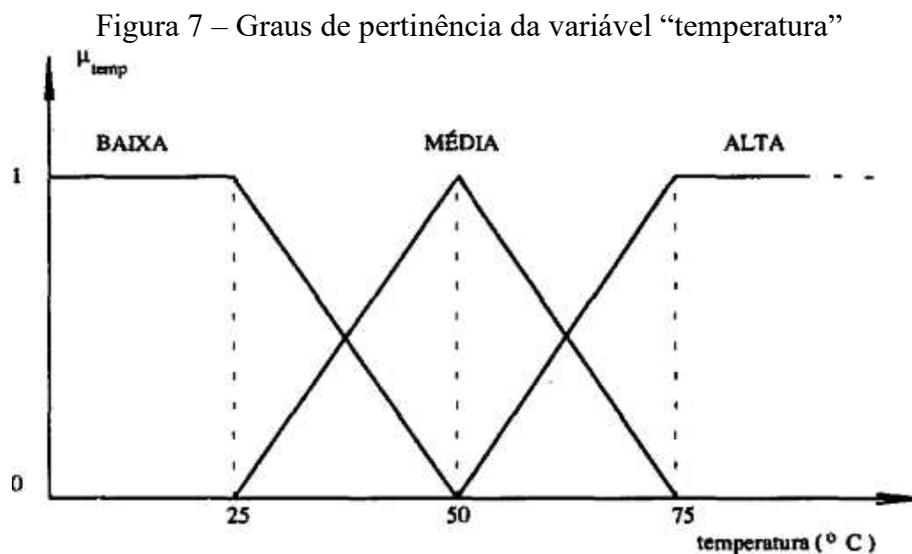
Fonte: Kunadhamraks e Hanaoka, (2008)

2.2.3 Sistema de lógica difusa

Seja X um espaço de ponto. Um conjunto difuso A em X é caracterizado pela função de pertinência $f_A(x)$, que associa a cada elemento de $x \in X$ um grau de pertinência ao mesmo no intervalo $[0, 1]$ (ZADEH, 1965). O autor exemplifica a função $f_A(x)$ que representa conjunto de números “muito maiores que 1”, de modo que número 5 possui um grau de pertinência mais próximo a 0 do que o número 100, ou seja, o número 100 pertence mais ao conjunto de “muito

maiores que 1” do que o número 5. Na medida que x se distancia de 1, mais próxima a função de pertinência estará do valor 1 no intervalo fixado.

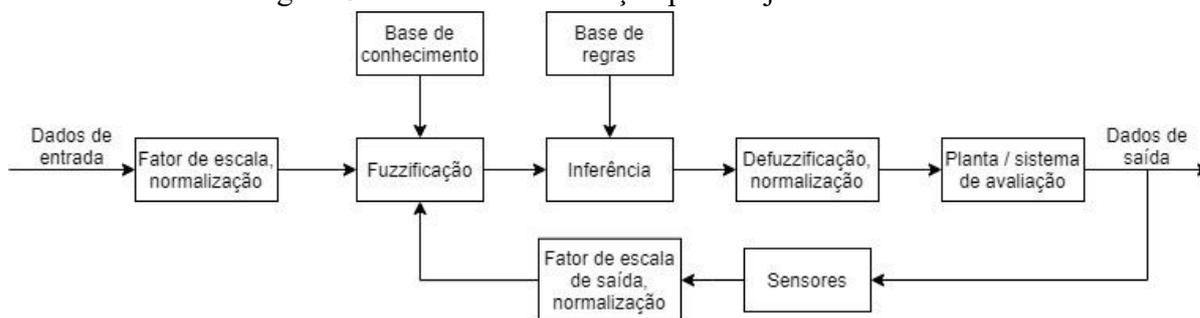
Diferentemente da lógica de conjuntos clássicos, um sistema fuzzy é constituído por variáveis linguísticas, que podem pertencer a mais de um conjunto simultaneamente. A temperatura é um exemplo de variável que pode assumir as classificações baixa, média e alta, a depender do observador, por exemplo (GOMIDE; GUDWIN, 1994). Pela Figura 7, pode-se observar que, na medida em que a temperatura se aproxima de 50 °C, seu grau de pertinência aumenta em relação à função Média e diminui em relação à função Baixa.



Fonte: Gomide e Gudwin (1994)

Wang (2022) propõe que a compreensão semântica e inferência difusa são duas habilidades centrais do cérebro humano que desempenham um papel fundamental em pensar, perceber e resolver problemas. O processo de avaliação de um determinado índice começa pela fuzzificação, o que torna uma variável clássica (ou crisp) uma variável difusa. Ao final, é gerada uma variável de resposta pelo processo de defuzzificação, que consiste em tornar escalar um determinado valor fuzzy, com intuito de proporcionar um índice geral de apoio à decisão (ROSS, 2010). A Figura 8 esquematiza um processo de avaliação por conjuntos nebulosos.

Figura 8 – Sistema de avaliação por conjuntos nebulosos



Fonte: adaptado de Ross (2010)

O Quadro 1 exemplifica *frameworks* que abrangem técnicas de lógica difusa como ferramenta de apoio à decisão.

Quadro 1 – *Frameworks* apoiados por sistemas de lógica difusa

Autores	Objeto de avaliação
Choosakun e Yeom (2021)	Avaliação do transporte público dentro de um sistema de transporte inteligente nas regiões metropolitanas de Bangkok.
Das e Winter (2018)	Abordagem baseada em dados para interpretação do sistema de posicionamento global de <i>smartphones</i> como indicador dos modos de transporte utilizados para apoio ao planejamento urbano.
Koohathongsumrit e Meethom (2022)	Modelo de suporte à decisão para seleção de rotas em uma rede de transporte multimodal.
Iqbal, Khan e Fatima (2018)	Modelagem de processos complexos de tráfego para sistemas de transporte inteligente.
Ortega, L. Otero e C. Otero(2019)	Avaliação de prioridade para implantação de recursos em áreas de tráfego em condições baixas de visibilidade.
Özker e Demirel (2012)	Seleção dos melhores investimentos em projetos de transporte.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

2.2.4 Sustentabilidade nas atividades de transporte

Segundo a NBR ISO 37101 (ABNT, 2021), o desenvolvimento sustentável é classificado como: “desenvolvimento que satisfaz as necessidades ambientais, sociais e econômicas do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprir suas próprias necessidades”. Porém, em determinadas áreas, a interpretação de medidas sustentáveis pode ser caracterizada mais detalhadamente. Banister (2018) afirma que o transporte sustentável possui duas dimensões principais: a primeira diz respeito à tentativa de reduzir a necessidade de viagens através da distribuição espacial de uso do solo para que as distâncias possam ser minimizadas, enquanto a segunda visa garantir que seja utilizada a forma mais

eficiente de transporte, e que a energia necessária provenha de fontes renováveis, ou não, à base de carbono.

Além da sustentabilidade ambiental, o transporte combinado entre diferentes modos também deve observar a manutenção da produtividade, uma vez que existe uma dependência entre os mesmos no desempenho final. Minárik (2021) aponta associações estatísticas positivas, do ponto de vista ambiental, na integração entre os sistemas rodoviário e ferroviário para o transporte de carga na Europa. Para Islam (2018), apesar de o transporte ferroviário europeu se mostrar sustentável, especialmente em períodos de recessão econômica, este se mostra limitado a movimentações entre terminais, devendo ser complementado em demandas por serviços porta-a-porta, sugerindo a combinação rodoferroviária como uma alternativa apropriada.

Entre problemas que podem ser identificados, do ponto de vista sustentável, na busca de alternativas para implantação de políticas eco inovadoras, Orji *et al.* (2019) destacam os seguintes desafios:

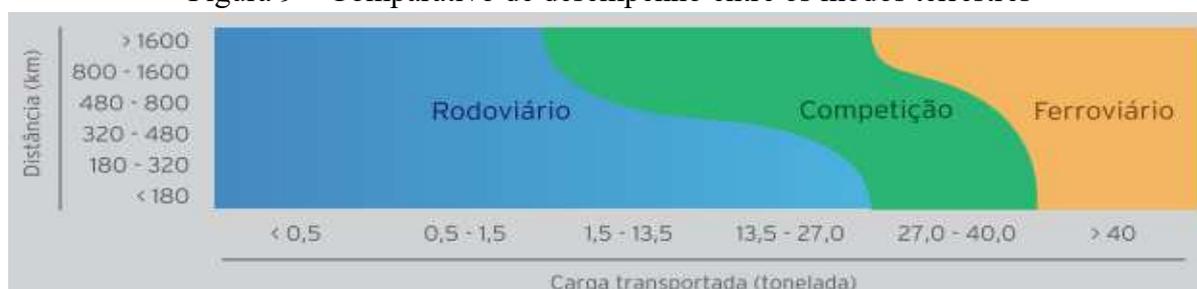
- Gerenciais e organizacionais, que dizem respeito às empresas e sua insuficiência de apoio e comprometimento com tais políticas;
- Sociais e legais, que não contam com ações apropriadas de comunicação e colaboração visando uma sincronia adequada entre associados dentro das atividades de transporte para alcançar modelos sustentáveis;
- Escassez de tecnologias integradas para a redução de impactos ambientais;
- Falta de ações estratégicas que tendem a promover o transporte sustentável nos setores logísticos, desde a falta de mudanças culturais quanto a esta prática até a intensificação da competitividade acima de outros fatores.

2.2.4.1 *Custo de transporte*

Historicamente, considera-se o custo como principal parâmetro analisado como critério de escolha do transporte. Para o transporte terrestre, o ferroviário apresenta a vantagem do menor custo durante o transporte para uma diversidade de cargas transportadas em trânsitos mais longos (LOWE, 2005). Considerando que o atual custo da etapa de movimentação por ferrovias seja mais barato que por rodovias, quanto maior a carga útil do trem (em termos de peso e volume), a distância e a simplicidade do método operacional, mais favorável é a movimentação ferroviária do ponto de vista econômico (MONIOS; BERGQVIST, 2017). Deve-se enfatizar a questão da movimentação por longas distâncias, o que faz com que o menor

custo por quilômetro percorrido do transporte ferroviário seja ainda mais impactante, principalmente considerando a vasta extensão territorial brasileira. Outro fator que afeta negativamente o transporte rodoviário é sua baixa capacidade de carga em relação ao ferroviário, o que, somado ao alto custo dos fretes, faz com que a movimentação por rodovias se torne bastante onerosa (GOULART; CAMPOS, 2018). Em relação à capacidade, existem faixas nas quais um modo leva vantagem sobre o outro, sendo que, quanto maiores a distância e o volume de carga, mais benéfico se torna o modo ferroviário, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Comparativo de desempenho entre os modos terrestres

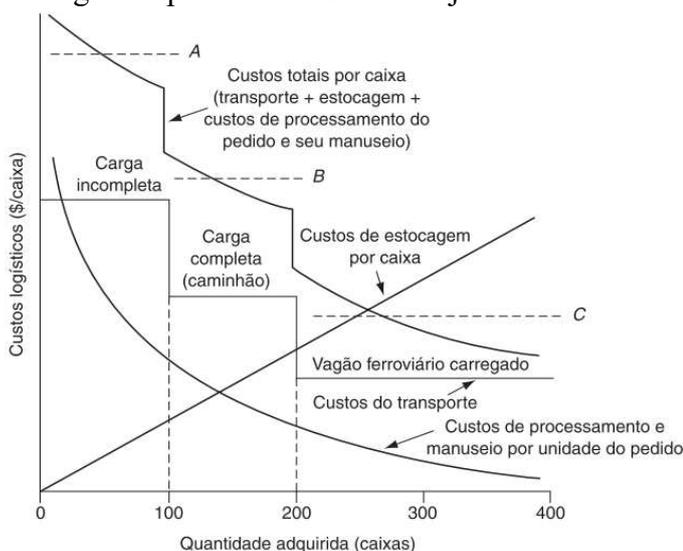


Fonte: Confederação Nacional dos Transportes (2013)

Por outro lado, em relação à flexibilidade de coleta e entrega porta a porta, o sistema rodoviário se sobressai, pois a disponibilidade de vias chega a ser 51 vezes maior, aproximadamente: 1,563 milhões (km) de rodovias contra 30,6 mil (km) de ferrovias (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2017). Outro fator que prejudica o transporte ferroviário quanto à flexibilidade são os custos de manuseio nos terminais de carga (MONIOS; BERGQVIST, 2017).

Em algumas circunstâncias, o transporte em massa pode utilizar da transferência da carga entre modalidades, a fim de alcançar economias de escala, ou seja, retornos viáveis por uma modalidade de menor custo para transporte em grandes volumes (PYRGIDIS, 2016). Segundo Ballou (2007), o princípio de economias de escala promove um desconto no custo unitário quanto maior for o número de produtos envolvidos em uma única transação. A Figura 10 ilustra a diferença de custo logístico em função da quantidade de mercadoria.

Figura 10 – Custo logístico por mercadoria como justificativa de desconto de preço



Fonte: Ballou (2007)

2.2.4.2 Impactos ambientais

A transferência de parte do transporte de carga dos transportes rodoviário e aéreo para o ferroviário e fluvial é considerada uma estratégia central para a redução do consumo energético e dos danos ambientais associados ao mesmo, sendo em muitas situações o transporte ferroviário o modo mais vantajoso em relação ao combustível utilizado e à emissão de CO₂ (KOLB; WACKER, 1995). A maioria das emissões do transporte se originam na modalidade rodoviária, o que justifica os esforços por uma política que promova modos de transporte mais ecológicos, como os trens e navios (KIRSCHSTEIN; MEISEL, 2015). Estima-se que o frete de caminhões representa cerca de 25 a 30% da emissão global de gases de efeito estufa, enquanto veículos leves representam 50% e demais modos de transporte correspondem ao restante deste montante. Além disso, o consumo energético de caminhões leves e vans em curtas distâncias é superior ao de veículos maiores de longa distância (MATTILA; ANTIKAINEN, 2011).

O transporte rodoviário já chegou a contribuir com 76% das emissões de transporte, sendo o principal poluente o CO₂, além de gases como N₂O e CH₄ (KOPP; BLOCK; IIMI, 2013). Porém, fato de o setor rodoviário ser o maior emissor de poluentes pode estar associado à sua maior utilização, principalmente em centros urbanos ao redor do mundo, de modo que o uso intensivo destes meios de transporte explica em grande parte a emissão de CO₂ em diversas regiões do globo (GABRIELE *et al.*, 2013). Pode ser observado o comparativo que torna um

pouco mais clara a emissão desproporcional em relação à distribuição dos transportes ao redor do mundo nos índices da Tabela 2 e Figura 11 que se referem ao ano de 2005.

Tabela 2 – Composição da matriz de carga

Região	Caminhão (%)	Ferrovia (%)	Total (%)
América do Norte (OCDE)	40	60	100
Europa (OCDE)	86	14	100
Pacífico (OCDE)	72	28	100
China	25	75	100
América Latina	84	16	100

Fonte: adaptado de Gabriele *et al.* (2013)

Figura 11 – Emissão global de CO₂ por modo de transporte (2005)



Fonte: adaptado de Kopp, Block e Iimi (2013)

Os níveis de emissão das modalidades terrestres também podem variar de acordo com o parâmetro analisado: o transporte rodoviário pode ser menos prejudicial que o ferroviário, ambos movidos a diesel, pelo fator de emissão de poluentes em função da massa de combustível consumido (g-polvente/kg-combustível), considerando os gases CO₂, NO_x e material particulado PM₁₀. Porém, quando se avalia o fator de emissão em função da quantidade de carga ou de passageiros transportados (gCO₂/tku ou gCO₂/passageiro-km), o transporte ferroviário é ligeiramente mais benéfico, podendo representar cerca de metade da emissão do transporte rodoviário para passageiros e um quarto para cargas (PSARAFTIS; KONTOVAS, 2016).

Além do dióxido de carbono e dos óxidos de nitrogênio, são identificados os seguintes poluentes na matriz brasileira: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não metano (NMHC), aldeídos (RHCO), material particulado (MP), gases evaporativos e também o gás metano (CH₄). Dentre as soluções propostas pelo Ministério do Meio Ambiente está a implementação de um sistema de transporte integrado e menos focado no setor rodoviário (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2010). A Tabela 3 classifica diversos estudos de casos comparativos que tiveram como objeto a emissão de poluentes por modo de transporte.

Tabela 3 – Emissão de poluentes por modalidade de transporte

Autor(es)	Unidade	Modalidade		
		Rodoviário	Ferroviário	Aquaviário/ Aéreo
Marchetti e Ferreira (2012)	CO ₂ ($\frac{kg}{1000\ tku}$)	116	34	10 / -
	NO _x ($\frac{g}{1000\ tku}$)	4617	831	254 / -
	CO ₂ ($\frac{g}{TEU-milha}$)	1001	201	1094 / -
Winebrake <i>et al.</i> (2008)	PM ₁₀ ($\frac{g}{TEU-milha}$)	0,12	0,09	0,98 / -
	SO _x ($\frac{g}{TEU-milha}$)	0,22	0,04	3,33 / -
Wang, Chen e Fujiyama (2015) ⁽¹⁾	CO ₂ ($\frac{g}{passageiro-km}$)	28,60	48,85	-
Bigazzi (2019) ⁽¹⁾⁽²⁾	CO ₂ ($\frac{g}{passageiro-km}$)	165	109 - 96	- / 104
Kolb e Wacker (1995) ⁽³⁾	CO ₂ caso 1 (%)	100	18	38 / -
	CO ₂ caso 2 (%)	100	23	22 / -
	CO ₂ caso 3 (%)	100	97	154 / -
Skrúcaný <i>et al.</i> (2018) ⁽⁴⁾	CO ₂ ($\frac{t}{GJ}$)	0,76	0,051	0,076 / -
M. Witaszek e K. Witaszek (2015)	CO ₂ ($\frac{g}{t-km}$)	184,5	15,7	29,8 / 948,8
Zhang <i>et al.</i> (2020)	CO ₂ ($\frac{g}{t-km}$)	77	13	-
Dai, Yang e Li (2018)	CO ₂ ($\frac{kg}{TEU-km}$)	2,189	0,094	0,423/-
	CO ₂ ($\frac{t}{10^6\ t-km}$)	94,53	2,69	8,97 / -
Pinchasik <i>et al.</i> (2020) ⁽⁵⁾	NO _x ($\frac{t}{10^6\ t-km}$)	0,135	0,012	0,157 / -
	PM ($\frac{kg}{10^6\ t-km}$)	1,55	0,48	2,70 / -
Cristea <i>et al.</i> (2013) ⁽⁶⁾	CO ₂ ($\frac{g}{t-km}$)	119,7	22,7	4,5 a 16,3 / 476 a 1020

¹ Comparativo somente entre modos de transporte coletivo.

² Emissão pelo modal ferroviário de movimentação urbana e intermunicipal, respectivamente.

³ Emissão relativa em função do consumo energético com base no modal rodoviário.

⁴ Emissão em função da quantidade energética consumida.

⁵ Cenário previsto para 2030.

⁶ Valores mínimo e máximo de emissão dos modos marítimo e aéreo em função do tipo de carga ou veículo.

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

2.2.5 Os rodotrilhos e as operações intermodais

2.2.5.1 Características básicas

A partir de meados do século 20, os rodotrilhos se apresentaram como um meio de recapturar o transporte de manufatura perdido para o transporte rodoviário, o que permitiria que as ferrovias competissem de modo mais próximo às rodovias até mesmo para distâncias mais curtas (MORASH; CALANTONE, 1991).

O conceito de transporte bimodal para trens classificados como rodotrilhos é a composição de elementos repetidos e descritos pelas seguintes propriedades (MINDUR, 2016) e expressos na Figura 12:

- Semirreboques (vagões fechados ou tanques);
- Um adaptador que admite o suporte indireto de 2 reboques em um mesmo truque ferroviário, seja a conexão ferroviária com locomotiva ou com trem de carga;
- Truque ferroviário de dois eixos equipado com um conjunto de dispositivos de freio.

Figura 12 – Elementos do trem bimodal de rodotrilho

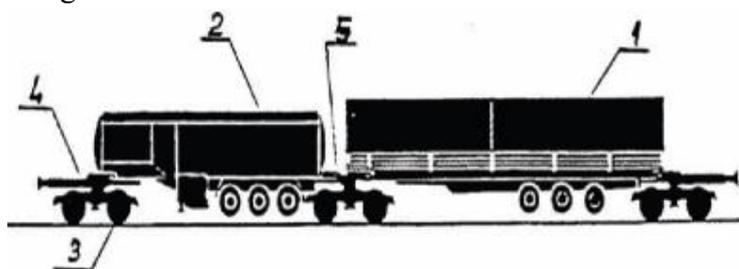


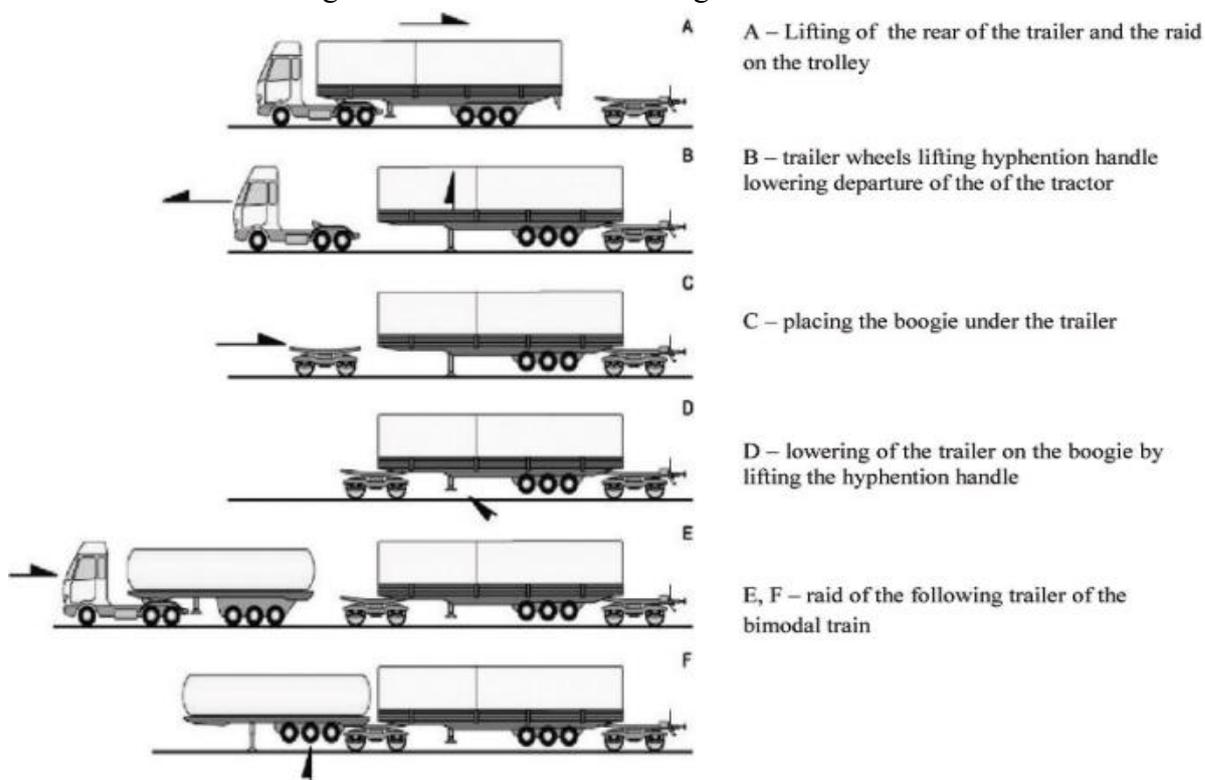
Fig. 1. Bimodal train elements: 1 - Chest road - rail trailer, 2 - tank semi-trailer road and railway, 3 - Standard bogie, 4 - utmost adapter train devices, 5 - middle adapter.

Fonte: Mindur (2016)

O autor também descreve o processo de montagem dos rodotrilho (ver Figura 13) desde a chegada do veículo rodoviário, passando pela manobra e desacoplamento do semirreboque após a acoplagem de uma de suas extremidades sobre o primeiro truque, seguido

da fixação do compartimento ao truque subsequente, que receberá então o próximo semirreboque do conjunto.

Figura 13 – Processo de montagem do rodotrilho



Fonte: Mindur (2014)

Dentre os benefícios da utilização dos rodotrilhos está a maior agilidade nos terminais intermodais, pois a mudança de modalidade se dá pela movimentação do compartimento e não pela transbordo de mercadoria entre as embarcações (PEREIRA; SILVA; SANTOS, 2019). Testes recentes foram realizados na Índia junto ao Ministério das Ferrovias do país para estabelecer uma conexão entre as cidades de Chennai e Palwal. O objetivo é reduzir a concentração do transporte rodoviário, porém, sem a interrupção dos serviços porta a porta, já que o transporte de caminhões ainda será requerido nos trechos iniciais e finais (SOUTHERN RAILWAY, 2019). A Figura 14 ilustra um arranjo prático de composição rodotrilho na Austrália.

Figura 14 – Acoplamento dos semirreboques ao truque para composição de rodotrilho



Fonte: *Department of Infrastructure and Regional Development* (2016)

O surgimento da tecnologia de rodotrilho se deu com o objetivo de facilitar as transferências nos terminais. Inicialmente, este sistema intermodal era visto particularmente como um desenvolvimento tecnológico que oferecia um potencial competitivo em um mercado de curto alcance, uma vez que se acreditava em seu domínio na utilização de caminhões além das rodovias (DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND REGIONAL DEVELOPMENT, 2016). Atualmente, poucas regiões ao redor do mundo ainda utilizam a técnica de rodotrilhos para movimentações de carga. Isso se deve ao fato de que operações mais sofisticadas e dotadas de maior tecnologia reduziram sua utilização, sendo o principal exemplo a utilização de contêineres, como aponta o Departamento de Infraestrutura e Desenvolvimento Regional da Austrália:

Embora os sistemas de Rodotrilho e *piggyback* convencional (TOFC) foram amplamente adotados na América do Norte, estes envolviam o uso de tecnologia inflexível sob medida, ou crescentes penalidades incorridas de carga útil em relação a sistemas intermodais alternativos emergentes – especificamente *containers* duplamente empilhados – e o uso de ambos os sistemas os declinou para funções menores, suplantadas por guindastes convencionais de içamento de *containers* sobre várias formas de vagões ferroviários (DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND REGIONAL DEVELOPMENT, 2016).

Desta forma, dadas as características semelhantes, surge a seguinte questão: por que utilizar os rodotrilhos e não contêineres? Segundo Kim e Günther (2007), o desenvolvimento de um terminal de operações com contêiner requer uma série de alterações no *layout* das instalações, podendo necessitar até mesmo da construção de uma estrutura completamente nova, o que afetaria a maior parte dos terminais brasileiros. De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (2021a), em que constam as declarações de rede das concessões ferroviárias, apenas 4 dos 108 terminais atendidos pela rede da concessão Rumo Malha Sul dispõe de operações de contêiner.

Sendo assim, a resposta pode ser resumida ao fato de que a utilização ampla de contêineres é dificultada pelo déficit na estruturação de instalações adequadas, de modo que o rodotrilho, mesmo que não seja uma solução definitiva para cargas de melhor adaptação aos contêineres, pode ser adotado como um recurso intermediário de curto prazo, visto que seus equipamentos de manipulação são mais simplificados, requerendo basicamente um cavalo mecânico auxiliado pela locomotiva de manobra (BRUNS, 2002), e seu tempo de manuseio, apesar de superior aos contêineres, apresenta uma diferença de apenas alguns minutos (FERREIRA; SIGUT, 1995).

Por fim, produtos classificados como “Containerizáveis” geralmente apresentam níveis de processamento industrial mais elevados, como é o caso dos fármacos, máquinas e equipamentos elétricos e mecânicos, produtos químicos industriais, entre outros. Em contrapartida, o milho e a soja em grãos não apresentam características favoráveis ao uso de contêineres para sua movimentação, sendo classificados como granéis sólidos agrícolas (GSA), tornando plausível a continuação do uso de rodotrilhos para tais produtos (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2021).

Apesar disso, alguns estudos sugerem impactos positivos pela containerização de grãos. Para períodos de baixa produção, os compartimentos específicos para grãos podem se encontrar ociosos pela falta de demanda, enquanto o sistema de contêiner pode ser melhor aproveitado, visto que as unidades excedentes tendem ser utilizadas para outros tipos de carga em uma composição (PRENTICE; HEMMES, 2015). Entretanto, os autores ainda ressaltam que não se trata de um sistema de substituição aos reboques agrícolas convencionais, sendo apenas uma alternativa de adequação de custos, de maneira que, em situações nas quais sejam atendidos parâmetros de qualidade e economias de escala, o sistema convencional ainda será predominante. Outro parâmetro benéfico da containerização de grãos, complementados por sacos herméticos, é a proteção contra insetos que venham a prejudicar o produto durante seu armazenamento, dada a maior capacidade de vedação dos contêineres (WILLIAMS *et al.*, 2016).

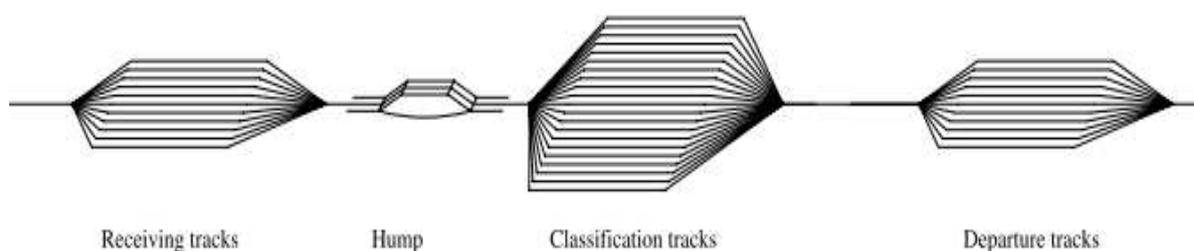
A proposta do sistema intermodal por rodotrilhos se diferencia pelas propriedades operacionais em si, em que o compartimento é movido tanto por rodovias como por ferrovias. A ideia é apoiada em modelos de micro e macro simulação discreta, cujas discussões não são amplamente disponibilizadas na literatura. Também se destaca a tentativa de ampliação da participação do setor ferroviário por meio do aprimoramento das operações atualmente observadas nos terminais, sem que haja impactos em grande escala às características fundamentais de flexibilidade e frequência do transporte rodoviário.

2.2.5.2 Terminais de operação

Os terminais ferroviários, por sua vez, requerem um bom gerenciamento operacional para que este sistema bimodal possa ser aplicado, visto que os mesmos têm um grande impacto no ciclo de vagões, pois o tempo de operação nos terminais está diretamente ligado ao montante da carga transportada (ROSA, 2009). Além disso, os custos em terminais ferroviários, que podem representar de 50 a 70% do custo total de uma ferrovia, bem como os atrasos na coleta e entrega, impactam negativamente na capacidade do setor ferroviário em competir com as rodovias (FERREIRA; SIGUT, 1995). A área de carregamento e descarga é parte elementar do sistema de transporte ferroviário, representando as instalações com estrutura e equipamentos necessários para as operações (OL'SHANSKII, 2012).

Enquanto os terminais ferroviários são áreas projetadas para operações de carregamento e descarga de produtos, os pátios ferroviários são instalações dotadas de um conjunto de vias que, além de carregamento e descarga, efetuam as operações de formação de trens, manobras e estacionamento de carros e vagões (ROSA, 2009). Pelo fato de não haver necessidade de transferência de carga, a aplicação dos rodotrilhos se daria preferencialmente nos pátios ferroviários (ver Figura 15), onde as operações são, essencialmente, desmembramento, manobra e formação dos trens.

Figura 15 – Sistema de classificação de vagões



Fonte: Boysen *et al.* (2013)

As operações de rodotrilhos são simplificadas por não exigirem equipamentos de elevação complexos ou guindastes, de maneira que apenas um operário e um equipamento pneumático realizam a transferência unitária de compartimento em um intervalo entre 3 e 4 minutos (LIBA, 1982). O carregamento e formação dos trens nos pátios é realizado por um supervisor, que tem como objetivo organizar a sequência de trens que tenham cargas com destino em comum, tendo em vista que uma baixa flexibilidade no pátio de manobras impacta diretamente na agilidade de classificação e despacho dos trens (POWELL; CARVALHO,

1998). Segundo Bruns (2002), algumas adaptações aos terminais em diversos setores são exigidas para que o sistema intermodal com rodotrilho possa ser operado satisfatoriamente. O Quadro 2 indica os setores que demandam modificações para atender às necessidades deste sistema.

Quadro 2 – Adaptações dos terminais ao sistema rodotrilho

<p>Setor ferroviário:</p> <ul style="list-style-type: none">- Não sofre mudanças <p>Setor rodoviário:</p> <ul style="list-style-type: none">- Pavimentação de acessos- Pavimentação entre vias férreas <p>Setor de suporte:</p> <ul style="list-style-type: none">- Controle e segurança patrimonial <p>Meios de movimentação dos semirreboques:</p> <ul style="list-style-type: none">- Truques ferroviários- Acoplador de truque- Equipamento de manobra do truque- Cavalos mecânicos- Locomotivas de manobra <p>Meios de movimentação das cargas:</p> <ul style="list-style-type: none">- Empilhadeiras- Semirreboques de rodotrilho
--

Fonte: elaborado com base em Bruns (2002)

2.3 SISTEMAS DE SIMULAÇÃO

Segundo Bateman *et al.* (2013), simulação é a experimentação de um sistema real através de modelos, de modo que possibilita criar e simular fenômenos desejados, permitindo conferir o quão representativas seriam as mudanças, colaborando com a tomada de decisões. Prado (2014) cita como exemplo de aplicação da simulação em diversas áreas, como linhas de produção, logística e sistemas de transporte, comunicações, processamento de dados, sistemas de atendimento, entre outros.

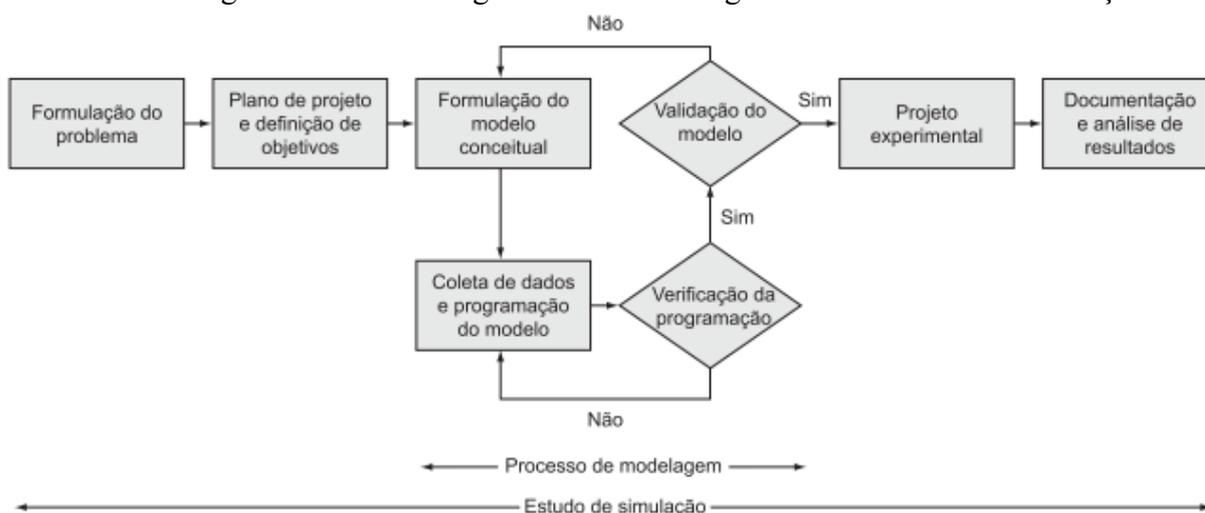
Simulação de eventos discretos e dinâmica de sistemas são duas ferramentas de modelagem amplamente usadas em sistemas de apoio a decisão. Este, por sua vez, proporciona soluções para uma série de questões em níveis estratégicos, operacionais e táticos (TAKO; ROBINSON, 2012). Os autores destacam que há uma crença geral de que a simulação de eventos discretos é mais apropriada para a modelagem de problemas tático-operacionais, enquanto dinâmica de sistemas se adequam melhor a problemas em nível estratégico.

2.3.1 Simulações de Eventos Discretos (SED)

Segundo Sakurada e Miyake (2009), simulação de eventos discretos abrange o estudo de modelos de simulação nos quais as variáveis alteram seu estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, ao contrário dos modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo. Estes modelos surgiram com a necessidade de se modelar sistemas manufatureiros, sendo seu desenvolvimento direcionado ao aprimoramento dos desenhos e operações nas plantas de manufatura (BRAILSFORD; CHURILOV; DANGERFIELD, 2014).

Os SEDs possuem o potencial de investigar, ao menos numericamente, modelos de cadeia de suprimento de forma muito realista. A principal contribuição se encontra em sua capacidade de modelagem e negociação de incertezas subjacentes à qualidade do produto e à cadeia logística, bem como sua interação (SALVATORE *et al.*, 2013). O processo de modelagem requer, inicialmente, a compreensão clara da estrutura e dinâmica do sistema real a ser simulado, para que possa proceder com os procedimentos experimentais que possibilitarão a análise de seu comportamento (SAKURADA; MIYAKE, 2009). As etapas de elaboração de um modelo de simulação estão detalhadas na Figura 16.

Figura 16 – Processo genérico de modelagem em um estudo de simulação



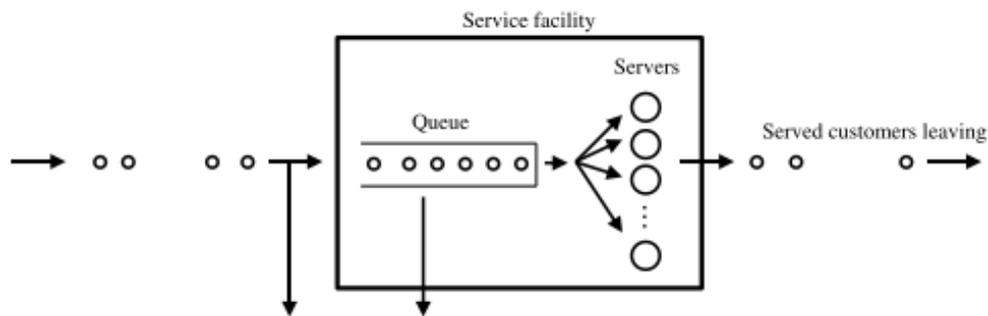
Fonte: Sakurada e Miyake (2009)

2.3.2 Comportamento das entidades e processos no sistema

Um evento simultâneo aos processos de manipulação da carga nos terminais ferroviários é a formação de filas de caminhões para a transferência de mercadorias aos

armazéns, bem como as de vagões que recebem essa carga para transportá-las ao seu destino final. Shortle *et al.* (2018) afirmam que a análise quantitativa de um sistema de filas requer uma caracterização matemática dos processos inerentes ao mesmo, sendo que, em muitas situações, seis características básicas fornecem uma descrição adequada deste sistema: 1) Padrão de chegada das entidades/clientes; 2) Padrão de atendimento dos servidores; 3) Número de servidores e canais de serviço; 4) Capacidade do sistema; 5) Disciplina da fila; 6) Número de etapas de serviço. A Figura 17 descreve uma representação de um sistema em que se observa a formação de filas.

Figura 17 – Representação de um sistema de filas



Fonte: Shortle *et al.* (2018)

Deste modo, Alves e Menezes (2010) destacam que, a partir de uma demanda muito alta pelos serviços de movimentação, excede-se a capacidade do sistema em prover os mesmos. Os autores abordam a notação de Kendall-Lee (Figura 18) para representar os elementos fundamentais em um sistema, dada sua aceitabilidade universal para aplicação em processos estocásticos.

Figura 18 – Notação de Kendall-Lee

-	/	-	/	-	/	-	/	-	/	-
Distribuição dos tempos entre chegadas		Distribuição dos tempos de serviço		Número de servidores		Disciplina da fila		Número máximo de usuários no sistema		Tamanho da fonte de usuários

Fonte: Alves e Menezes (2010)

Segundo Alves e Menezes (2010), as notações para as distribuições de chegada e atendimento das entidades no sistema podem ser definidas como M para processos de Markov, G para distribuições genéricas e E para distribuição de Erlang. Os processos de Markov descrevem distribuições Exponencial ou Poisson, sendo o comportamento das entidades do tipo

nascimento e morte, o que corresponde às suas chegadas e saídas dos sistema, respectivamente (BHAT, 2015; SHORTLE *et al.*, 2018). A Tabela 4 identifica e descreve alguns tipos de notação de Kendall-Lee.

Tabela 4 – Descrição de notações de Kendall-Lee

Notação	Descrição
$M/M/1$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com apenas um atendente.
$M/M/s$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com s atendente ($s > 1$).
$M/M/s/K$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com s atendente ($s > 1$) e um limite de capacidade K de entidades permitidas no sistema ($K \geq s$).
$M/M/1/K$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com apenas um atendente e um limite de capacidade K de entidades permitidas no sistema ($K > 1$).
$M/M/s/s$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com s atendente ($s > 1$) e capacidade s de entidades permitidas no sistema, não sendo permitida a entrada de novas entidades enquanto todos os pontos de atendimento estão ocupados.
$M/M/\infty$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com um valor infinito de atendentes. Consequentemente, não há filas nesta configuração.
$M/M/1/1$	Tempo entre chegadas e de atendimento Markoviano com apenas um atendente e o limite de capacidade de uma única entidade permitida no sistema.

Fonte: elaborado com base em Bhat (2015)

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Como considerações finais do Capítulo 2, destaca-se a caracterização dos modos de transporte terrestres quanto aos fatores de custo de transporte e impactos ambientais, dadas as referências da literatura quanto aos fatores de emissão de poluentes. O capítulo também introduz o conceito de *framework*, além de definir análise lógica difusa, a qual será utilizada no estudo de caso para avaliação de alternativas segundo os indicadores selecionados.

Por fim, aborda-se a definição de modelos de simulação e como estes podem ser representativos de sistemas dinâmicos como é o exemplo das operações de transporte. Diversos elementos devem ser considerados na concepção e elaboração de modelos, sendo um apoio às decisões para os principais responsáveis pela gerência nas operações de transporte terrestre de carga, de modo que uma maior precisão da modelagem garante maior confiabilidade para uma aplicação real.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Após a definição do objeto de estudo e a seleção das produções científicas presentes na literatura acerca do tema, prossegue-se com a formulação do problema, elaboração do modelo conceitual e construção do modelo de simulação que possibilita a comparação operacional entre os sistemas de transbordo e intermodal. As etapas da pesquisa são descritas em maiores detalhes no item 3.2.

Para a construção dos modelos de simulação e avaliação comparativa, será utilizado o *software* de simulação ARENA®, o que permite uma análise não só dos blocos de fluxograma, como também do comportamento do sistema através de animações auxiliares. Para a construção dos gráficos a partir dos dados de relatórios, são utilizados os *softwares* Excel®, para a tabulação dos valores, e *Input Analyzer*, para a plotagem das curvas observadas.

Os dados de saída do modelo de micro simulação são incorporados ao modelo de macro simulação ferroviária, sendo adotado também para representar o sistema rodoviário. A construção da malha viária e levantamento altimétrico para ponderações relacionadas às atividades ferroviárias, no modelo de simulação, são executadas através dos *softwares* QGIS3® e Google Earth Pro®. Além do desempenho operacional, também simulados através do ARENA®, são avaliados os custos para cada alternativa gerada, bem como os impactos ambientais resultantes, sendo o segundo simulado pelo *software* Greet®. O Excel® também é utilizado como recurso para a construção do modelo avaliativo de lógica difusa.

Após a definição das alternativas, os indicadores de desempenho operacional, custo e impactos ambientais são avaliados através do modelo de inferência de Mamdani. Na construção do processo avaliativo, são considerados diferentes cenários, nos quais se observam diferentes ponderações quanto à importância de cada critério na tomada de decisão. Evidentemente, um embarcador pode considerar, o critério de custo mais importante que o de desempenho, enquanto outro pode considerar os impactos ambientais mais importantes que o custo. A proposta de considerar diferentes cenários pode servir como um apoio à decisão tendo os três critérios como parâmetro.

3.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa do presente trabalho é classificada como quantitativa em relação à sua abordagem, uma vez que visa avaliar numericamente o desempenho operacional dos terminais ferroviário sob os sistemas de transbordo de carga e rodotrilho, apesar de conter alguns

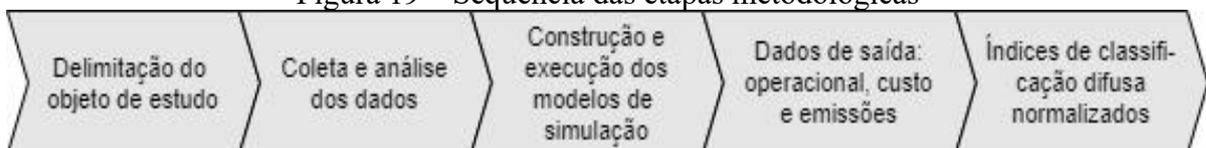
elementos qualitativos ao final dos resultados, como classificação dos sistemas entre “mais ou menos eficiente”, por exemplo (ZANELLA, 2011). A classificação quanto à natureza é de pesquisa aplicada, por se tratar de um estudo que visa um sistema de aplicação prática, valendo-se de contribuições já existentes (SANTOS; PARRA-FILHO, 2011).

Em relação aos objetivos, a pesquisa é caracterizada como descritiva, pois seu foco é um tema já observado na literatura, apesar de escasso (simulações de eventos discretos de sistemas de rodotrilho), havendo orientações não pesquisadas ou ideias vagamente relacionadas ao problema estudado (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013). Por fim, do ponto de vista dos procedimentos metodológicos adotados na coleta de dados, a pesquisa se configura como um estudo de caso, sendo poucos os objetos de pesquisa, cujo propósito é o aprofundamento dos conhecimentos envolvidos, havendo, porém, pouca amplitude quanto ao objeto avaliado (ZANELLA, 2011). Mais especificamente, o estudo é direcionado às operações de movimentação de carga e seu comportamento em função do sistema de transporte adotado.

3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

As etapas metodológicas são resumidas sequencialmente de acordo com a Figura 19. Considera-se, primeiramente, a delimitação do objeto de pesquisa, descrito com maiores detalhes no item 3.3. Em seguida, procede-se com o levantamento dos dados que caracterizam as operações de transporte para a região selecionada, o que possibilita, posteriormente, a elaboração dos modelos de simulação. Por fim, são desenvolvidos e executados os modelos de simulação computacional, cujos dados de saída fornecem subsídios para o índice de classificação final pelo sistema de lógica e inferência difusa.

Figura 19 – Sequência das etapas metodológicas



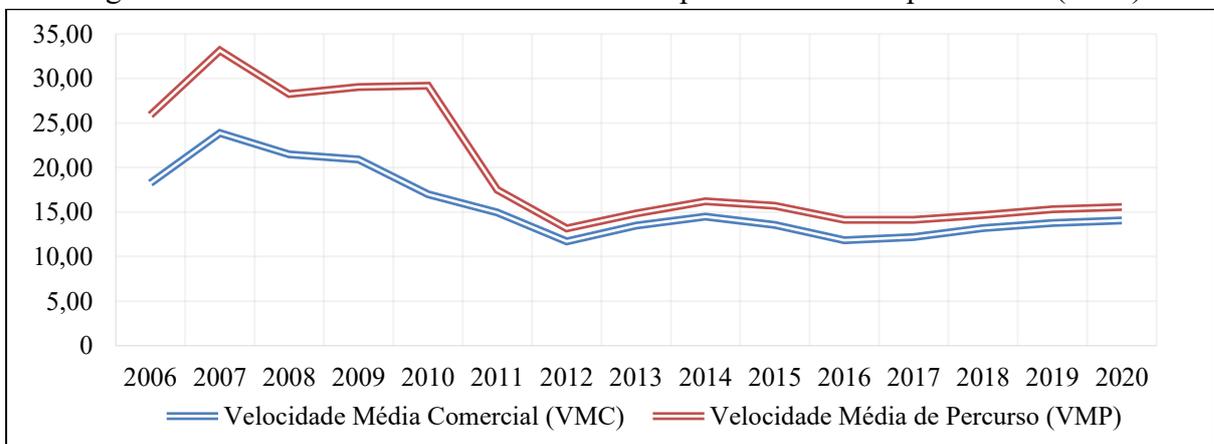
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.3 CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE SIMULAÇÃO

3.3.1 Formulação do problema

Com a necessidade de utilização de modos alternativos de transporte, a opção pelo sistema ferroviário tende a resultar em índices de sustentabilidade favoráveis para a movimentação em longas distâncias. Porém, seu processo de transbordo de carga nos terminais para a movimentação possui alguns pontos negativos que impactam diretamente na cadeia de transporte. Dentre os principais, cita-se o excesso de tempo requerido para transferência de carga para os vagões, o que, somado à baixa velocidade observada nos últimos anos para o transporte ferroviário (ver Figura 20), torna esse modo menos atrativo em relação ao rodoviário.

Figura 20 – Velocidade Média Anual do Transporte Ferroviário pela Rumo (km/h)



Fonte: SAFF/SIADE (2006 a 2020) *apud* ANTT (2021)

Partindo dessa premissa, são considerados os elementos básicos de funcionamento dos terminais, tanto de operações de transbordo, como das operações de rodotrilho, cujas características servem de apoio para a elaboração do modelo conceitual do sistema de simulação.

3.3.2 Modelo conceitual

Sakurada e Miyake (2009) definem o modelo conceitual como o processo que compreende o levantamento de suposições sobre os componentes do sistema, a estrutura do sistema, incluindo a interação entre os componentes, e as hipóteses sobre os parâmetros e variáveis envolvidas. Liu *et al.* (2011) destacam três categorias de informação sobre a simulação e sua proposta de aplicação: (1) Contexto de simulação; (2) Conceito da simulação e; (3) Elementos de simulação, cujo detalhamento é dado a seguir a partir da visão dos autores.

3.3.2.1 Contexto de simulação

Neste item são abordadas as informações inerentes às características do processo de movimentação de cargas para a construção do modelo, como descreve o Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades impositivas para a modelagem do sistema de simulação

Entidades	Caminhões; trens; rodotrilhos.
Processos	Carregamento dos vagões/acoplagem dos semirreboques; carregamento dos caminhões; movimentação da carga da origem ao destino final.
Dados	Tempo de operação dos três sistemas de transporte; custo de frete; fatores de emissão.
Suposições	Recursos e tempo de funcionamento dos terminais de carga; alocação de recursos para composição de trens tipo; velocidades operacionais de transporte; determinação do trajeto mais vantajoso (para o modo rodoviário); ponderações para diferentes cenários de escolha do transporte mais vantajoso (Lógica difusa).
Comportamentos	Intervalo e ordem de execução das tarefas; eficiência energética dos diferentes tipos de transporte; critérios de avaliação de sustentabilidade pelos embarcadores.

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

3.3.2.2 Conceito e elementos de simulação

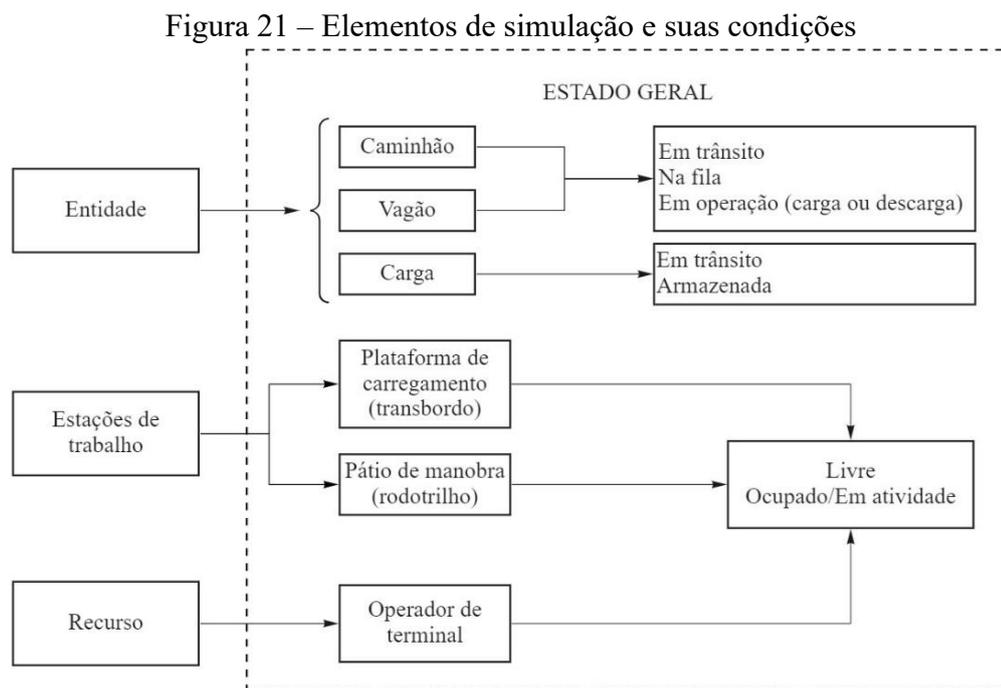
As propriedades descritas no Quadro 2 permitem o mapeamento do Conceito de simulação, no qual são descritas, para o modelo proposto, as características específicas dos sistemas. Primeiramente, considera-se que a entidade “vagão”, aguarda pelo carregamento que deve ser executado por operadores de terminal com o auxílio de equipamentos apropriados. Para os rodotrilhos, avalia-se 4 etapas distintas necessárias na inclusão do semirreboque à composição, sendo elas: alinhamento do semirreboque ao truque; engate do semirreboque ao truque; acoplamento do truque engatado ao trem; e desacoplamento do equipamento de montagem, repetindo o procedimento novamente para os semirreboques subsequentes.

Pela necessidade de adequação dos modelos de tratamento da carga nos terminais a uma configuração equivalente, adota-se o valor de 1 único recurso de manuseio da carga já no terminal para o sistema de rodotrilhos. Os horários de funcionamento constam no portal da ANTT para consulta, os quais foram utilizados para referenciar o tempo de execução do sistema simulado.

De acordo com as notações descritas na Tabela 4, a notação que melhor representa o modelo de simulação é a de $G/M/I/K$ para transbordo e $M/M/I/K$ para rodotrilhos, sendo que a

notação genérica para o caso de transbordo significa, invariavelmente, um valor constante pré-definido, que representa o número de vagões cujo terminal possui a capacidade de atender. Já os rodotrilhos dependem da chegada de caminhões que forneçam o semirreboque para a composição, em que se supõe um processo de chegada exponencial. Ademais, as K entidades, ou seja, vagões e caminhões, aguardam até serem atendidas, sendo configurado no modelo um valor de K que exceda a capacidade de processamento (atendimento dos caminhões ou vagões) em um dia completo de serviço.

Quanto à disciplina, o critério de preferência para atendimento dos vagões e caminhões é a ordem de chegada, pois o primeiro que chega é o primeiro a ser atendido e, conseqüentemente, o primeiro a sair do sistema, definido como *FIFO - first in first out* - (ALVES; MENEZES, 2010). Por fim, os elementos de simulação descrevem informações pertinentes à interação entre as entidades, estações e recursos. A Figura 21 aborda os principais elementos e seus estados de atividade dentro do sistema em execução.



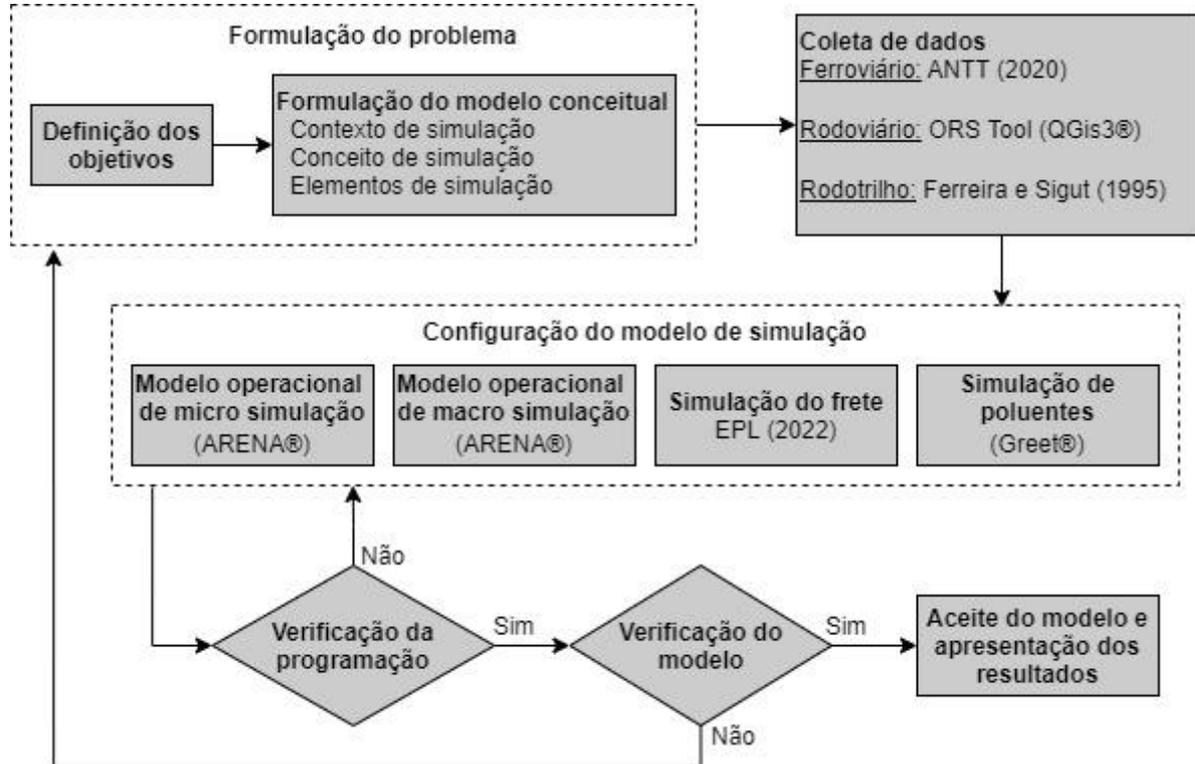
Fonte: elaborado pelo autor (2021)

3.3.3 Modelo de simulação

Com base na representação da Figura 22, o modelo de simulação dos modos de transporte tem como diretrizes as etapas que compreendem desde a formulação do problema

até a apresentação dos resultados. A etapa correspondente ao “Projeto experimental” não foi incluída, pois não se dispõe de recursos e ferramentas para sua replicação.

Figura 22 – Etapas da modelagem do sistema



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa é composta por estudo e aplicação de modelos de simulação voltado, especificamente, ao transporte de mercadorias. A construção dos modelos propostos se restringe aos transportes terrestres atuando individualmente e colaborativamente. A técnica adotada é a de simulação de eventos discretos, em que se caracterizam mudanças instantâneas de atributos das entidades simuladas dentro do sistema ao longo da execução.

Dentre as variáveis presentes no sistema, cujas propriedades influenciam diretamente os resultados, cita-se o tempo requerido para as atividades de transporte, os custos associados às operações, fatores de emissão de poluentes, número de veículos presentes nas composições do modo ferroviário, velocidades desempenhadas pelos modos simulados, distâncias percorridas, características físicas dos terminais de manuseio de carga, entre outras, grau de importância dos impactos gerados, entre outros.

Os dados obtidos têm como fonte apenas sítios eletrônicos governamentais relacionados às propriedades presentes nas atividades de transporte de carga, fontes bibliográficas de artigos científicos e livros, além de informações obtidas de experimentos práticos e implementados em programas de simulação, como no *software* Greet® para estimativa dos índices de poluição.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo aborda o estudo de caso dos modelos construídos para avaliar a movimentação de carga em determinados terminais atendidos pela Rumo Malha Sul, a fim de comparar os indicadores entre os procedimentos de transbordo de carga e de movimentação do compartimento de carga pela intermodalidade.

As operações de carregamento nos terminais ferroviários se mostram muito dispersas em relação ao tempo de manuseio para um mesmo produto. O tempo de permanência nos terminais de carga impacta em grande parte do ciclo total dos trens, o que exige uma otimização das atividades processadas no mesmo. Ademais, o desempenho das operações depende da capacidade dos terminais (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2015b).

O número de vagões carregados diariamente em cada terminal é informado com base no histórico de ocorrência ao longo do ano. Tal quantidade também varia em função de diversos fatores e é limitada de acordo com o tempo de funcionamento em cada terminal. Porém, o número de caminhões que chegam diariamente ao local para transferência da carga não é quantificado. Assim, adota-se, para os rodotrilhos, um número de caminhões que entram no sistema superior à capacidade de atendimento, sendo contabilizada no processo apenas a quantidade de veículos que são atendidos e deixam o terminal no mesmo dia em que chegam, para cada iteração do modelo simulado.

Não se dispõe de informações relacionadas à chegada dos veículos rodoviários aos terminais, tanto em relação ao tempo entre chegadas, quanto à quantidade que chega ao local. Portanto, são configurados os intervalos de chegada dos caminhões no sistema de simulação representativo do terminal, tendo como parâmetro um valor suficientemente baixo para que a taxa de formação de filas supere a do atendimento aos veículos.

4.1 DEMARCAÇÕES GEOGRÁFICAS

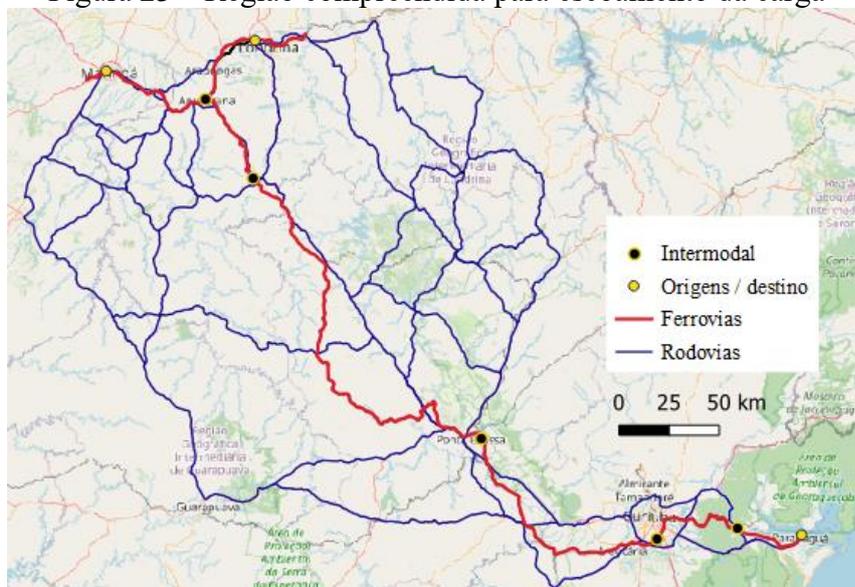
Para o desenvolvimento deste estudo, foram selecionados alguns terminais de manuseio de produtos agrícolas, segundo informações disponíveis no portal *online* da ANTT para o ano de 2021. Os terminais são localizados nos municípios de Maringá (PR) e Londrina (PR). No portal também constam os dados de entrada necessários para configurar o modelo de simulação (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2021). Já os dados relacionados ao sistema de rodotrilho foram obtidos indiretamente através da geração de

números aleatórios com base em alguns parâmetros encontrados na literatura. A Figura 23 demonstra a malha que atende a região delimitada.

Os produtos selecionados foram graneis agrícolas. O critério para escolha dos terminais se deu de acordo com os seguintes requisitos: 1) Disponibilidade de dados operacionais de tempo na base de dados da ANTT; 2) Possuir instalações para movimentação de carga granel agrícola; 3) Estar situado a uma distância justificável dos portos para exportação de acordo com a Figura 9. Os terminais selecionados e respectivos municípios são:

- Londrina: ATT; Ricolog; Seara LLD.
- Maringá: Bunge LMG; Cargill LMG; Cocamar; Cofco; CPA; Seara LMA.

Figura 23 – Região compreendida para escoamento da carga

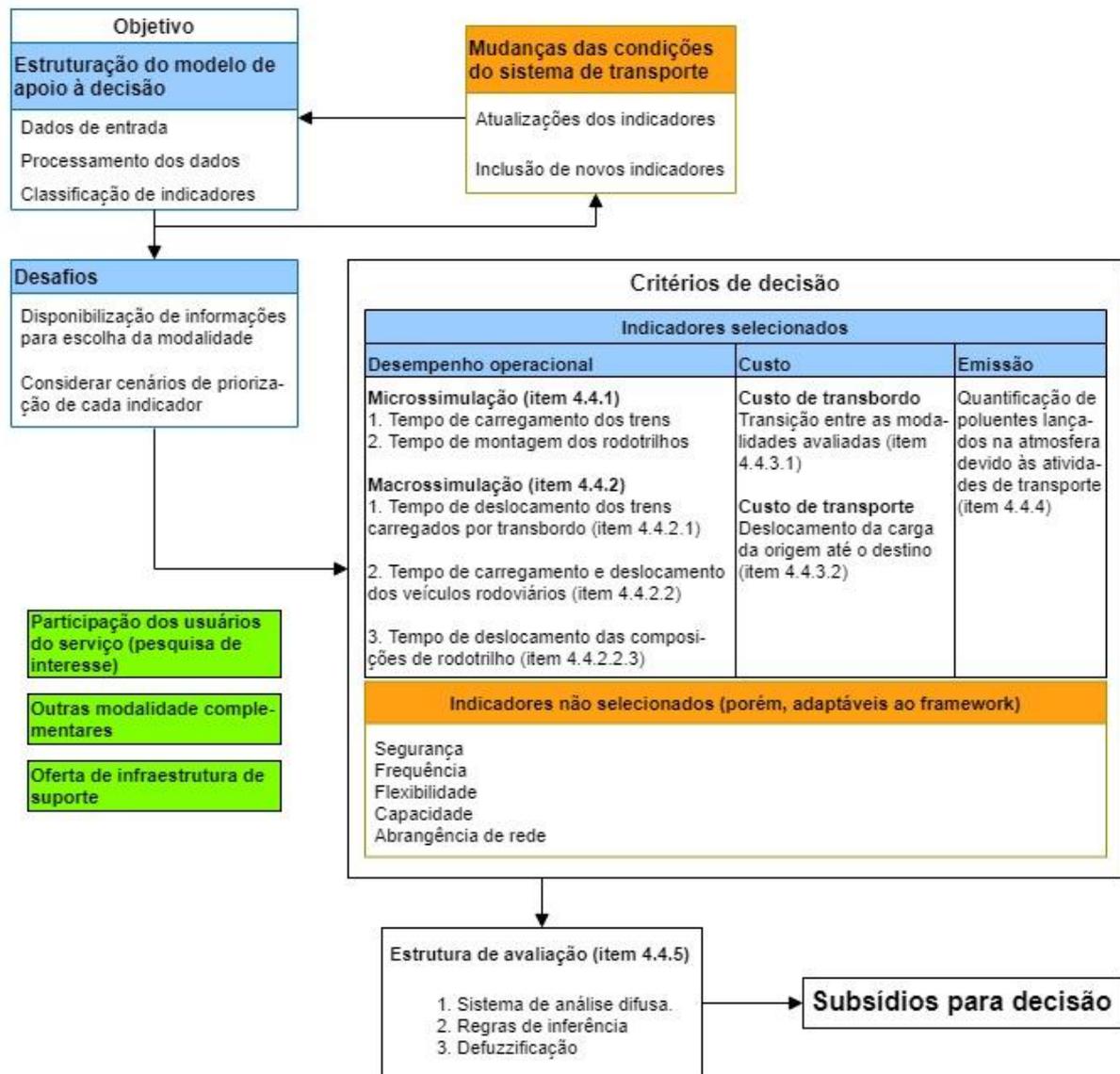


Fonte: elaborado pelo autor (2021)

O tamanho da amostra para a modelagem dos sistemas e suas comparações se deu através de um número piloto, servindo como ponto de partida para avaliação do comportamento do sistema. As correções quanto ao número de amostras da rodada de simulação são realizadas em seguida, sendo estimado um intervalo de confiança satisfatório e a execução das simulações realizadas para o novo número de amostras, objetivando um comparativo final entre os sistemas.

4.2 FRAMEWORK PROPOSTO

A exemplo da constituição de *framework* (Figura 4), o esquema estruturado pela Figura 24 descreve as etapas e elementos requeridos para direcionar a pesquisa.

Figura 24 – *Framework* descritivo da pesquisa

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Os blocos azuis representam etapas que compõem o escopo central da pesquisa, envolvendo desde a definição dos objetivos, os desafios para obtenção dos indicadores e estabelecimento de prioridades, até a modelagem dos sistemas que forneceram os indicadores para apoio à decisão. Já os blocos alaranjados se referem a elementos que não entraram no processo de desenvolvimento da pesquisa, sendo, porém, relacionados ao escopo central, ou seja, escolha e tratamento de indicadores.

Os blocos verdes são elementos que podem interferir nos indicadores de saída e, consequentemente, na escolha da modalidade. O primeiro considera a possibilidade de incluir a pesquisa de campo como um recurso de captação de dados relacionados à preferência dos contratantes do serviço. O segundo bloco levanta a possibilidade de comparar outras

modalidades para o transporte de granel agrícola, mais especificamente o hidroviário, visto que se adequa a esse tipo de carga. O terceiro bloco se refere a investigação de como a melhoria na qualidade na infraestrutura viária e seus serviços, ou mesmo a ampliação de abrangência da rede, podem influenciar nos indicadores de transporte.

4.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

4.3.1 Dados de manuseio de cargas por transbordo

Os dados relativos ao processo de carregamento dos vagões estão destacados na Tabela 5 para terminais adotados como base para implementação do modelo. Foram selecionados apenas terminais que movimentam grãos, visto que este é um produto facilmente transportado tanto por rodovias como por ferrovias.

Tabela 5 – Capacidade diária de vagões por terminal

Município	Terminal	Tempo diário de funcionamento (horas)	Capacidade (Vagões/dia)
Londrina (PR)	ATT	18	160
	Ricolog	20	120
	Seara LLD	16	40
Maringá (PR)	Bunge LMG	24	260
	Cargill LMG	24	100
	Cocamar	16	25
	Cofco	16	20
	CPA	24	120
	Seara LMA	22	160

Fonte: adaptado de ANTT (2020)

Uma vez obtidos o tempo de funcionamento e a capacidade de cada terminal, o carregamento pode ser simulado sob distribuição exponencial, a qual pode ser entendida como a distribuição de frequências de tempo ou distância de um evento ao próximo (P. BRUCE; A. BRUCE, 2019). Segundo Thomopoulos (2013), a distribuição exponencial possui ampla aplicação em sistemas de filas para definir o tempo entre as chegadas de entidades ao sistema, assim como os tempos associados ao atendimento dessas entidades. A função de densidade para um modelo exponencial é dada pela Equação 1 (PINHEIRO *et al.*, 2012).

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x}, & \text{se } x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Sendo o parâmetro λ uma constante positiva que representa o número médio de eventos que ocorrem em um intervalo especificado de tempo ou espaço definido na distribuição de Poisson (P. BRUCE; A. BRUCE, 2019). A Tabela 6 indica a taxa de atendimento (carregamento) para os terminais considerados, seguido de sua respectiva função inversa, a exponencial, com a unidade convertida de horas para minutos.

Tabela 6 - Dados de tempo para carregamento de trens

Município	Terminal	Taxa de carregamento λ (vagões/hora)	Tempo médio de carga (min/vagões)
Londrina (PR)	ATT	8,89	6,75
	Ricolog	6,00	10,00
	Seara LLD	2,50	24,00
Maringá (PR)	Bunge LMG	10,83	5,54
	Cargill LMG	4,17	14,40
	Cocamar	1,56	38,40
	Cofco	1,25	48,00
	CPA	5,00	12,00
	Seara LMA	7,27	8,25

Fonte: elaborado com base em ANTT (2020)

Seja n o número de usuários no sistema e P_n a probabilidade de que existam n vagões no sistema, sendo uma variável aleatória discreta, a esperança matemática é determinada pela Equação 2. Considerando a variável s , que representa o número de atendentes – neste caso, os recursos disponíveis para execução dos processos – pode-se implementar este fator, o que permite estimar o número de vagões na fila L_q pela Equação 3 (ALVES; MENEZES, 2010).

$$E(X = n) = L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n \quad (2)$$

$$E(X = nq) = Lq = \sum_{n=s}^{\infty} (n - s) P_n \quad (3)$$

Como mencionado anteriormente, foi adotado para o modelo de simulação uma configuração de um único operário por terminal. Nestas circunstâncias, $s = 1$ para a Equação 3 na determinação do tamanho da fila. Tendo como parâmetro o aumento no número n de entidades no sistema, confirma-se a tendência de crescimento da fila L_q , indefinidamente.

4.3.2 Dados de manuseio da carga por rodotrilho

Considerando o cenário de pouca utilização, não se dispõe de dados amplamente divulgados, o que dificulta a determinação de critérios para implementar a configuração dos modelos de simulação. Para a modelagem do sistema de rodotrilhos, foram adotados dados de simulação obtidos por Ferreira e Sigut (1995), na qual se analisou quatro etapas para a montagem de um conjunto rodotrilho. Foram realizadas 480 observações, sendo 120 para cada etapa do processo de montagem, como detalha a Tabela 7. Os autores trazem um comparativo com os processos envolvendo *containers*.

Tabela 7 – Dados de tempo das operações de rodotrilhos e *containers*

Operações de rodotrilho (segundos)				
Atividade	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
A: alinhamento do semirreboque com o truque	8	22	14	4
B: engate do semirreboque ao truque	108	250	159	30
C: acoplamento do truque engatado ao trem	154	292	207	32
D: desengate do equipamento de montagem	6	20	13	3
Total*	299	539	394	45
Operações de <i>container</i> (segundos)				
Atividade	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
A: mobilização do suporte em direção ao <i>container</i>	41	107	67	17
B: engate do suporte ao <i>container</i>	7	36	22	8
C: movimentação do <i>container</i> ao destino de carga	20	99	53	20
D: desengate do suporte do <i>container</i>	4	23	11	4
Total*	82	237	154	29
(*) Simulação equivalente com as quatro etapas compactadas em uma única				

Fonte: elaborado com base em Ferreira e Sigut (1995)

As etapas de montagem do rodotrilho ocorrem de modo sequencial, sendo atendido no processo de montagem um único semirreboque, cujo recurso de operação, um operador de terminal, também é considerado unitário. Um semirreboque somente inicia seu processo de incorporação ao conjunto após o cumprimento da etapa D pela entidade que o precede. Em relação aos tempos requeridos em cada etapa, é possível aplicar as distribuições Normal – NORM (Mean, StdDev) – e Uniforme – UNIF (Min, Max). Pela distribuição Normal, dada sua maior precisão, a função densidade é dada pela Equação 4 (PINHEIRO *et al.*, 2012).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \forall x \in \mathbb{R} \quad (4)$$

Todavia, a utilização dos mesmos valores observados por Ferreira e Sigut (1995), na realização dos processos de montagem dos rodotrilhos, acarretaria na repetição dos intervalos das respectivas iterações executadas para todos os terminais, ou seja, todos os resultados de

simulação levariam a um processo cíclico imutável. Foi adotado o mesmo procedimento dos autores em relação à quantidade de amostras, ou seja, 120 valores discretos para cada amostra.

Para possibilitar uma variação entre rodadas de simulação, foram gerados valores aleatórios para cada etapa de composição dos rodotrinhos em distribuição Normal, tendo os valores da média e desvio padrão indicados na Tabela 7, por meio do *Input Analyzer*, ferramenta contida no ARENA®, para determinar qual distribuição mais se adequa às amostras geradas para cada etapa de montagem em seu respectivo terminal.

Pelos dados gerados, verificou-se apenas conjuntos de valores que descrevem curvas de distribuição de Weibull para suas quatro etapas de composição. A distribuição Weibull é uma extensão da distribuição exponencial, possuindo dois parâmetros fundamentais positivos: parâmetro de forma β - se aproximando da exponencial para $\beta \leq 1$ e da normal para $\beta \geq 3$ - e parâmetro de escala η (P. BRUCE; A. BRUCE, 2019; THOMOPOULOS, 2013). Pode ainda possuir um terceiro parâmetro indicando onde a curva de distribuição se inicia. Sua função densidade de probabilidade para dois parâmetros é dada pela Equação 5 (MCCOOL, 2012):

$$f(x; \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

Tabela 8 – Tempo de montagem de rodotrinhos

Terminal	Distribuição estatística	
	Etapa A (segundos)	Etapa B (segundos)
ATT	-0.001 + WEIB(14.8, 3.48)	77 + WEIB(90.5, 2.89)
Ricolog	4 + WEIB(12.4, 2.72)	91 + WEIB(76.1, 2.48)
Seara LLD	2 + WEIB(13.5, 3.22)	88 + WEIB(78.9, 2.49)
Bunge LMG	5 + WEIB(10.5, 2.66)	86 + WEIB(83.8, 2.21)
Cargill LMG	1 + WEIB(14, 3.28)	93 + WEIB(70.7, 2.11)
Cocamar	3 + WEIB(12.6, 2.92)	78 + WEIB(86.9, 2.4)
Cofco	5 + WEIB(10.7, 2.78)	93 + WEIB(70.1, 2.75)
CPA	3 + WEIB(12, 2.68)	79 + WEIB(90.6, 2.92)
Seara LMA	4 + WEIB(11.3, 2.65)	94 + WEIB(73.4, 2.45)
Terminal	Distribuição estatística	
	Etapa C (segundos)	Etapa D (segundos)
ATT	133 + WEIB(83.4, 2.29)	4 + WEIB(9.95, 3.35)
Ricolog	130 + WEIB(81.3, 2.7)	4 + WEIB(10.2, 3.16)
Seara LLD	129 + WEIB(89.6, 2.54)	4 + WEIB(9.77, 3.4)
Bunge LMG	119 + WEIB(98.1, 2.85)	6 + WEIB(8.18, 2.51)
Cargill LMG	130 + WEIB(87.2, 2.44)	5 + WEIB(9.23, 3.47)
Cocamar	126 + WEIB(94.5, 2.72)	4 + WEIB(10, 3.27)
Cofco	118 + WEIB(95.9, 2.94)	6 + WEIB(7.9, 2.45)
CPA	114 + WEIB(98.4, 2.97)	4 + WEIB(9.49, 3.55)
Seara LMA	127 + WEIB(86, 2.35)	4 + WEIB(10.2, 3.53)

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Estes valores são aplicados na configuração dos blocos de simulação do modelo computacional, cuja descrição é feita no próximo tópico.

4.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

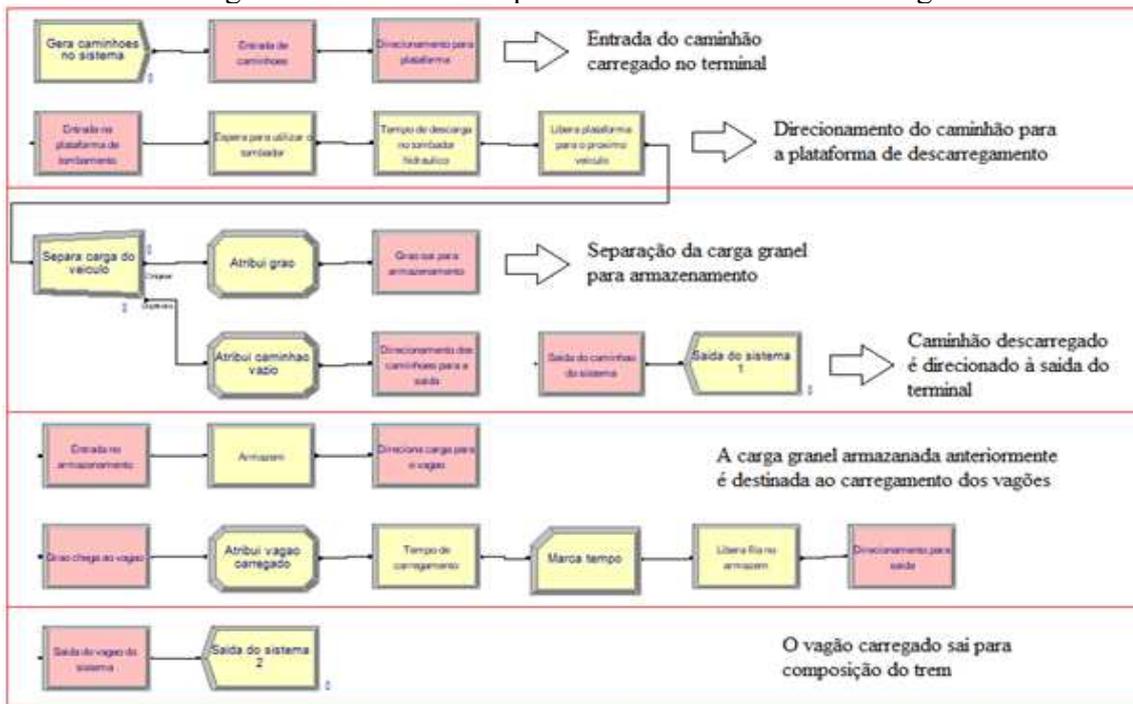
Considerando as características de cada terminal, a próxima etapa consiste na modelagem computacional de simulação, a qual se divide em duas partes: micro simulação, envolvendo as operações localizadas de movimentação da carga nos terminais, e macro simulação, que trata da movimentação da origem da carga até seu destino final.

4.4.1 Modelo de micro simulação

Os modelos descritos a seguir se referem aos processos de composição dos trens tipo contendo a respectiva carga a ser transportada. Para isso, são avaliados os processos de carregamento dos vagões por transbordo e de montagem dos rodotrilhos através das manobras de acoplagem dos semirreboques aos truques ferroviários. Assim, são considerados os dados de entrada dos itens 4.1.1 e 4.1.2 para realização dos processos de composição de trem tipo.

A escolha do parâmetro de simulação em relação à duração dos processos, entre o ritmo de ocorrência de um evento ou o intervalo entre a ocorrência dos mesmos depende da disponibilidade dos equipamentos adequados, bem como da grandeza dos valores a serem registrados (PRADO, 2004). Admite-se também que os processos de chegada geralmente seguem a distribuição de Poisson para ritmos ou distribuição Exponencial para intervalos entre entradas de entidades no sistema. A Figura 25 representa o modelo desenvolvido na interface gráfica do ARENA® para simulação do sistema de carregamento por transbordo, dentro da qual são especificados os eventos para cada sequência de blocos.

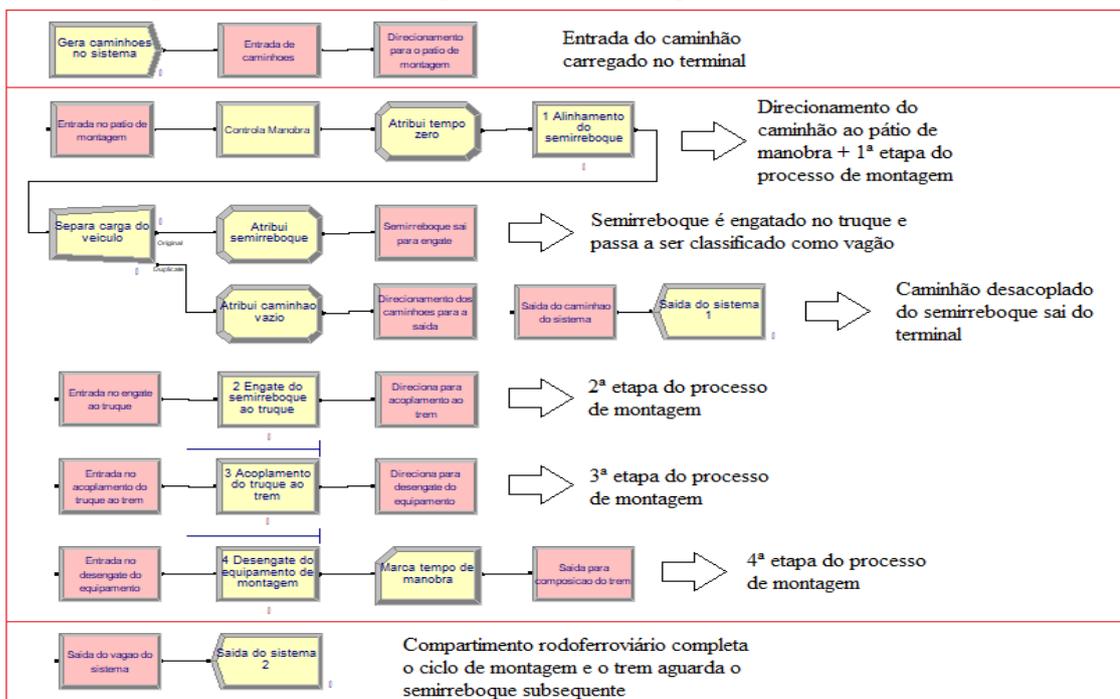
Figura 25 - Modelo computacional de transbordo de carga



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

De maneira similar, a Figura 26 indica as etapas de composição dos trens pela intermodalidade com rodotrilhos.

Figura 26 – Modelo computacional de composição dos rodotrilhos



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

4.4.2 Modelos de macro simulação

O desenvolvimento do modelo de macro simulação deve compreender as propriedades operacionais de cada alternativa para o transporte de carga da origem até o destino final. As informações referentes à rede que possibilita o escoamento das mercadorias são implementadas dentro das configurações do modelo de simulação, a fim de se obter uma representação mais confiável possível. Para isso, os modelos são construídos separadamente, como indicam os itens a seguir.

4.4.2.1 Sistema de simulação ferroviário

O sistema de transporte ferroviário deve considerar, primeiramente, a composição dos trens tipo que deverão fazer o transporte dos terminais até o porto. Os ramais e composições de trem tipo para a transporte de granéis agrícolas são indicados na Tabela 9.

Tabela 9 – Trens tipo para o transporte

Código	Origem	Destino	Locomotivas	Vagões	TU
K06	Londrina (LLD, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	2	105	6.300
K08	Londrina (LLD, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	3	105	6.300
K08	Londrina (LLD, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	3	105	6.300
F08	Londrina (LLD, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	2	115	5.750
F10	Londrina (LLD, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	3	115	5.750
F02	Maringá (LMG, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	2	115	5.750
F04	Maringá (LMG, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	3	115	5.750
K16	Maringá (LMG, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	2	105	6.300
K16	Maringá (LMG, RMS)	Apucarana (LAP, RMS)	3	105	6.300
K06	Apucarana (LAP, RMS)	Uvaranas (LUS, RMS)	2	105	6.300
K08	Apucarana (LAP, RMS)	Uvaranas (LUS, RMS)	3	105	6.300
F02	Apucarana (LAP, RMS)	Uvaranas (LUS, RMS)	2	115	5.750
F04	Apucarana (LAP, RMS)	Uvaranas (LUS, RMS)	3	115	5.750
K08	Apucarana (LAP, RMS)	Uvaranas (LUS, RMS)	2	120	6.800
K06	Apucarana (LAP, RMS)	Uvaranas (LUS, RMS)	4	120	5.000
K08	Uvaranas (LUS, RMS)	Iguaçu (LIC, RMS)	3	105	6.300
K06	Uvaranas (LUS, RMS)	Iguaçu (LIC, RMS)	2	105	6.300
K08	Uvaranas (LUS, RMS)	Iguaçu (LIC, RMS)	2	120	6.800
K06	Uvaranas (LUS, RMS)	Iguaçu (LIC, RMS)	4	120	5.000
K08	Uvaranas (LUS, RMS)	Iguaçu (LIC, RMS)	2	120	6.800
D56	Iguaçu (LIC, RMS)	D Pedro II (LDP, RMS)	2	45	2.500
K02	Iguaçu (LIC, RMS)	D Pedro II (LDP, RMS)	3	65	3.250
K04	Iguaçu (LIC, RMS)	D Pedro II (LDP, RMS)	4	105	6.300

Fonte: ANTT (2021)

A única composição que percorre todos os trechos listados é a de 105 vagões, com capacidade total de 6300 toneladas, variando apenas o número de locomotivas, sendo adotada essa composição como referência para o modelo de simulação do modo ferroviário. As locomotivas também fazem parte dos elementos de simulação, sendo avaliados os casos com 2 e 3 até o terminal de Iguazu, situado no município de Curitiba (PR), a partir do qual, o conjunto de vagões passa a ser tracionado por 4 locomotivas.

4.4.2.1.1 Problema de composição dos trens

Conforme expresso na Tabela 9 (item 4.3.2.1), alguns terminais apresentam capacidade de carregamento inferior ao número de vagões do trem tipo selecionado, o que demanda uma realocação dos vagões dos terminais com capacidade abaixo de 105 vagões para aqueles com capacidade acima. Para isso, recorre-se ao método de programação linear, cuja função objetivo é minimizar o tempo dispendido nos processos de carregamento, conforme a Equação 6 (LACHTERMACHER, 2016).

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} X_{ij}$$

Em que:

- X_{ij} é a quantidade de vagões com origem no terminal i a ser carregado no terminal j ;
- t_{ij} é o tempo necessário, em minutos, para carregar o vagão com origem em i no terminal j ;
- m é o número de terminais deficitários;
- n é o número de terminais superavitários.

As restrições para o problema são:

- Os terminais superavitários não podem carregar uma quantidade superior à sua capacidade após atender à necessidade de um trem-tipo (105 vagões);
- Os trens parcialmente carregados em um terminal deficitário não devem receber de outros terminais um número de vagões superior ou inferior ao que falta para a composição do trem tipo.

O Quadro 4 indica, especificamente, as restrições em cada município para o processo de alocação dos vagões nos terminais de maior capacidade. A coluna de saldo representa a quantidade de vagões que um terminal ainda pode atender após concluir o carregamento de um trem tipo completo, sendo os valores negativos referentes aos terminais cuja capacidade diária não atende ao número mínimo de vagões estabelecidos previamente para o trem tipo.

Por se tratar de um problema desbalanceado para ambos os municípios, em que a capacidade disponível nos terminais superavitários supera a necessidade de atendimento dos vagões não carregados em seu terminal de origem, são criados consumidores fantasmas (*dummy*) – vagões a serem atendidos – para receber o excedente da capacidade de fornecimento do serviço de carregamento, sendo nulo o tempo necessário para carregar esses vagões fictícios.

Quadro 4 – Restrições do problema de alocação de vagões

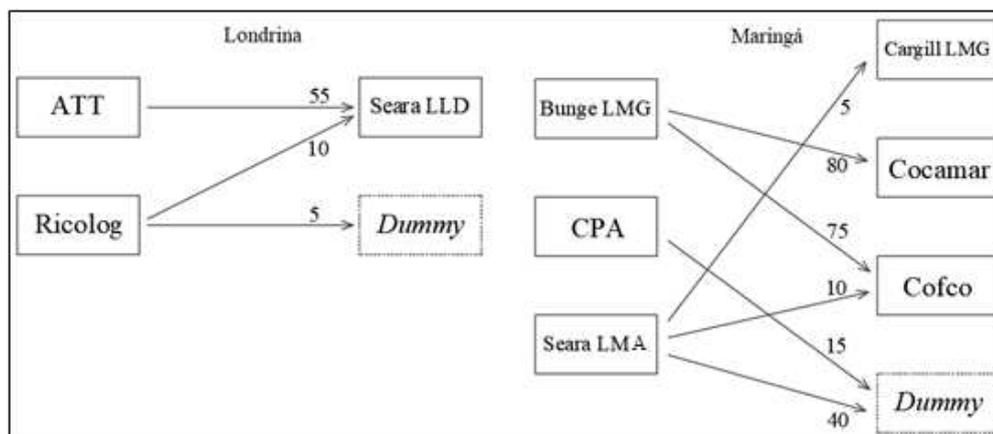
Município	Terminal	Saldo	Restrições
Londrina	ATT (1)	55	$X_{31} \leq 55$
	Ricolog (2)	15	$X_{32} \leq 15$
	Seara LLD (3)	-65	$X_{31} + X_{32} = 65$
			$X_{ij} \geq 0$
Maringá	Bunge LMG (1)	155	$X_{21} + X_{31} + X_{41} \leq 155$
	Cargill LMG (2)	-5	$X_{25} + X_{35} + X_{45} \leq 15$
	Cocamar (3)	-80	$X_{26} + X_{36} + X_{46} \leq 55$
	Cofco (4)	-85	$X_{21} + X_{25} + X_{26} = 5$
	CPA (5)	15	$X_{31} + X_{35} + X_{36} = 80$
	Seara LMA (6)	55	$X_{41} + X_{45} + X_{46} = 85$
			$X_{ij} \geq 0$

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

É importante destacar que o modelo de programação linear não é um elemento inerente ao *framework* proposto, visto que é um recurso necessário apenas para os terminais selecionados para o este estudo de caso do ponto de vista de composição dos trens tipo. Assim, pode não ser requerido para outros terminais que tenham capacidade de carregamento suficiente para um trem tipo definido, e que venham a ser avaliados pelo presente arcabouço.

Os coeficientes que representam os tempos de carregamento são atributos individuais, de modo que um determinado terminal apresente o mesmo intervalo de execução dos processos para todos os vagões com origens nos i terminais. Tais valores são baseados nas estimativas de tempo de carregamento por vagão, calculados com base nos dados fornecidos pela ANTT, podendo apresentar variações a depender das condições de operação. A Figura 27 indica a distribuição de vagões a serem completados obtidos através da ferramenta *solver*, do Excel®, a fim de minimizar a função objetivo.

Figura 27 – Alocação de vagões para carregamento dos trens tipo



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

4.4.2.1.2 Deslocamento entre terminais

Além do carregamento, os intervalos de deslocamento dos trens com carga incompleta até os terminais superavitários impactam diretamente no desempenho dos serviços. Para permitir maior detalhamento no modelo de simulação, determina-se as características do comportamento dinâmico dos trens durante o trânsito entre terminais, além das manobras realizadas nos terminais para classificação ou carregamento. Segundo Profillidis (2014), diferentes valores de aceleração e desaceleração são adotados em função do tipo de material rodante, conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores típicos de aceleração e desaceleração em função do material rodante

Tipo de trem	Aceleração (m/s ²)	Desaceleração (m/s ²)
Carga	0,20 a 0,40	0,10 ⁽¹⁾ 0,25 ⁽²⁾
Intermunicipal	0,40 a 0,60	0,40 a 0,50 ⁽³⁾
Suburbano	0,60 a 0,80	0,60
Metrô	0,80 a 1,00	

⁽¹⁾ Trens de carga convencionais

⁽²⁾ Trens de carga expressos

⁽³⁾ Trens de passageiro

Fonte: elaborado com base em Profillidis (2014)

Profillidis (2014) também descreve os requisitos quanto às distâncias de segurança necessárias para realizar a frenagem dos trens. Para trens de carga, a distância de frenagem, em metros, pode ser calculada pela fórmula empírica de Minden (ver Equação 7).

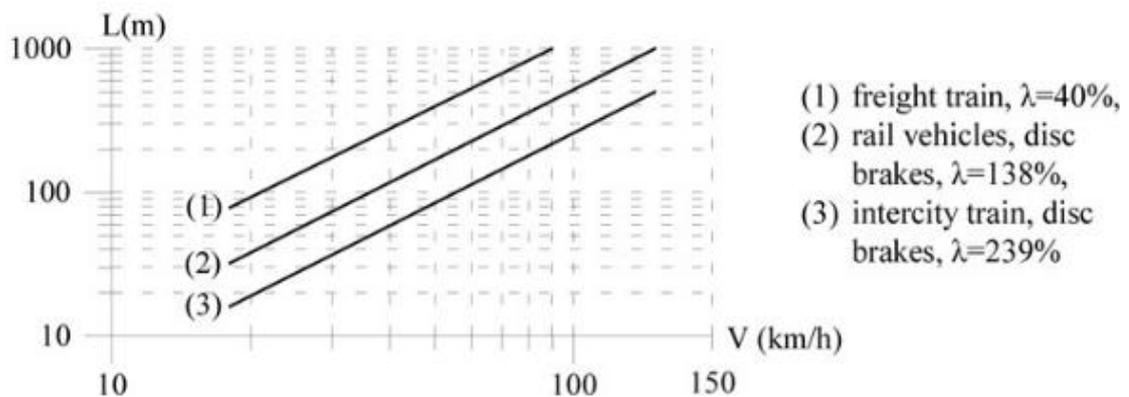
$$L = \frac{3,85 \cdot V^2}{5,1 \cdot \psi \cdot \sqrt{\lambda - 5} + i} \quad (7)$$

Em que:

- V é a velocidade instantânea do trem no momento da frenagem (km/h);
- i é a declividade do terreno (‰ ou mm/m);
- ψ é o parâmetro cujo valor varia entre 0,5 e 1,25 em função das características do sistema de frenagem;
- λ é o percentual de frenagem, definido como uma taxa do peso de frenagem em relação ao peso total do veículo, expressando a força de frenagem requerida para frear o equivalente a uma tonelada.

A Figura 28 ilustra as distâncias de frenagem para velocidades baixas e médias considerando diversos materiais rodantes, sendo λ igual a 40%, para um terreno sem declividade.

Figura 28 – Relação entre velocidade e distância de frenagem para médias e baixas velocidades em terrenos sem declividade



A declividade do terreno é uma das características a serem levantadas nas localidades em que os terminais se encontram, de modo a determinar as necessidades operacionais dos trens que requeiram complemento da carga para sua composição completa. A Figura 29 representa as características altimétricas em cada região considerada, sendo a equidistância das curvas de nível igual a 10 metros de desnível, além de indicar a localização de cada terminal.

Figura 29 – Características geográficas das localidades dos terminais



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Com os parâmetros de aceleração, desaceleração, altimetria do terreno e distância entre os terminais, para a Equação 7, fixa-se uma velocidade V a ser desenvolvida, com base nos dados de velocidade da ANTT, sendo adotados $\psi = 0,5$ e $\lambda = 40\%$. A Figura 30 representa as velocidades praticadas nos ramais utilizados para o transporte ferroviário na região, no qual o trecho “Ourinhos – Cianorte” serviu como base para as movimentações entre terminais.

Figura 30 – Velocidades usualmente praticadas nos ramais adotados



Fonte: elaborado com base em ANTT (2021)

Em relação às manobras dentro dos terminais, adota-se o modelo de Butunov *et al.* (2021), os quais se baseiam na instrução normativa determinada pelo Ministério de Ferrovias da Federação Russa para estimar o tempo aproximado das operações, em horas, pela Equação 8.

$$t_{ht} = (\alpha_{a/d} + \beta_{a/d} \cdot m) \frac{v_{per}}{2} + \frac{l_{ht}}{1000 \cdot v_{per}} \quad (8)$$

$$l_{ht} = l_1 + 2 \cdot l_2 \quad (9)$$

Em que:

- $\alpha_{a/d}$ e $\beta_{a/d}$ são, respectivamente, o coeficiente de tempo requerido e o fator de tempo adicional, ambos considerando a variação de velocidade em 1 km/h durante aceleração e desaceleração ($\alpha_{a/d} = 0,76$; $\beta_{a/d} = 0,13$);
- m é o número de vagões na estrutura de manobra;
- v_{per} velocidade permitida no movimento de manobra (km/h);
- l_{ht} comprimento de manobra (m).
- l_1 é a distância de manobra em velocidade constante (m);
- l_2 é a distância de manobra durante aceleração e desaceleração (m).

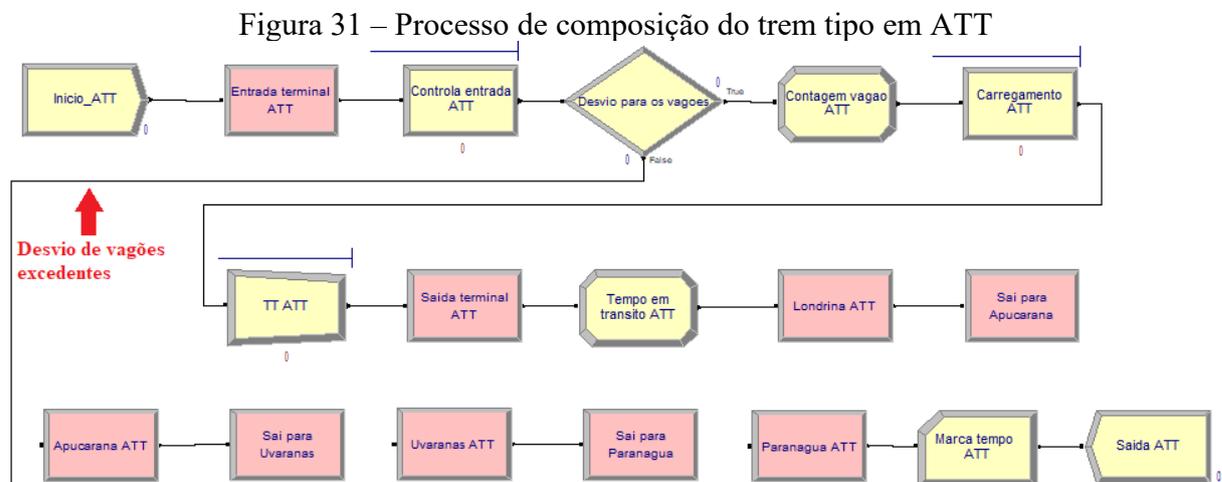
A partir da Equação 9, os autores desenvolveram um modelo matemático que expressa a duração esperada de manobra t_{ht}^m , em segundos, dada pela Equação 10, o qual se adota para o presente trabalho, agora, com a velocidade convertida em m/s. Adota-se, também, para a velocidade permitida nos terminais de manobra, o valor máximo estabelecido de 5 km/h (RUMO LOGÍSTICA, 2016). A Equação 11 representa os valores de aceleração ou desaceleração da estrutura de manobra (m/s^2).

$$t_{ht}^m = \frac{l_{ht}}{v_{per}} + \frac{v_{per}}{a} \quad (10)$$

$$a = \frac{2}{3,6 \cdot (\alpha_{a/d} + \beta_{a/d} \cdot m)} \quad (11)$$

4.4.2.1.3 Modelo computacional ferroviário

Nos modelos computacionais desenvolvidos através do ARENA® são programadas interações entre terminais possibilitando a complementação de vagões para os trens com origem em terminais deficitários. Os processos contabilizados se resumem ao carregamento dos vagões e a locomoção de cada trem até o porto Dom Pedro II, sendo somados os tempos requeridos nessas duas atividades e contabilizados para implementação no *Output Analyzer*. Os terminais superavitários fazem a composição de trens-tipos carregados através dos próprios vagões, como indica a configuração da Figura 31 para o terminal ATT, em Londrina.



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

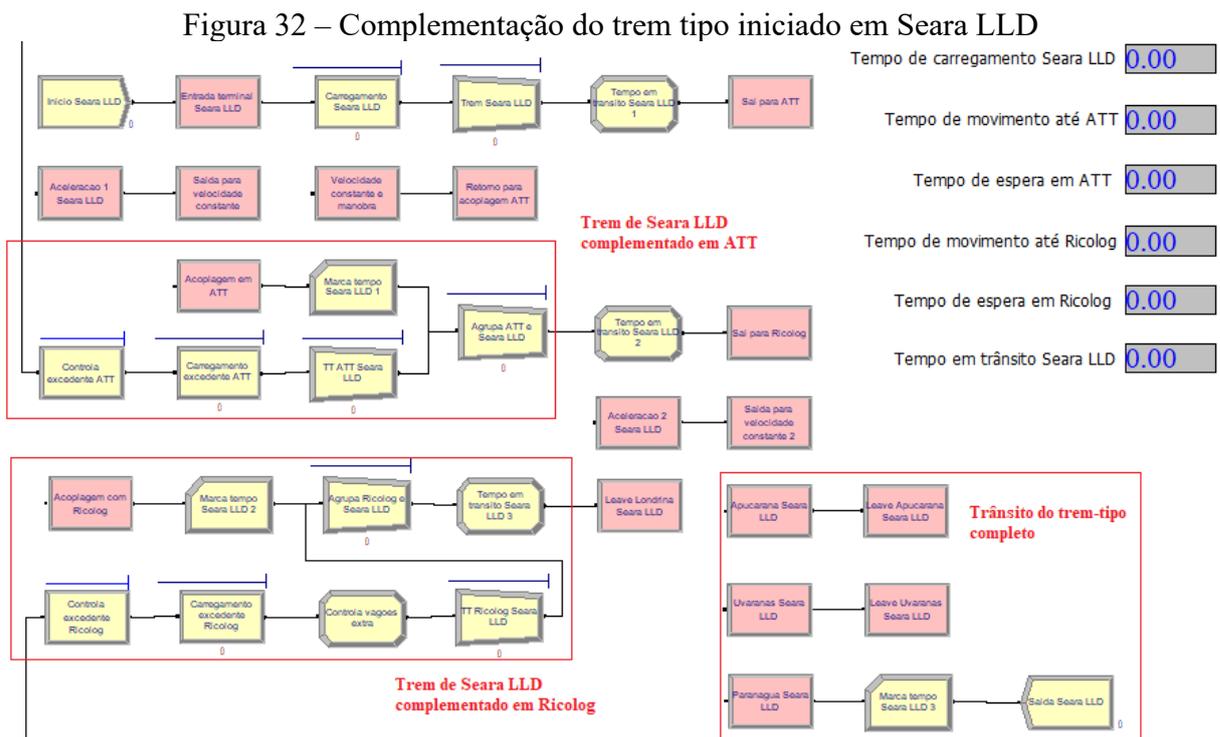
O bloco denominado “Desvio para os vagoes” controla o número de vagões a serem processados pelo terminal de ATT, limitando o que constitui o trem tipo e o que é tratado como excedente. Ao atingir o carregamento dos primeiros 105 vagões, o trem tipo parte em direção ao destino final, enquanto os demais vagões aguardam pela chegada do conjunto cuja composição se inicia em Seara LLD. Como ferramenta auxiliar, o contador de intervalo decorrido para cada processo é posicionado ao lado da sequência programada.

Para os terminais deficitários, a configuração de blocos permite a destinação de serviços nos terminais superavitários, em que, dependendo do caso, os vagões podem aguardar no próprio terminal ou serem destinados ao pátio mais próximo cujo o espaço físico atenda às características dos vagões complementares, como o comprimento total do conjunto, por exemplo. Além do registro de tempo para o carregamento no próprio terminal e do tempo em trânsito, também são contabilizados os intervalos decorridos para o trânsito dos trens tipo

incompletos até os terminais de capacidade excedente e tempos de espera dos mesmos até o carregamento dos vagões complementares.

Os dados de entrada para execução do modelo de macro simulação ferroviária são, além dos tempos estimados de trânsito com base nas velocidades e distâncias de cada trecho percorrido, o tempo necessário para o carregamento dos vagões e de trânsito entre terminais para trens tipo incompletos. Esses dados de entrada são obtidos a partir de micro simulações dos terminais detalhadas no item 4.3.2. Os dados de tempo a serem submetidos à análise fuzzy correspondem à média obtida para o intervalo de confiança desejado para cada terminal.

A Figura 32 representa as atividades que se iniciam em Seara LLD, passam pelas complementações em ATT e Ricológ (destaque em vermelho), e, por fim, encaminha o trem até Paranaguá. Inicialmente, adotou-se 50 replicações para a amostra piloto, a partir da qual é estimado o intervalo de confiança e verificado se o mesmo se adequa ao parâmetro estabelecido para sua aceitabilidade.

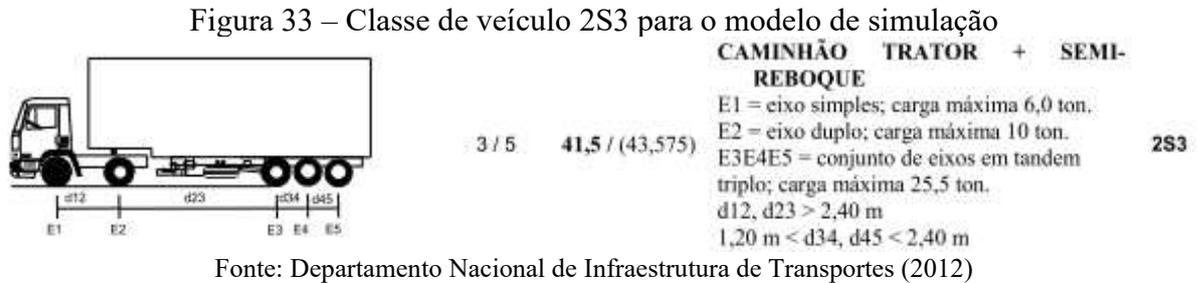


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.2.2 Sistema de simulação rodoviário

O primeiro passo consistiu em definir o modelo de semirreboque graneleiro para estabelecer a equivalência de capacidade entre os compartimentos de carga. A classe de veículo selecionada foi a 2S3, tendo como referência o quadro de fabricantes listado pelo Departamento

Nacional de Infraestrutura de Transportes (2012), o qual indica diversas opções de reboques e semirreboques com relação à capacidade de cada eixo e distâncias entre os mesmos (Figura 33). O veículo selecionado para vinculação ao modelo de simulação possui 5 eixos, sendo 2 do veículo trator e 3 do semirreboque.

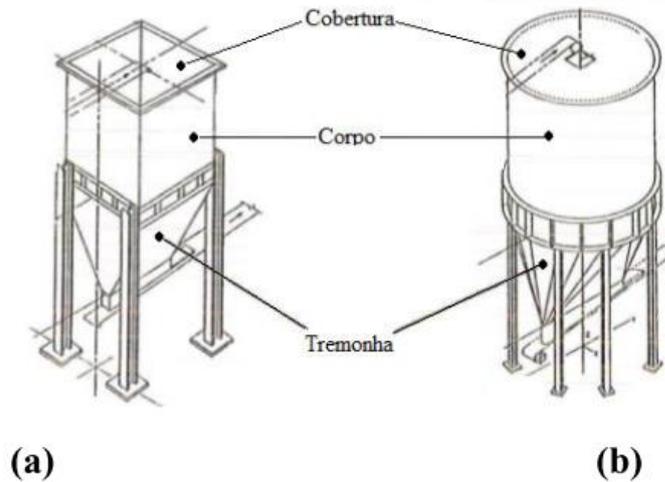


Todavia, a quantificação do número de caminhões para distribuição da carga se dá em função da capacidade de carga líquida de um único veículo. Esse número foi calculado pela razão entre a carga total a ser movimentada (6300 t) e a lotação máxima do semirreboque adotado (32,15 t) (<https://www.rodolinea.com.br/Produtos.aspx?Id=116>). Essa relação resulta na necessidade de 196 caminhões e semirreboques.

4.4.2.2.1 Processo de carregamento

Assim como o modelo ferroviário, dois fatores preponderantes devem ser incorporados ao modelo de macro simulação: o tempo de carregamento dos semirreboques e o tempo de tráfego até o município de Paranaguá. A taxa de carregamento depende diretamente da eficiência dos silos de carregamento, os quais são equipados com uma tremonha para o escoamento dos grãos (Figura 34), bem como do número de instalações disponíveis para realizar o carregamento.

Figura 34 – Silos agrícolas metálicos



(a) prismático com tremonha cuneiforme, (b) cilíndrico com tremonha tipo cinzel.

Fonte: Cardoso *et al.* (2020)

A quantidade de instalações de carregamento disponíveis foi obtida pela base de dados da Companhia Nacional de Abastecimento (2022), em que são mapeados os armazéns de granel sólido em cada localidade (ver Apêndice C), sendo estes pontos os locais de parada para o recebimento da carga pelos caminhões. Foram incluídos no modelo apenas terminais situados nos arredores dos terminais ferroviários avaliados no modelo, a fim de considerar uma origem da carga rodoviária próxima a ferroviária.

Como critério de execução da simulação, todos os terminais inclusos no sistema possuem igual probabilidade de receber cada caminhão, sendo esse comando configurado por um bloco de decisão. Também se leva em consideração a capacidade de armazenamento em cada terminal, uma vez que um terminal com capacidade inferior a 6300 toneladas não poderia receber todos os caminhões. Sendo assim, uma vez atingida a capacidade de um determinado armazém, de modo que ainda haja caminhões a serem carregados, um comando de bloqueio impede que caminhões entrem nesses terminais.

Para o carregamento, foram considerados diversos fatores que impactam no processo de escoamento do produto pela abertura de saída da tremonha. Segundo Ayres, Nascimento e Francisco (2021), a vazão mássica W (kg/s) através da tremonha pode ser calculada pela Equação 12, assumindo uma inclinação da parede da tremonha de 37° .

$$W = C \cdot \rho_B \sqrt{g} (d_0 - k \cdot d)^{2,5} \quad (12)$$

Sendo $C = 0,59$ a $0,62$; $\rho_B = 666,96 \text{ kg/m}^3$ e $d = 6 \text{ mm}$ para a soja (ONETTA; RUFFATO, 2018); g a aceleração gravitacional (m/s^2); $k = 1,4$; d_0 o diâmetro de abertura para saída dos grãos (m). Para a simulação, calcula-se o tempo de carregamento pela relação entre a capacidade do compartimento e a vazão máxima estimada.

4.4.2.2.2 Roteirização do transporte rodoviário

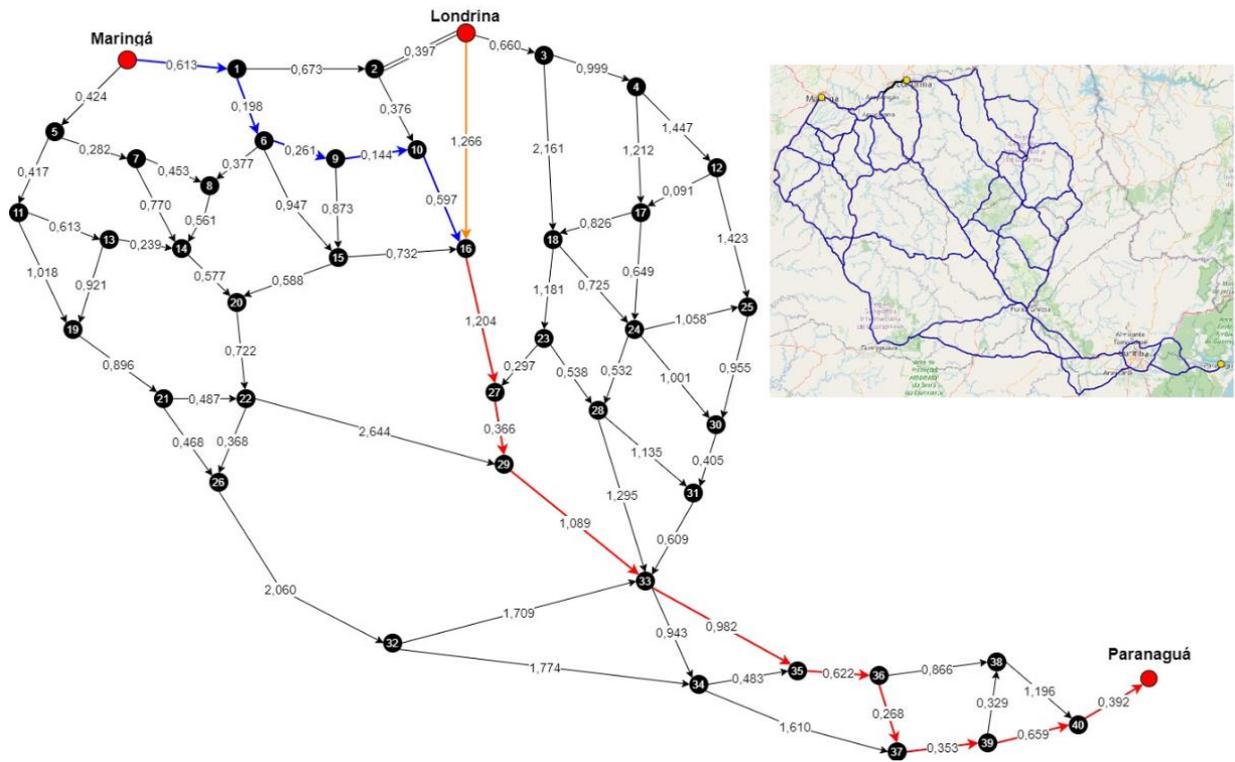
Nas bases de dados institucionais, não se dispõe de dados diretos relacionados à velocidade de tráfego dos veículos pelas rodovias brasileiras. A ferramenta Open Route Service (ORS), presente no QGIS3®, é utilizada para estimar o tempo de trânsito entre os municípios, considerando as possíveis rotas com origem em Londrina e Maringá e destino em Paranaguá.

Dadas as diversas possibilidades sequenciais de deslocamento a partir das origens, o modelo de macro simulação requer a escolha da alternativa que possibilite a melhor rota, ou seja, aquela que requer menor tempo de locomoção. Para tanto, a malha viária modelada através do QGIS® é convertida em um grafo, no qual cada rota (aresta) possui uma penalização (ou ponderação) de tempo para deslocar entre uma cidade (vértice) e outra. Segundo Li e Klette (2011), um grafo $G = [V, A]$ é definido por um conjunto V de vértices e um conjunto $A \subseteq \{\{p, q\}: p, q \in V \wedge p \neq q\}$ de arestas ligando esses vértices, de modo que dois vértices são adjacentes em G se forem conectados por uma aresta.

Os autores também descrevem os grafos ponderados, definindo um caminho como uma sequência finita $\rho = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ de vértices, onde p_i e p_{i+1} são adjacentes, para $i = 0, \dots, n - 1$. O peso total de um caminho é a soma das ponderações de todas as arestas presentes no mesmo. Aquele que possuir a menor ponderação total é definido como o caminho mais curto do grafo.

Para o modelo de macro simulação, a penalização entre os vértices é adotada como o tempo de trânsito pela aresta de ligação. A resolução para o caminho mais curto, nesse caso, de menor tempo requerido, é realizada com a estruturação do algoritmo de Dijkstra pelo *solver* do Excel®. A Figura 35 representa a conversão da malha viária em um grafo ponderado, em horas, para o deslocamento entre os municípios. Os trechos mais curtos com origem em Maringá passam pelos nós 1, 2, 9, 10 e 16, enquanto Londrina se conecta diretamente ao nó 16. Para os trechos comuns às duas origens, a partir do nó 16, são percorridos os nós 27, 29, 33, 35, 36, 37, 39 e 40, até chegar a Paranaguá.

Figura 35 – Grafo ponderado da malha rodoviária com os caminhos mais curtos

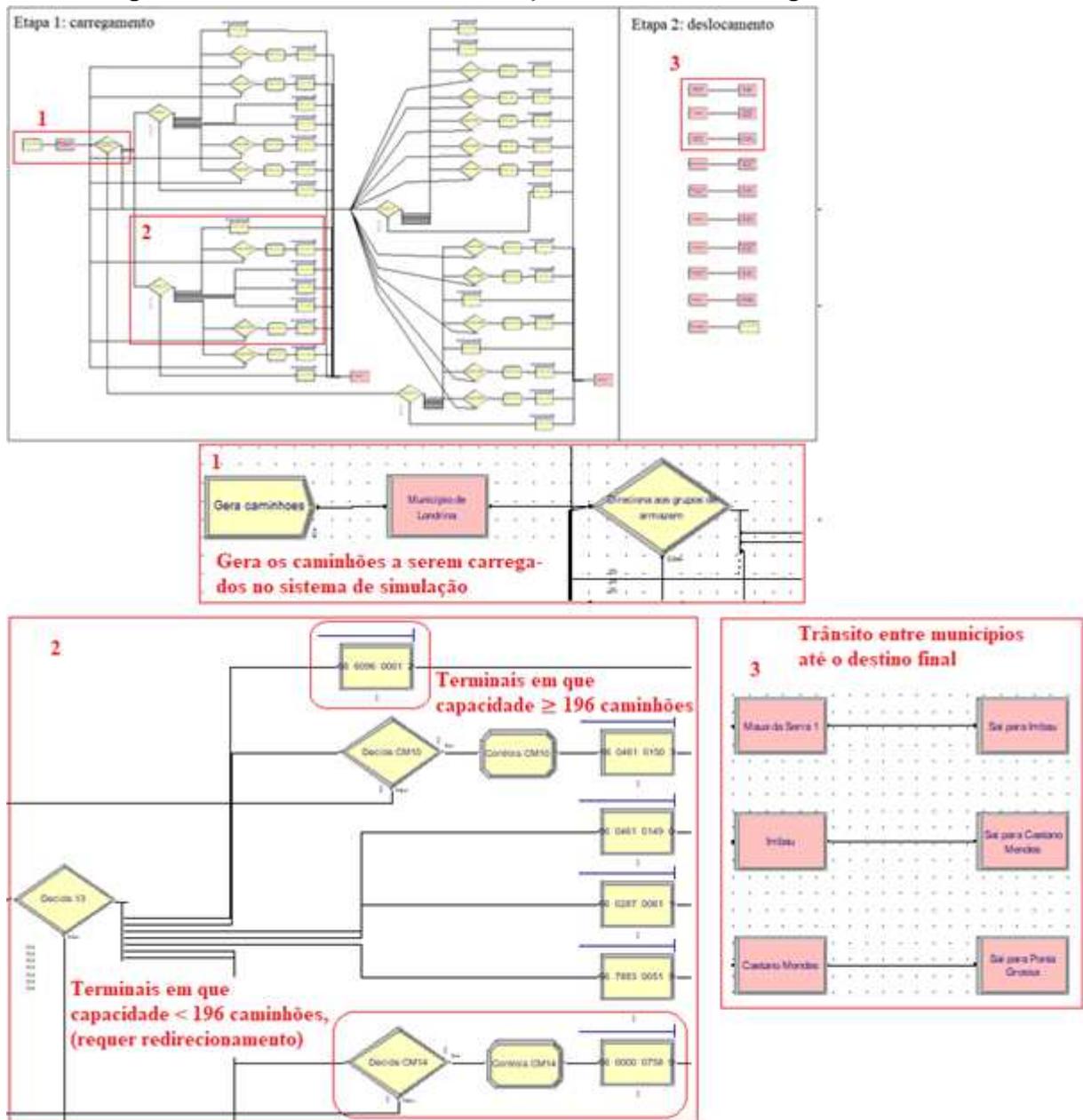


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.2.2.3 Modelo computacional rodoviário

Com base no mapeamento dos armazéns, foram contabilizadas 32 instalações para Londrina e 50 instalações para Maringá. Após a entrada dos caminhões no sistema, os mesmos se direcionam a um determinado armazém em função de um bloco de decisão probabilístico. Após o carregamento dos semirreboques, inicia-se a etapa de deslocamento até o destino da carga de acordo com a rota penalizada com o menor tempo possível. A Figura 36 representa o modelo construído para o município de Londrina.

Figura 36 – Modelo de macro simulação rodoviária com origem em Londrina



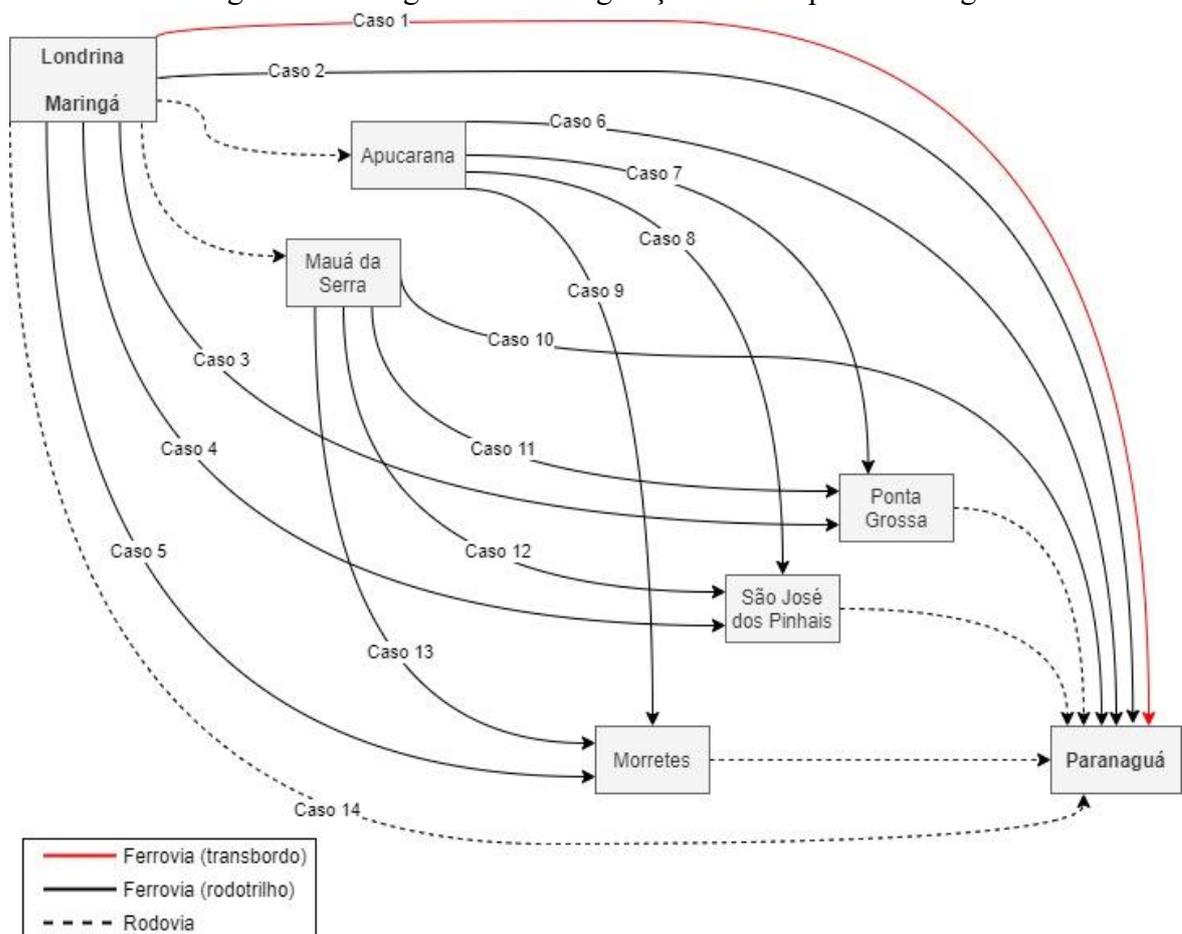
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.2.3 Sistema de simulação intermodal

Para o sistema intermodal, a modelagem de simulação com rodotrilhos apresenta etapas iguais aos modos individuais, sendo o processo de carregamento dos semirreboques o mesmo do modelo de simulação rodoviário, enquanto a etapa de deslocamento possui as mesmas características do modelo ferroviário. Além dos processos em comum às outras duas modalidades, o conjunto de locomotivas e semirreboques/vagões devem ainda passar pelo processo de composição do trem tipo.

Os modelos de simulação são programados para serem executados com diferentes configurações sequenciais em relação aos modos de transporte para cada trecho. As origens e destinos adotados, tendo como pontos de conexão intermodal os locais ilustrados na Figura 23, são detalhadas pela Figura 37 e complementadas pelo Quadro 5. As possíveis origens para o transporte ferroviário são os municípios de Londrina/Maringá, Apucarana e Mauá da Serra, enquanto os municípios candidatos a destino desta modalidade, onde é realizada a transição para o rodoviário novamente, são Ponta Grossa, São José dos Pinhais e Morretes, enquanto Paranaguá é o destino definitivo.

Figura 37 – Diagrama de configuração do transporte da carga



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Quadro 5 – Sequenciamento das modalidades de transporte

Alternativa	Descrição da movimentação da carga
1	Transferência por transbordo e transporte integralmente por trens.
2	Movimentação por rodotrilho e transporte integralmente por trens.
3	Transporte por rodotrilho da origem até Ponta Grossa e complemento rodoviário até Paranaguá.
4	Transporte por rodotrilho da origem até São José dos Pinhais e complemento rodoviário até Paranaguá.
5	Transporte por rodotrilho da origem até Morretes e complemento rodoviário até Paranaguá.
6	Transporte rodoviário da origem até Apucarana e complemento por rodotrilho até Paranaguá
7	Transporte rodoviário da origem até Apucarana, complemento 1 por rodotrilho até Ponta Grossa e complemento 2 por rodovia até Paranaguá
8	Transporte rodoviário da origem até Apucarana, complemento 1 por rodotrilho até São José dos Pinhais e complemento 2 por rodovia até Paranaguá
9	Transporte rodoviário da origem até Apucarana, complemento 1 por rodotrilho até Morretes e complemento 2 por rodovia até Paranaguá
10	Transporte rodoviário da origem até Mauá da Serra e complemento por rodotrilho até Paranaguá
11	Transporte rodoviário da origem até Mauá da Serra, complemento 1 por rodotrilho até Ponta Grossa e complemento 2 por rodovia até Paranaguá.
12	Transporte rodoviário da origem até Mauá da Serra, complemento 1 por rodotrilho até São José dos Pinhais e complemento 2 por rodovia até Paranaguá.
13	Transporte rodoviário da origem até Mauá da Serra, complemento 1 por rodotrilho até Morretes e complemento 2 por rodovia até Paranaguá.
14	Transporte integralmente por rodovias.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Cada configuração tem seu tempo requerido de movimentação, admitindo-se que não foram realizadas decomposições parciais do conjunto de locomotivas e reboques. Assim, todos os compartimentos devem chegar por caminhões ou por trens ao final da simulação executada. Ademais, para o sistema de rodotrilhos, uma única origem deve ser tomada para a montagem, e um único destino para o desmembramento, de todos os 196 compartimentos.

4.4.3 Custo de movimentação

A estimativa dos custos tem como referência o portal do Observatório Nacional de Transporte e Logística (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A., 2022a, 2022b), sendo considerados os custos de transporte e de transbordo. O simulador informa os custos totais de acordo com uma série de dados de entrada que devem ser informados nos campos disponíveis. A Tabela 11 indica os dados de entrada solicitados pelo portal para cada tipo de operação.

Tabela 11 – Dados de entrada para estimativa de custo de transporte e transbordo

Parâmetro de custo	Modalidade	Dados de entrada
Transporte	Rodoviário Ferroviário	Tipo de carga [und]; Distância percorrida [km].
Transbordo	Ferro-Rodo Rodo-Ferro	Movimentação [ton/ano]; Número de funcionários [und]; Salário médio do setor [R\$]; Descarregamento médio por hora [ton]; Tempo médio de armazenamento [dias]; Tarifa energética [R\$/kW].

Fonte: Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2022a, 2022b)

Segundo a Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2020), o manual metodológico de cálculo dos custos considera três aspectos principais: Custos Fixos, Custos Variáveis e Remuneração do Capital. O Custo Unitário, em R\$/TKU para transporte ou R\$/TU para transbordo, é calculado pela Equação 13.

$$C_f = \frac{CF + CV + RemK}{Prod} \quad (13)$$

Em que:

C_f = custo unitário final (R\$/TKU ou R\$/TU).

CF e CV = custos fixos e variáveis, respectivamente (R\$).

$RemK$ = remuneração do capital investido (R\$).

$Prod$ = produção de transporte (TKU) ou de transbordo (TU).

4.4.3.1 Custos de transbordo

Para a estimativa dos custos, adotou-se como referência os valores padrões fixados pela EPL. O produto de referência adotado foi o Granel Sólido Agrícola (GSA), o qual não requer utilização de embalagens, sendo uma carga seca de origem vegetal, embarcada e transportada sem acondicionamento, sem marca de identificação e sem contagem de unidades. Assim, para cada caso configurado, os custos totais de transbordo se dão, principalmente, em função do tipo de operação de transferência entre modalidades (ver Tabela 12).

Tabela 12 – Custo unitário de transbordo padrão

Arranjo	Modalidade	Custo Simulado de Transbordo (R\$/t)
Rota 1	Rodo-Ferro	9,74
Rota 2	Rodo-Ferro	9,74
Rota 3	Ferro-Rodo	8,89
Rota 4	Ferro-Rodo	8,89
Rota 5	Ferro-Rodo	8,89
Rota 6	Rodo-Ferro	9,74
Rota 7	Rodo-Ferro + Ferro-Rodo	18,63
Rota 8	Rodo-Ferro + Ferro-Rodo	18,63
Rota 9	Rodo-Ferro + Ferro-Rodo	18,63
Rota 10	Rodo-Ferro	9,74
Rota 11	Rodo-Ferro + Ferro-Rodo	18,63
Rota 12	Rodo-Ferro + Ferro-Rodo	18,63
Rota 13	Rodo-Ferro + Ferro-Rodo	18,63
Rota 14	-	0

Fonte: Elaborado com base em Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2022b)

Para os arranjos em que o transporte parte da origem por ferrovias, considera-se uma primeira operação de transbordo Rodo-Ferro com base na premissa de que, entre as áreas de produção e os terminais de armazenamento, os grãos tenham sido transportados por rodovias. O simulador de custos de transbordo requer, como indicado na Tabela 11, um conjunto de dados que podem variar muito de um terminal para o outro. Para simplificação dos cálculos, a Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2022b) fornece os dados com valores padronizados para serem utilizados, havendo também a opção para o usuário inserir os próprios dados, caso disponha dos mesmos.

4.4.3.2 Custos de transporte

O simulador de custos de transportes requer um menor número de informações, sendo incluídas a classificação da carga e a distância de movimentação. Nas alternativas cujos transportes nos trechos iniciais e finais são feitos por rodovias, os cálculos são segmentados, dado que a tendência é de que o transportador no primeiro trecho não seja o mesmo no segundo. As variações de custo não variam de maneira linearmente proporcional de acordo com a distância. A Tabela 13 reflete os custos de transporte para cada opção de rota nos trechos rodoviários iniciais (Rodovia 1), finais (Rodovia 2) e tronco principal ferroviário.

Tabela 13 – Custo do transporte com origem em Londrina

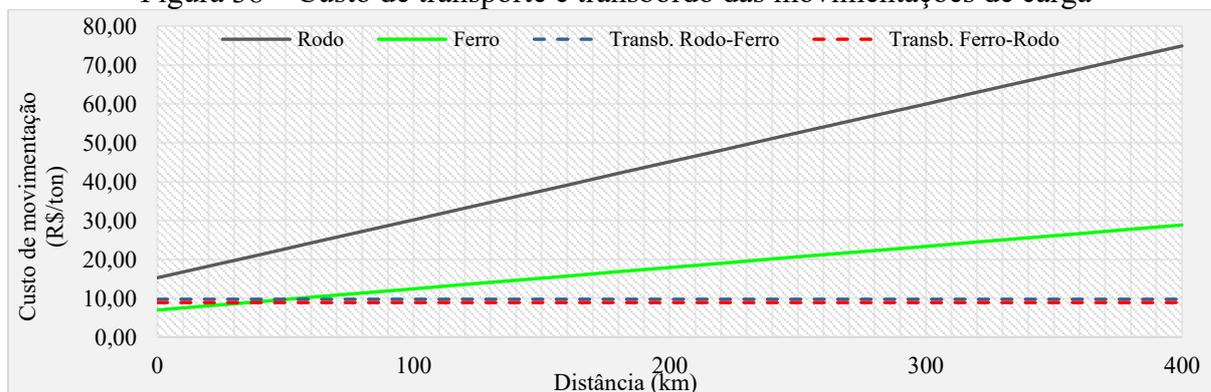
Etapas de origem em Londrina	Rota (R\$/t)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rodovia 1	-	-	47,64	28,94	21,48	22,86	22,86	22,86	22,86	27,64	27,64	27,64	27,64	88,59
Ferrovia	41,53	41,53	27,93	35,38	39,39	38,78	25,18	32,63	36,64	35,44	21,84	29,29	33,31	-
Rodovia 2	-	-	-	-	-	-	47,64	28,94	21,48	-	47,64	28,94	21,48	-

Etapas de origem em Maringá	Rota (R\$/t)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rodovia 1	-	-	47,64	28,94	21,48	25,98	25,98	25,98	25,98	33,22	33,22	33,22	33,22	94,17
Ferrovia	42,67	42,67	29,07	36,51	40,53	38,78	25,18	32,63	36,64	35,44	21,84	29,29	33,31	-
Rodovia 2	-	-	-	-	-	-	47,64	28,94	21,48	-	47,64	28,94	21,48	-

Fonte: elaborado com base em Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2022a)

O gráfico da Figura 38 representa a variação de custo de transporte por tonelada em função da distância de viagem (linha sólida), além das constantes de transbordo entre as modalidades (linha tracejada).

Figura 38 – Custo de transporte e transbordo das movimentações de carga



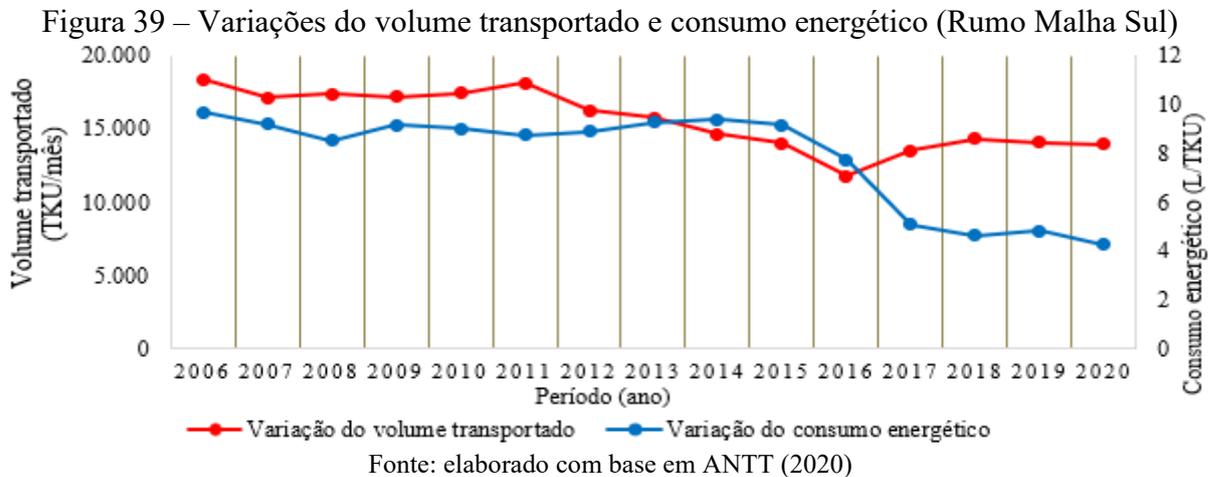
Fonte: Elaborado com base em Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2022b, 2022a)

Devido à falta de base de dados para determinar os fluxos e tipos de eventuais cargas de retorno, esta parte do ciclo de transporte não foi considerada no processo avaliativo. Portanto, apenas etapa do transporte de Londrina ou Maringá até Paranaguá constituem os objetos de comparação.

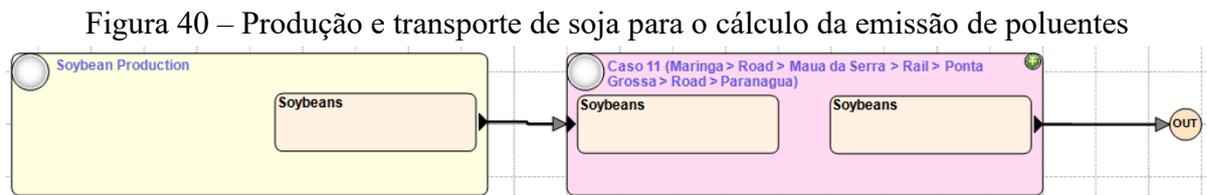
4.4.4 Emissão de poluentes

Para a Rumo Malha Sul, observa-se um aumento da eficiência do transporte de mercadorias, dado o comparativo da taxa de variação percentual entre o volume médio anual transportado, em TKU/mês, e o consumo de combustível, em L/TKU. Enquanto a queda de

produtividade se deu em torno de 24%, a redução do consumo energético apresentou valor pouco acima de 55%, como indica o gráfico da Figura 39.



Utilizando o *software* Greet®, elaborou-se o processo de transporte de grãos, adotando a soja como o produto a ser manipulado. O processo completo considera a produção dos grãos e o transporte para o cálculo da emissão dos gases de efeito estufa. A Figura 40 representa um modelo completo para estimativa das emissões, sendo o primeiro bloco correspondente à produção e o segundo ao transporte.

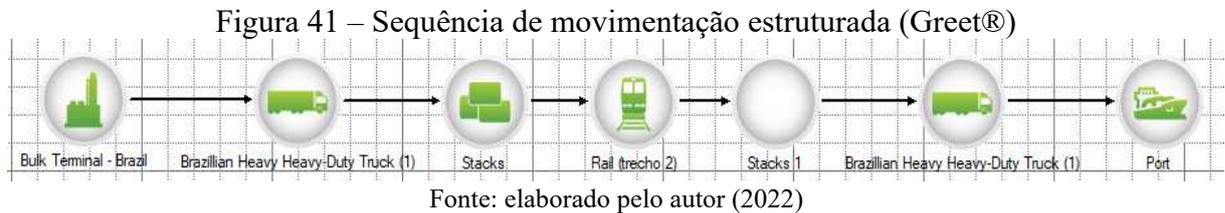


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Os dados de saída de emissão calculados pelo programa ocorrem de maneira cumulativa, ou seja, um determinado bloco de um processo carrega consigo as emissões de sua etapa correspondente somadas às emissões dos blocos que o precedem. Para a estrutura em questão, a etapa de transporte contém a soma de emissões da produção de soja e da sua movimentação. Desta forma, a emissão de poluentes devido ao transporte de grãos é calculada subtraindo-se o que é emitido na produção do montante acumulado na etapa de transporte.

Para cada alternativa de transporte a ser utilizada, deve-se configurar os dados de entrada considerando as sequências de utilização dos modos de transporte, as distâncias a serem percorridas, as velocidades, entre outros. A Figura 41 ilustra a configuração de sequência de

transporte da Rota 11, no qual os trechos iniciais e finais são desenvolvidos por rodovias, e o trecho intermediário por ferrovia.



Os modos de transporte são configurados com a distância de transporte, a capacidade (no caso dos caminhões), velocidade operacional (no caso dos trens) o combustível utilizado e a participação no referido trecho de transporte. A Figura 42 exemplifica a entrada de dados para cada modo de transporte em função do trajeto a ser desenvolvido.

Figura 42 – Dados de entrada para o cálculo de emissão dos modos de transporte

As imagens mostram duas janelas de configuração de parâmetros de transporte no software Greet. A primeira janela é para o modo rodoviário e a segunda para o modo ferroviário.

Trecho rodoviário (Brazilian Heavy Heavy-Duty Truck (1) mode parameters):

- Local parameters:
 - Distance: 82,9800 km
 - Share: 100,0000 %
 - Urban Share: 0 %
 - Fuel Share: Default
- Selected Fuel Share:
 - Pathway - Conventional Diesel from Crude Oil for US Refineries: 100,0000 %
- Account for backhaul travel:

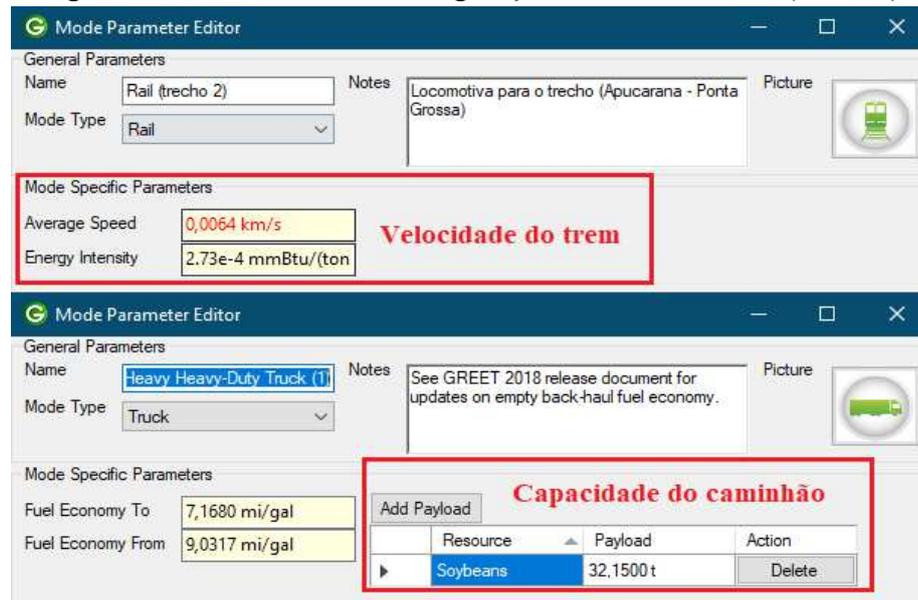
Trecho ferroviário (Rail (trecho 2) mode parameters):

- Local parameters:
 - Distance: 272,0000 km
 - Share: 100,0000 %
 - Urban Share: 0 %
 - Fuel Share: FTD (Diesel and Electricity)
- Selected Fuel Share:
 - Pathway - Conventional Diesel from Crude Oil for US Refineries: 85,0000 %
 - Pathway - Distributed - Brazil Mix: 15,0000 %
- Account for backhaul travel:

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Em relação à contribuição energética de cada combustível, adotou-se 100% de diesel convencional para os caminhões. As locomotivas foram programadas com percentual energético de 85% de diesel e 15% de eletricidade. Parte da energia consumida no transporte se dá por autogeração através do calor produzido pelo processo de frenagem (RUMO LOGÍSTICA, 2019). O percentual de 15% se justificou pelo fato de este reaproveitamento ser entre 10 e 20% para locomotivas elétricas e diesel-elétricas (VITINS, 2009), sendo adotado um percentual médio para as simulações. A Figura 43 indica os parâmetros de velocidade para o modo ferroviário e de capacidade para o modo rodoviário.

Figura 43 – Parâmetros de configuração das modalidades (Greet®)



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.5 Processo de avaliação por lógica difusa

Como representado na Figura 8 (item 2.2.2) a avaliação de um determinado índice por um sistema difuso começa pela definição dos dados de entrada, os quais já foram obtidos por simulação, como indicado nos itens anteriores. Em seguida, prossegue-se com a normalização das variáveis independentes (indicadores avaliados) para um fator de escala em comum, visto que a mesmas possuem unidades distintas entre si. Os indicadores de avaliação são tomados como inversamente proporcional à escala do sistema difuso, ou seja, quanto menor seus valores de tempo, custo e emissão, mais próximos estarão do limite superior da escala adotada, e vice-versa. A Tabela 14 detalha a normalização dos indicadores.

Tabela 14 – Normalização das variáveis em escala

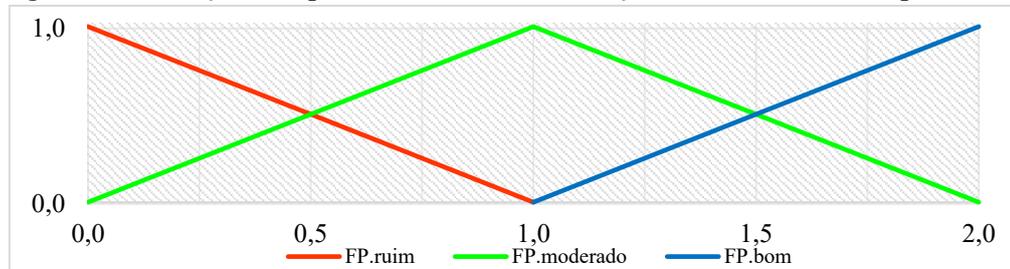
Nível de serviço	Município	Desempenho (horas)	Custo (R\$/t)	Emissão (ton/tu)	Escala
Mínimo	Londrina	52,00	115,75	2,62E-02	0
	Maringá	67,19	121,33	2,82E-02	
Intermediário	Londrina	35,94	83,51	1,78E-02	1
	Maringá	42,70	86,87	1,89E-02	
Máximo	Londrina	19,87	51,27	9,30E-03	2
	Maringá	18,20	52,41	9,60E-03	

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Seguindo com a fuzzificação, foram adotadas três funções de pertinência (FP.ruim, FP.moderado e FP.bom), as quais se situam dentro do intervalo de 0 a 2, de modo que, quanto mais próximo de 0, maior o grau de pertinência à função FP.ruim. Por outro lado, quanto mais

próximo de 2,0, maior seu grau de pertinência à função FP.bom. A função FP.moderado varia dentro do intervalo estabelecido, assumindo valor máximo em $x = 1,0$. A Figura 44 representa o gráfico das funções de pertinência.

Figura 44 – Funções de pertinência na classificação das variáveis independentes

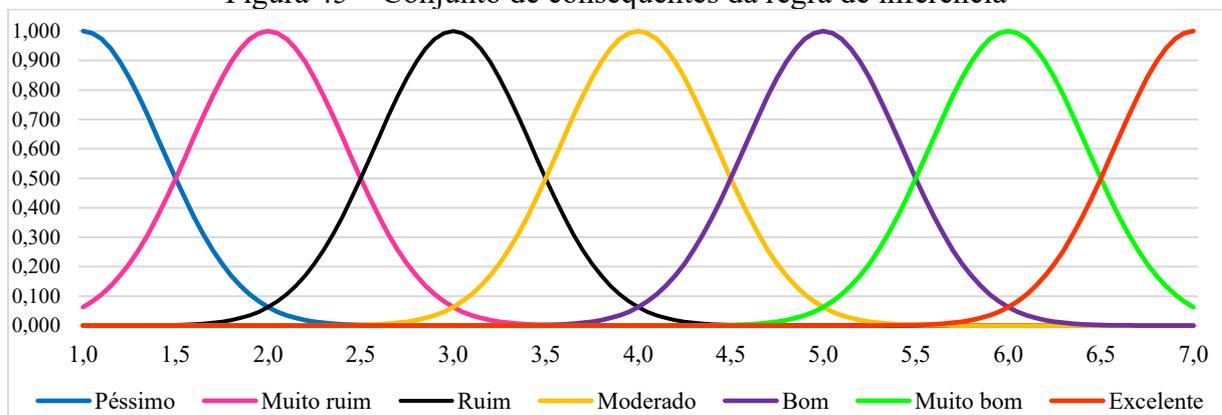


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

O modelo de inferência baseado em regras tem sua estruturação de acordo com o cenário simulado, o qual irá determinar a ordem de importância dos indicadores. Devido ao elevado número de combinações possíveis para as regras, a classificação de acordo com cada cenário está descrita no Apêndice E.

O processo de inferência envolveu a determinação do número de funções de pertinência e seus parâmetros para a classificação final de cada alternativa de rota. Quanto maior o número de funções consequentes, maior a precisão de classificação, sendo recomendado um valor prático entre 2 e 7 conjuntos, não havendo ganhos significativos para valores acima disso. Além disso, a sobreposição recomendada se dá na faixa entre 0,25 e 0,75 (SIMÕES; SHAW, 2007). A Figura 45 representa graficamente os possíveis consequentes a partir da classificação indicada na Tabela 14, com as funções assumindo formato trapezoidal.

Figura 45 – Conjunto de consequentes da regra de inferência



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Pelo gráfico da Figura 45, observa-se que o nível de serviço de cada alternativa pode ter variação delimitada por uma escala de 1 a 7, sendo este diretamente proporcional ao nível resultante pela combinação das variáveis independentes. A Equação 14 descreve o comportamento das funções de pertinência na defuzzificação.

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-\tau)^2}{\beta}} \quad (14)$$

Em que:

τ : define a posição onde ocorre o pico da função de pertinência.

β : define a largura da base da função formatada.

Os coeficientes das funções de pertinência intermediárias são definidos no Quadro 6, sendo configurada meia função para os níveis “Péssimo” e “Excelente”.

Quadro 6 – Coeficientes das funções intermediárias

Função de pertinência	τ	β
Péssimo	1,000000	
Muito ruim	2,000000	
Ruim	3,000000	
Moderado	4,000000	0,360675
Bom	5,000000	
Muito bom	6,000000	
Excelente	7,000000	

Figura 46 - Função Gaussiana de saída

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Por fim, o nível de serviço é obtido com a defuzzificação do sistema através do método de Mamdani, o qual determina o valor de saída pelo cálculo do centroide da área definida pela intersecção das funções às quais uma determinada alternativa pertence. A Equação 17 determina os dados de saída para o nível de serviço.

$$NS = \frac{\sum \mu_i(x) x_i}{\sum \mu_i(x)} \quad (17)$$

Sendo:

NS = nível de serviço calculado pela área do centroide.

$\mu_i(x)$ = i-ésimo valor da ordenada na função delimitada.

x_i = i-ésimo ponto da abscissa da função de pertinência.

O Quadro 7 relaciona os cenários possíveis segundo as prioridades que os embarcadores podem indicar no momento da contratação do serviço de transporte. Ao todo são 13 cenários nos quais são relacionados os indicadores, sendo que uma relação “A > B” indica que o parâmetro A é mais importante que o parâmetro B, enquanto a relação “A = B” determina que os parâmetros A e B são igualmente importantes.

Quadro 7 – Cenários de priorização

Cenário	Prioridade	Relação representativa
I	Desempenho > Custo > Emissão	D > C > E
II	Desempenho > Emissão > Custo	D > E > C
III	Desempenho > Custo = Emissão	D > C = E
IV	Custo > Desempenho > Emissão	C > D > E
V	Custo > Emissão > Desempenho	C > E > D
VI	Custo > Desempenho = Emissão	C > D = E
VII	Emissão > Desempenho > Custo	E > D > C
VIII	Emissão > Custo > Desempenho	E > C > D
IX	Emissão > Desempenho = Custo	E > D = C
X	Desempenho = Custo > Emissão	D = C > E
XI	Desempenho = Emissão > Custo	D = E > C
XII	Custo = Emissão > Desempenho	C = E > D
XIII	Desempenho = Custo = Emissão	D = C = E

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O Capítulo 4 aborda os procedimentos do estudo de caso na determinação dos dados de entrada para os indicadores, considerando as alternativas de roteirização estabelecidas e a participação de cada modalidade na execução do transporte de produtos agrícolas até o destino final. O Capítulo 5 apresenta os resultados a partir dos métodos utilizados para avaliação dos indicadores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desempenho operacional, custo de movimentação e emissão de poluentes são calculados segundo a escolha do modo de transporte em cada trecho e em função das respectivas distâncias percorridas pelos mesmos. Para as determinações do custo e emissão, a tonelagem também é um fator preponderante para as estimativas.

5.1 OUTPUTS DE DESEMPENHO OPERACIONAL

5.1.1 Resultados de tempo para a micro simulação

Com as simulações iniciais concluídas, alguns parâmetros de comportamento entre o sistema de transbordo e o sistema multimodal já podem ser observados. A Tabela 15 apresenta as médias amostrais de cada sistema junto aos respectivos desvios padrão para um conjunto amostral piloto, em que $n = 50$.

Tabela 15 – Média e desvio padrão do tempo de operação dos modelos de simulação

Município	Terminal	Transbordo		Rodotrilho	
		Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)
Londrina (PR)	ATT	7,18	7,52	6,43	0,77
	Ricolog	10,66	11,16	6,41	0,71
	Seara LLD	25,58	26,78	6,47	0,77
Maringá (PR)	Bunge LMG	5,93	6,20	6,48	0,83
	Cargill LMG	15,23	15,94	6,40	0,78
	Cocamar	39,97	41,84	6,45	0,81
	Cofco	49,19	51,49	6,37	0,69
	CPA	12,79	13,39	6,39	0,76
	Seara LMA	8,76	9,17	6,40	0,76

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

O modelo inicial simulado requer um ajuste na quantidade de replicações, de modo que o valor atenda a um intervalo de confiança de 95%. Para verificar a quantidade de replicações necessárias, foi utilizada a ferramenta *Output Analyzer*, também contida no ARENA[®]. Segundo o tratamento de dados procedido, estima-se um novo tamanho de amostras, nesse caso, as replicações, para reconstruir as curvas de distribuição. O cálculo para estimar o novo tamanho de amostra é dado pela Equação 14, em que n^* é o número necessário de replicações, n é o número atual de replicações ($n = 50$), h é o semi-intervalo de confiança obtido (0.950 C.I. HALF-WIDTH) e h^* é o semi-intervalo de confiança desejado, ou seja, um mínimo de 10% da média amostral para uma maior precisão nos resultados (FREITAS, 2001 *apud*

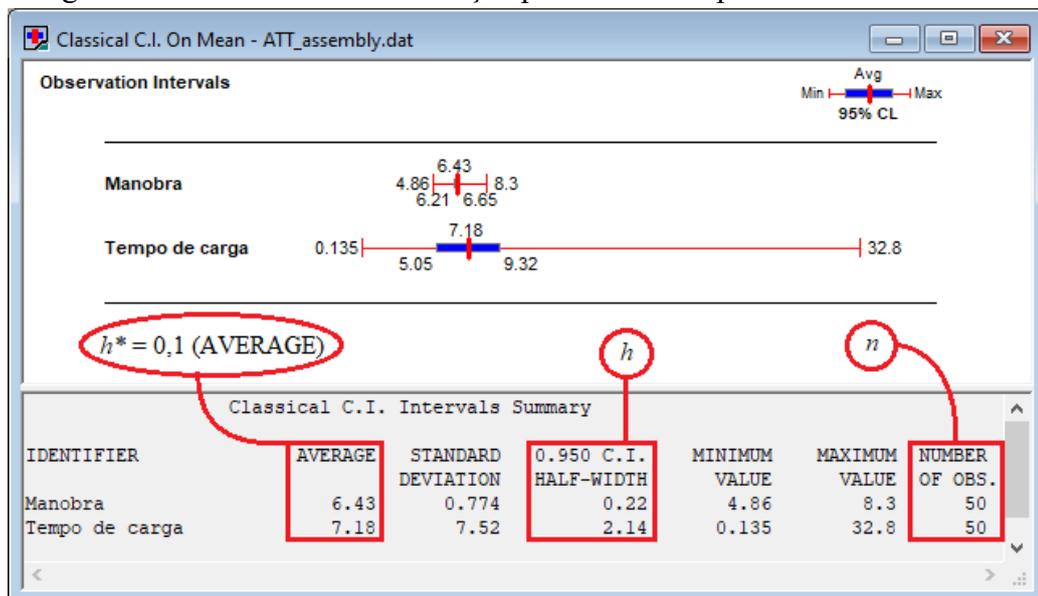
ARIAS, 2017). O intervalo da Equação 15 delimita os limites inferior e superior do intervalo estabelecido.

$$n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad (14)$$

$$[\bar{x} - h, \bar{x} + h] \quad (15)$$

A Figura 46 exemplifica o terminal ATT, em Londrina (PR), em que compara as médias e aponta os semi-intervalos obtidos para 50 amostras em cada modelo de simulação. O semi-intervalo de confiança para o sistema de rodotrilho, identificado como “Manobra” ($h = 0,22$) já é inferior a 10% da média (0,643), o que indica um valor suficiente de replicações para este modelo, especificamente. Já o modelo de transbordo, com identificação “Tempo de carga” apontou um valor do semi-intervalo superior a 10% da média ($h = 2,14$; $0,1 \bar{x} = 0,718$), sendo necessário um redimensionamento do número de replicações n (ver Figura 44).

Figura 46 – Parâmetros de simulação para a amostra piloto do terminal ATT



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Substituindo os valores indicados pelo *Output Analyzer* na Equação 14, a mesma condição para os demais terminais se confirmou no caso do sistema de rodotrilhos, indicando que, para 50 iterações, o intervalo de confiança em 95% foi atendido. Quanto às operações de transbordo, as 50 replicações se mostraram insuficientes para o intervalo estabelecido, como indica a Tabela 16 (ver Apêndice A).

Tabela 16 – Redimensionamento do número de iterações para o modelo de transbordo

Município	Terminal	X	σ	n	h	h^*	n^*
Londrina	ATT	7,18	7,52	50	2,14	0,718	445
	Ricolog	10,66	11,2	50	3,17	1,066	443
	Seara LLD	25,58	26,8	50	7,61	2,558	443
Maringá	Bunge LMG	5,93	6,2	50	1,76	0,593	441
	Cargill LMG	15,23	15,9	50	4,53	1,523	443
	Cocamar	39,97	41,8	50	11,90	3,997	444
	Cofco	49,19	51,5	50	14,60	4,919	441
	CPA	12,79	13,4	50	3,81	1,279	444
	Seara LMA	8,76	9,17	50	2,61	0,876	444

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Com a correção do número de replicações, a Tabela 17 expressa os novos semi-intervalos obtidos, indicando valores inferiores a 10% da média. Os valores n^* recalculados se mostram inferiores aos da Tabela 16, o que reitera o número suficiente de iterações realizadas para a segunda rodada de simulação.

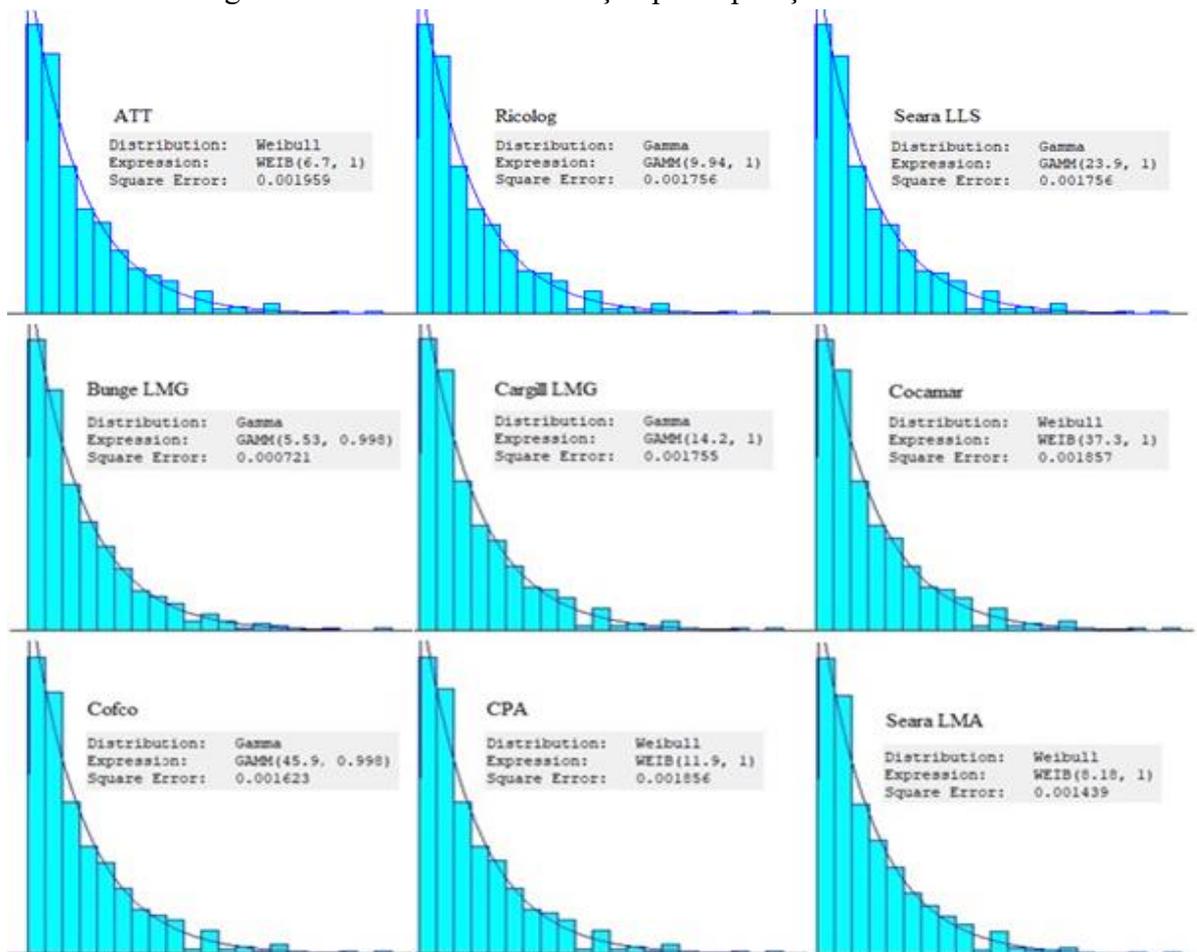
Tabela 17 – Número de replicações corrigido para simulação de transbordo

Município	Terminal	X	σ	n	h	h^*	n^*
Londrina	ATT	6,69	6,63	445	0,618	0,669	380
	Ricolog	9,94	9,87	443	0,921	0,994	381
	Seara LLD	23,85	23,65	443	2,210	2,385	381
Maringá	Bunge LMG	5,51	5,49	441	0,513	0,551	383
	Cargill LMG	14,20	14,08	443	1,320	1,420	383
	Cocamar	37,28	36,91	444	3,450	3,728	381
	Cofco	45,77	45,49	441	4,260	4,577	383
	CPA	11,93	11,81	444	1,100	1,193	378
	Seara LMA	8,17	8,09	444	0,756	0,817	381

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Submetendo os dados de amostra obtidos para os sistemas de simulação de transbordo na segunda rodada, bem como o intermodal, ao *Input Analyzer*, são geradas as curvas que descrevem o comportamento, em minutos, para cada terminal. A Figura 47 ilustra as curvas estatísticas correspondentes às tendências de intervalos para a composição de trens pelo processo de transbordo em todos os terminais, tomando como referência as declarações de rede da ANTT.

Figura 47 – Curvas de distribuição para operação de transbordo



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Com a segunda rodada de simulações concluída, alguns terminais tiveram seu processo de carregamento com características que se enquadram na distribuição gama. A função densidade dessa distribuição é definida pela Equação 16:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}, \quad x > 0 \quad (16)$$

Sendo α e β valores positivos que representam os parâmetros de forma e escala, respectivamente, e $\Gamma(\alpha)$ a função gama que apresenta os seguintes valores (THOMOPOULOS, 2017):

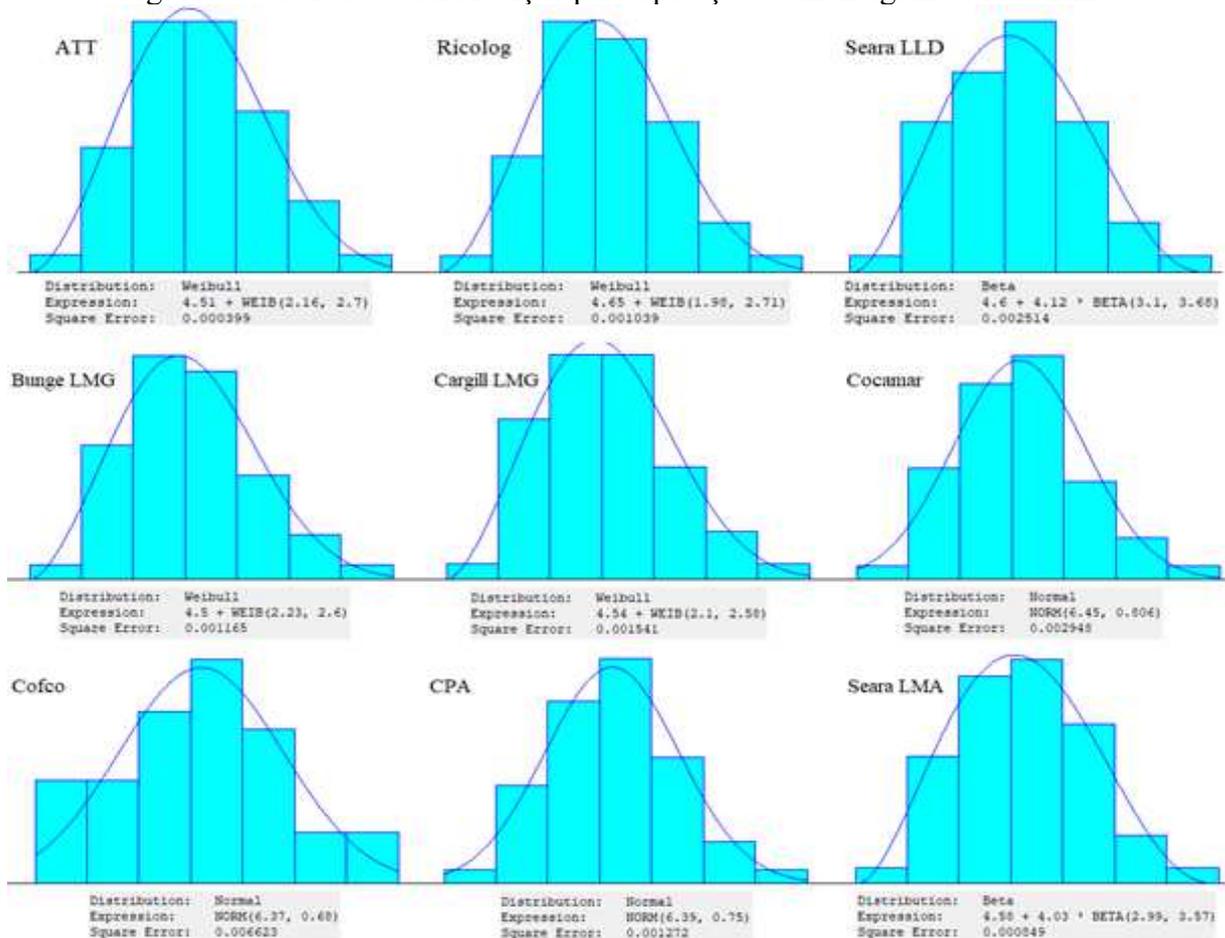
$$\Gamma(\alpha) = \sqrt{\pi}, \quad \text{se } \alpha = 0,5 \quad (17)$$

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!, \quad \text{se } \alpha \in \mathbb{N} \quad (18)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} w^{k-1} e^{-w} dw, \quad \text{se } x > 0 \quad (19)$$

Da mesma maneira, a partir de dados indiretos, são geradas as curvas estatísticas para o processo de montagem dos rodotrinhos (ver Figura 48).

Figura 48 – Curvas de distribuição para operação de montagem do rodotrinho



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Para os terminais Seara LLD e Seara LMA, observou-se, para além das distribuições já comentadas, curvas estatísticas que descrevem a função beta. A função densidade é dada pela Equação 20, estimada a partir dos parâmetros k_1 e k_2 (THOMOPOULOS, 2017).

$$f(x) = \frac{x^{k_1-1} (1-x)^{k_2-1}}{\frac{\Gamma(k_1) \Gamma(k_2)}{\Gamma(k_1 + k_2)}} \quad (20)$$

Considerando os indicadores obtidos, são estimados parâmetros de comportamento para operações de movimentação de carga por transbordo e por intermodalidade. Os dados relacionados ao modelo de transbordo se aproximam daqueles indicados para as operações nos terminais de carga. Já os dados relacionados à composição de trens por rodotrilhos se baseiam em referências de simulações já realizadas, apresentando intervalos confiabilidade satisfatórios.

A partir dos resultados preliminares, avalia-se os impactos do modelo proposto em toda a cadeia de transporte, com a finalidade de se obter parâmetros para análise difusa, baseado em desempenhos operacionais, custos e impactos ambientais, entre os sistemas rodoviário, ferroviário por transbordo de carga e o modelo de integração rodoferroviária com rodotrilhos.

5.1.2 Resultados de tempo para a macro simulação

Dentre as 14 configurações estruturadas, o modo rodoviário foi o que apresentou o menor tempo de transporte entre Londrina/Maringá e Paranaguá. Do sistema intermodal, a Rota 10 foi a de menor tempo de movimentação para todos os terminais, sendo o trecho Londrina/Maringá – Mauá da Serra percorrido por rodovias, complementado pelo sistema ferroviário intermodal de Mauá da Serra a Paranaguá. A Tabela 18 representa os tempos decorridos em função de cada configuração para os terminais avaliados.

Tabela 18 – Tempo decorrido para cada terminal (carregamento e trânsito)

Alternativa	Londrina			Maringá					
	ATT	Ricolog	Seara LLD	Bunge LMG	Cargill LMG	Cocamar	Cofco	CPA	Seara LMA
Rota 1	43,79	49,89	50,86	43,32	67,19	54,00	57,85	52,81	45,87
Rota 2	42,19	41,76	41,40	43,54	42,83	42,90	42,77	42,19	41,60
Rota 3	43,12	45,67	45,42	47,55	45,62	45,76	45,51	46,07	45,52
Rota 4	49,77	49,31	48,54	51,21	49,73	49,87	49,62	49,71	48,64
Rota 5	52,00	51,54	50,18	53,43	52,22	52,36	52,11	51,93	50,27
Rota 6	38,72	38,70	39,87	38,79	38,66	38,74	38,61	38,65	38,99
Rota 7	42,49	42,44	43,37	42,72	42,47	42,62	42,37	42,44	43,07
Rota 8	46,11	46,06	47,14	45,89	45,64	45,79	45,54	45,61	46,36
Rota 9	48,08	48,02	49,35	48,03	47,77	47,93	47,67	47,74	48,43
Rota 10	37,01	36,98	37,29	37,14	37,02	37,10	36,98	36,99	37,24
Rota 11	40,81	40,75	40,93	40,76	40,53	40,67	40,43	40,47	40,79
Rota 12	43,81	43,75	45,25	44,93	44,70	44,84	44,60	44,65	45,23
Rota 13	45,72	45,67	47,78	47,39	47,15	47,30	47,05	47,10	47,61
Rota 14		19,87					18,20		

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

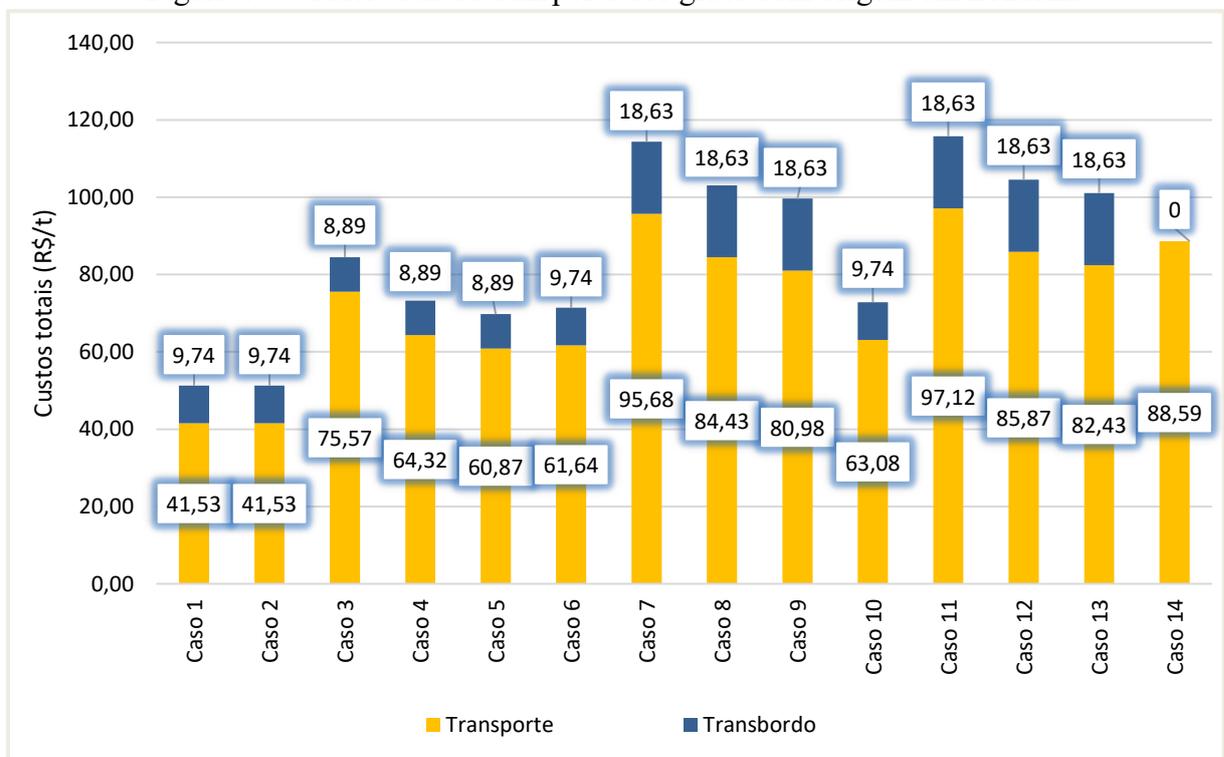
Destaca-se que, para ambas as rotas em que todo o trecho é percorrido por trens, o processo executado por transbordo (Rota 1) supera, em eficiência, o processo por rodotrilho

(Rota 2) apenas para o terminal Bunge LMG. Além disso, as Rotas 6 e 11 também se mostraram mais eficientes que o sistema de transbordo para todos os terminais.

5.2 CUSTO SIMULADO DE MOVIMENTAÇÃO

Os dados de saída agregados com os custos de transporte são informados nas figuras a seguir. O traçado das vias é uma característica fundamental na incidência de custos, visto que este, para a parcela correspondente ao transporte, é proporcional à distância percorrida. A Figura 49 representa custo total por tonelada movimentada de cada rota que parte de Londrina.

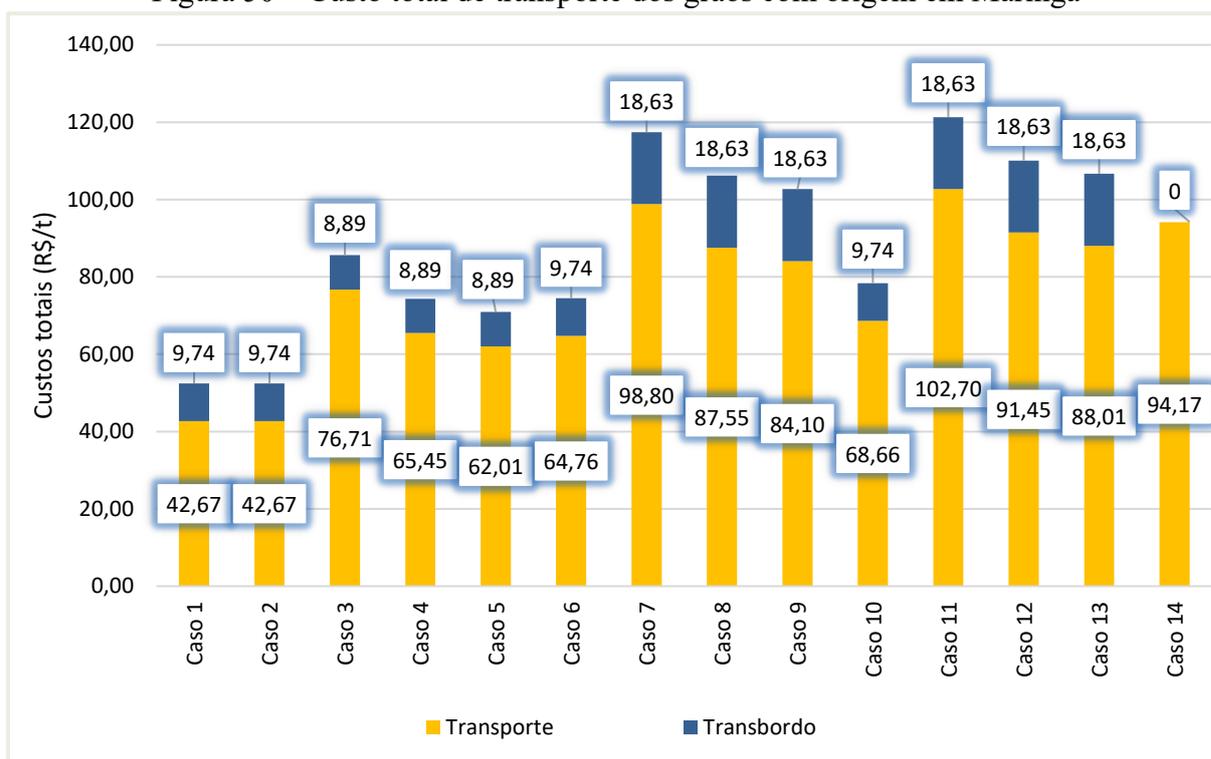
Figura 49 – Custo total de transporte dos grãos com origem em Londrina



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A Figura 50, da mesma maneira, indica os custos por tonelada movimentada com origem em Maringá. Ressalta-se que a movimentação inclui tanto os processos de carregamento como de transporte em si.

Figura 50 – Custo total de transporte dos grãos com origem em Maringá

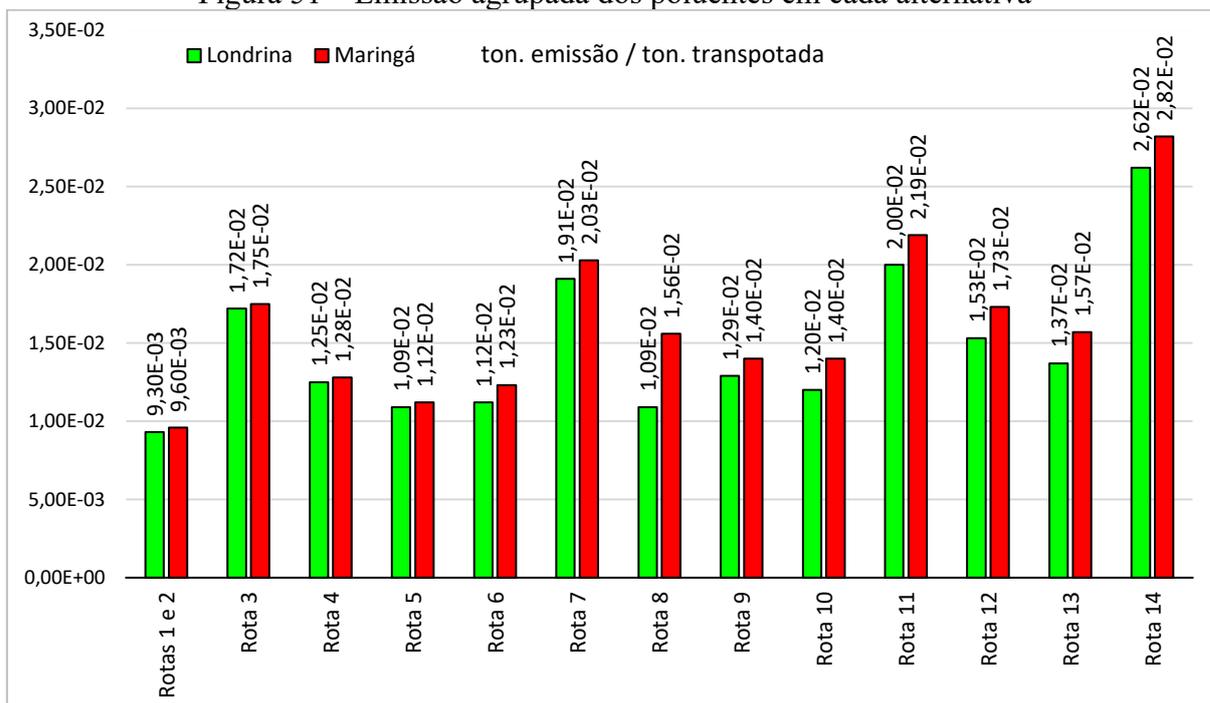


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

5.3 FATORES DE EMISSÃO DAS ATIVIDADES DE TRANSPORTE

Com o cálculo dos fatores de emissão, excluindo-se a parcela correspondente à produção dos grãos, foram estimadas as participações de cada tipo de poluente, sendo eles: CO₂, VOC (composto volátil orgânico), CO, NO_x, P.M 10 (partículas finas com diâmetro inferior a 10 µm), P.M 2,5 (partículas finas com diâmetro inferior a 2,5 µm), SO_x, CH₄, N₂O, BC (carbono preto) e POC (carbono orgânico primário). Os gráficos descrevendo a parcela de cada componente são detalhados no Apêndice D. Para o processo de tomada de decisão, adotou-se um fator de emissão equivalente, cujo agrupamento representa a emissão calculada em um único dado de saída, sendo expresso pelas barras do gráfico da Figura 51.

Figura 51 – Emissão agrupada dos poluentes em cada alternativa



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

5.4 CLASSIFICAÇÃO FINAL DAS ALTERNATIVAS

Em situações nas quais o tempo necessário é priorizado no processo de decisão em relação aos demais critérios, sendo a situação dos cenários I, II e III, a Rota 14 tende a ser a escolhida, dado que a movimentação por rodovias apresenta vantagem em relação às ferrovias quanto à rapidez no serviço de transporte.

Na medida em que o custo e as emissões superam o critério tempo, como nos cenários IV, V, VI, VII, VIII, IX e XII as opções cujas distâncias são predominantemente percorridas por trens se destacam como as de maior potencial de escolha, o que favorece as Rotas 1 (ferroviário por transbordo) e 2 (rodotrilho), cuja distância é integralmente percorrida por trens. Nos cenários X, XI e XIII, custo ou emissão são os fatores igualmente preponderantes em relação ao desempenho, respectivamente, o que também torna as Rotas 1 e 2 mais passíveis de serem escolhidas, havendo classificações altas também para a Rota 10. Devido ao fato de o modo ferroviário possuir dois critérios favoráveis contra um do rodoviário, os cenários em que o tempo é o segundo critério mais importante ou possui mesmo peso que algum outro critério favorecem a movimentação pelos rodotrilhos.

Deve-se ressaltar que a alternativa da Rota 11 se mostrou predominantemente como a de menor nível de serviço para a maioria dos cenários. Por fim, as Rotas 6 e 10 se apresentam

como os de maior potencial, para todos os cenários, em que parte do percurso é percorrido por trens e parte por caminhões.

A Tabela 19 exemplifica a classificação para os dados de saída da defuzzificação relacionados aos terminais adotados na pesquisa, os quais são determinados pela rota adotada e pela classificação de prioridade. As linhas representam as alternativas de rota, enquanto as colunas distinguem os cenários de preferência. A fim de facilitar a leitura, as classificações defuzzificadas são destacadas em cores diferentes, sendo mais favoráveis os índices com cores mais próximas ao verde e menos favoráveis as mais próximas ao vermelho.

Tabela 19 – Índices defuzzificados dos níveis de serviço

		1,00 a 2,00						2,01 a 3,00		3,01 a 4,00		4,01 a 5,00		5,01 a 6,00		6,01 a 7,00	
ATT		Cenário															
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII				
Rota 1	4,01	4,01	4,51	5,50	6,61	6,13	5,50	6,61	6,13	5,50	5,50	6,13	5,50				
Rota 2	4,15	4,15	4,59	5,58	6,58	6,19	5,58	6,58	6,19	5,58	5,58	6,19	5,58				
Rota 3	3,07	3,16	2,72	3,07	3,25	2,72	3,81	3,83	3,85	2,32	2,85	2,85	2,70				
Rota 4	2,70	3,66	2,24	3,39	4,56	3,66	4,34	4,97	3,19	3,19	4,34	3,39	3,19				
Rota 5	2,42	2,54	2,85	3,82	4,93	4,14	4,00	5,46	4,24	3,83	4,00	4,25	3,83				
Rota 6	3,65	3,88	3,65	4,56	5,02	4,88	4,79	5,02	4,84	4,85	4,85	4,77	4,85				
Rota 7	2,71	3,09	3,09	2,47	2,26	2,21	3,09	2,82	3,09	2,50	2,52	2,50	2,50				
Rota 8	2,97	3,67	3,78	2,97	3,69	3,78	4,80	4,80	4,83	2,59	3,83	3,83	3,83				
Rota 9	2,68	3,24	3,12	2,81	3,52	3,26	4,38	4,48	4,59	2,64	3,27	3,27	3,27				
Rota 10	4,17	4,19	4,33	4,83	4,94	5,11	4,84	4,94	5,16	5,28	5,28	4,74	5,28				
Rota 11	2,49	3,22	2,49	1,94	1,95	1,97	3,25	2,52	2,52	2,65	2,65	2,62	2,65				
Rota 12	2,93	3,46	3,26	2,93	3,33	3,26	4,40	4,26	4,40	2,77	3,29	3,29	3,30				
Rota 13	2,81	3,44	3,28	2,85	3,51	3,32	4,45	4,49	4,51	2,78	3,40	3,40	3,40				
Rota 14	5,79	5,00	5,79	4,53	2,81	3,55	3,00	2,00	2,81	4,53	3,80	2,81	3,80				
Ricolog		Cenário															
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII				
Rota 1	3,41	3,41	4,17	5,16	6,48	6,00	5,16	6,48	6,00	5,16	5,16	6,00	5,16				
Rota 2	4,19	4,19	4,61	5,60	6,58	6,21	5,60	6,58	6,21	5,60	5,60	6,21	5,60				
Rota 3	3,07	3,16	2,72	3,07	3,21	2,72	3,81	3,82	3,82	2,32	2,85	2,85	2,70				
Rota 4	2,76	3,66	2,24	3,42	4,55	3,73	4,34	4,97	3,19	3,19	4,34	3,42	3,19				
Rota 5	2,72	2,90	2,72	3,92	4,87	3,47	4,11	4,87	3,47	3,47	3,62	4,21	3,47				
Rota 6	3,66	3,89	3,65	4,56	5,02	4,89	4,80	5,02	4,84	4,85	4,85	4,77	4,85				
Rota 7	2,71	3,09	3,09	2,47	2,26	2,21	3,09	2,82	3,09	2,50	2,52	2,50	2,50				
Rota 8	2,97	3,68	3,79	2,97	3,69	3,79	4,80	4,80	4,83	2,59	3,83	3,83	3,83				
Rota 9	2,68	3,25	3,13	2,81	3,52	3,26	4,38	4,48	4,59	2,64	3,28	3,28	3,28				
Rota 10	4,18	4,19	4,34	4,83	4,93	5,12	4,85	4,93	5,16	5,30	5,30	4,74	5,30				
Rota 11	2,49	3,22	2,49	1,94	1,95	1,97	3,25	2,52	2,52	2,65	2,65	2,62	2,65				
Rota 12	2,93	3,46	3,26	2,93	3,33	3,26	4,40	4,27	4,40	2,77	3,29	3,29	3,30				
Rota 13	2,82	3,44	3,28	2,85	3,51	3,32	4,45	4,49	4,51	2,79	3,41	3,41	3,41				
Rota 14	5,79	5,00	5,79	4,53	2,81	3,55	3,00	2,00	2,81	4,53	3,80	2,81	3,80				
Seara LLD		Cenário															
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII				
Rota 1	3,25	3,25	4,10	5,09	6,43	5,99	5,09	6,43	5,99	5,09	5,09	5,99	5,09				
Rota 2	4,22	4,22	4,63	5,62	6,57	6,22	5,62	6,57	6,22	5,62	5,62	6,22	5,62				

Rota 3	3,07	3,16	2,72	3,07	3,23	2,72	3,81	3,83	3,83	2,32	2,85	2,85	2,70
Rota 4	2,85	3,66	2,24	3,47	4,54	3,83	4,34	4,98	3,19	3,19	4,34	3,47	3,19
Rota 5	3,26	3,49	3,26	4,22	4,98	4,22	4,43	4,98	4,22	4,20	4,41	4,26	4,20
Rota 6	3,52	3,73	3,52	4,48	5,07	4,80	4,72	5,08	4,74	4,72	4,72	4,74	4,72
Rota 7	2,71	3,09	3,09	2,47	2,24	2,22	3,09	2,84	3,09	2,50	2,52	2,50	2,50
Rota 8	2,97	3,59	3,70	2,97	3,65	3,70	4,74	4,71	4,77	2,59	3,74	3,74	3,74
Rota 9	2,52	3,08	2,91	2,74	3,53	3,10	4,29	4,47	4,65	2,49	3,07	3,07	3,07
Rota 10	4,10	4,12	4,21	4,79	4,95	5,06	4,81	4,95	5,08	5,17	5,17	4,72	5,17
Rota 11	2,49	3,21	2,49	1,94	1,95	1,97	3,24	2,53	2,53	2,64	2,64	2,61	2,64
Rota 12	2,93	3,46	3,20	2,93	3,39	3,20	4,40	4,32	4,40	2,72	3,23	3,23	3,23
Rota 13	2,66	3,26	3,08	2,79	3,52	3,21	4,35	4,48	4,57	2,63	3,22	3,22	3,22
Rota 14	5,79	5,00	5,79	4,53	2,81	3,55	3,00	2,00	2,81	4,53	3,80	2,81	3,80

Bunge LMG		Cenário												
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	
Rota 1	4,89	4,89	4,96	5,95	6,36	6,61	5,95	6,36	6,61	5,95	5,95	6,61	5,95	
Rota 2	4,86	4,86	4,94	5,94	6,38	6,59	5,94	6,38	6,59	5,94	5,94	6,59	5,94	
Rota 3	2,99	3,48	3,39	2,99	3,44	3,39	4,31	4,33	4,20	2,90	3,38	3,38	3,39	
Rota 4	3,19	3,55	2,79	3,86	4,65	4,30	4,45	4,99	3,74	3,74	4,45	3,87	3,74	
Rota 5	3,53	3,54	3,53	4,47	5,02	4,70	4,50	5,35	4,55	4,50	4,50	4,55	4,50	
Rota 6	4,84	4,85	4,84	5,01	5,01	5,01	5,08	5,01	5,27	4,78	4,78	5,01	4,78	
Rota 7	3,42	3,50	3,50	2,91	3,33	2,38	3,04	3,33	3,04	3,99	3,99	3,99	3,99	
Rota 8	3,26	3,98	3,96	3,00	3,53	4,00	4,68	4,47	4,28	3,38	4,02	3,53	4,02	
Rota 9	3,18	3,86	3,86	2,99	3,52	3,85	4,67	4,48	4,37	3,24	3,85	3,52	3,91	
Rota 10	4,79	5,02	4,79	4,81	5,04	4,81	5,04	5,04	5,06	4,78	5,01	5,04	4,78	
Rota 11	3,47	3,91	3,75	2,22	2,05	2,04	3,38	2,55	2,76	2,49	2,81	2,04	2,49	
Rota 12	3,21	3,89	3,85	3,02	3,55	3,87	4,51	4,45	4,26	3,30	3,88	3,55	3,88	
Rota 13	3,14	3,81	3,75	2,98	3,52	3,75	4,60	4,48	4,36	3,19	3,80	3,52	3,80	
Rota 14	5,73	5,00	5,73	4,43	2,75	3,44	3,00	1,99	2,76	4,43	3,74	2,76	3,74	

Cargill LMG		Cenário												
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	
Rota 1	3,00	3,00	4,00	5,00	6,68	5,99	5,00	6,68	5,99	5,00	5,00	5,99	5,00	
Rota 2	4,97	4,97	4,99	5,98	6,26	6,66	5,98	6,26	6,66	5,98	5,98	6,66	5,98	
Rota 3	3,09	3,72	3,63	3,01	3,54	3,63	4,45	4,46	4,21	3,11	3,66	3,54	3,66	
Rota 4	3,27	3,55	2,87	3,92	4,67	4,37	4,45	4,98	3,81	3,81	4,45	3,92	3,81	
Rota 5	3,53	3,54	3,53	4,47	5,02	4,71	4,50	5,31	4,55	4,50	4,50	4,55	4,50	
Rota 6	4,85	4,86	4,85	5,01	5,01	5,01	5,09	5,01	5,27	4,79	4,79	5,01	4,79	
Rota 7	3,52	3,61	3,61	2,96	3,20	2,06	3,10	3,20	2,06	2,28	2,28	1,87	2,28	
Rota 8	3,28	4,01	3,99	3,01	3,54	4,05	4,69	4,46	4,27	3,42	4,06	3,54	4,06	
Rota 9	3,19	3,88	3,88	2,99	3,52	3,88	4,68	4,48	4,36	3,26	3,88	3,52	3,93	
Rota 10	4,79	5,03	4,79	4,81	5,05	4,81	5,04	5,05	5,06	4,79	5,02	5,04	4,79	
Rota 11	3,51	3,93	3,81	2,24	2,04	2,07	3,40	2,55	2,77	2,53	2,86	2,07	2,53	
Rota 12	3,24	3,93	3,90	3,02	3,55	3,94	4,53	4,45	4,24	3,35	3,95	3,55	3,95	
Rota 13	3,16	3,83	3,78	2,99	3,53	3,78	4,61	4,47	4,35	3,22	3,82	3,53	3,82	
Rota 14	5,73	5,00	5,73	4,43	2,75	3,44	3,00	1,99	2,76	4,43	3,74	2,76	3,74	

Cocamar		Cenário												
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	
Rota 1	4,05	4,05	4,53	5,52	6,60	6,14	5,52	6,60	6,14	5,52	5,52	6,14	5,52	
Rota 2	4,96	4,96	4,98	5,98	6,29	6,65	5,98	6,29	6,65	5,98	5,98	6,65	5,98	
Rota 3	3,07	3,69	3,61	3,01	3,54	3,61	4,44	4,46	4,22	3,09	3,63	3,54	3,63	
Rota 4	3,26	3,55	2,86	3,91	4,67	4,37	4,45	4,98	3,81	3,80	4,45	3,92	3,80	
Rota 5	3,53	3,54	3,53	4,47	5,02	4,71	4,50	5,32	4,55	4,50	4,50	4,55	4,50	
Rota 6	4,84	4,86	4,84	5,01	5,01	5,01	5,09	5,01	5,27	4,78	4,78	5,01	4,78	
Rota 7	3,45	3,53	3,53	2,93	3,27	1,73	3,06	3,27	1,73	2,12	2,12	1,65	2,12	
Rota 8	3,27	3,99	3,97	3,00	3,54	4,02	4,69	4,46	4,28	3,40	4,04	3,54	4,04	
Rota 9	3,18	3,86	3,87	2,99	3,52	3,87	4,67	4,48	4,36	3,25	3,86	3,52	3,92	
Rota 10	4,79	5,02	4,79	4,81	5,04	4,81	5,04	5,04	5,06	4,78	5,02	5,04	4,78	
Rota 11	3,49	3,92	3,77	2,23	2,05	2,05	3,39	2,55	2,77	2,51	2,83	2,05	2,51	
Rota 12	3,22	3,90	3,87	3,02	3,55	3,90	4,51	4,45	4,25	3,32	3,91	3,55	3,91	

Rota 13	3,15	3,82	3,77	2,98	3,52	3,76	4,60	4,48	4,35	3,20	3,81	3,52	3,81
Rota 14	5,73	5,00	5,73	4,43	2,75	3,44	3,00	1,99	2,76	4,43	3,74	2,76	3,74
Cofco													
	Cenário												
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Rota 1	3,84	3,84	4,40	5,39	6,58	6,07	5,39	6,58	6,07	5,39	5,39	6,07	5,39
Rota 2	4,99	4,99	4,99	5,98	6,23	6,67	5,98	6,23	6,67	5,98	5,98	6,67	5,98
Rota 3	3,10	3,73	3,66	3,01	3,54	3,66	4,46	4,46	4,21	3,13	3,68	3,54	3,68
Rota 4	3,27	3,55	2,88	3,93	4,68	4,38	4,45	4,98	3,82	3,82	4,45	3,93	3,82
Rota 5	3,53	3,54	3,53	4,47	5,02	4,71	4,50	5,31	4,55	4,50	4,50	4,55	4,50
Rota 6	4,85	4,87	4,85	5,01	5,01	5,01	5,09	5,01	5,27	4,80	4,80	5,01	4,80
Rota 7	3,56	3,66	3,66	2,99	3,18	2,24	3,12	3,18	2,24	2,37	2,37	1,99	2,37
Rota 8	3,28	4,02	4,01	3,01	3,54	4,07	4,70	4,46	4,26	3,43	4,08	3,54	4,08
Rota 9	3,20	3,89	3,89	2,99	3,52	3,90	4,69	4,48	4,36	3,27	3,89	3,52	3,94
Rota 10	4,80	5,03	4,80	4,81	5,05	4,81	5,04	5,05	5,06	4,79	5,03	5,05	4,79
Rota 11	3,52	3,95	3,83	2,25	2,04	2,09	3,40	2,54	2,78	2,54	2,88	2,09	2,54
Rota 12	3,25	3,95	3,92	3,03	3,56	3,97	4,53	4,44	4,23	3,37	3,98	3,56	3,98
Rota 13	3,17	3,84	3,80	2,99	3,53	3,79	4,61	4,47	4,34	3,23	3,84	3,53	3,84
Rota 14	5,73	5,00	5,73	4,43	2,75	3,44	3,00	1,99	2,76	4,43	3,74	2,76	3,74
CPA													
	Cenário												
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Rota 1	4,12	4,12	4,57	5,56	6,59	6,17	5,56	6,59	6,17	5,56	5,56	6,17	5,56
Rota 2	5,02	5,02	5,02	5,99	6,35	6,35	5,99	6,35	6,35	5,99	5,99	6,35	5,99
Rota 3	3,03	3,65	3,55	3,00	3,53	3,55	4,42	4,47	4,24	3,04	3,58	3,53	3,58
Rota 4	3,27	3,55	2,87	3,92	4,67	4,37	4,45	4,98	3,82	3,81	4,45	3,92	3,81
Rota 5	3,53	3,54	3,53	4,47	5,02	4,71	4,50	5,31	4,55	4,50	4,50	4,55	4,50
Rota 6	4,85	4,86	4,85	5,01	5,01	5,01	5,09	5,01	5,27	4,79	4,79	5,01	4,79
Rota 7	3,53	3,62	3,62	2,97	3,19	2,12	3,10	3,19	2,12	2,31	2,31	1,91	2,31
Rota 8	3,28	4,01	4,00	3,01	3,54	4,05	4,70	4,46	4,27	3,42	4,07	3,54	4,07
Rota 9	3,19	3,88	3,88	2,99	3,52	3,89	4,68	4,48	4,36	3,27	3,88	3,52	3,94
Rota 10	4,80	5,03	4,80	4,81	5,05	4,81	5,04	5,05	5,06	4,79	5,03	5,05	4,79
Rota 11	3,52	3,94	3,82	2,24	2,04	2,08	3,40	2,54	2,78	2,54	2,87	2,08	2,54
Rota 12	3,24	3,94	3,91	3,03	3,55	3,96	4,53	4,45	4,23	3,36	3,96	3,55	3,96
Rota 13	3,16	3,84	3,79	2,99	3,53	3,79	4,61	4,47	4,35	3,23	3,83	3,53	3,83
Rota 14	5,73	5,00	5,73	4,43	2,75	3,44	3,00	1,99	2,76	4,43	3,74	2,76	3,74
Seara													
	Cenário												
LMA													
Alternativa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Rota 1	4,59	4,59	4,83	5,82	6,48	6,43	5,82	6,48	6,43	5,82	5,82	6,43	5,82
Rota 2	5,05	5,05	5,05	5,99	6,40	6,40	5,99	6,40	6,40	5,99	5,99	6,40	5,99
Rota 3	3,10	3,73	3,66	3,01	3,54	3,66	4,46	4,46	4,21	3,13	3,68	3,54	3,68
Rota 4	3,34	3,55	2,95	3,97	4,70	4,44	4,45	4,98	3,89	3,88	4,45	3,97	3,88
Rota 5	3,53	3,54	3,53	4,47	5,03	4,72	4,50	5,24	4,55	4,50	4,50	4,55	4,50
Rota 6	4,82	4,84	4,82	5,00	5,01	5,00	5,08	5,01	5,27	4,75	4,75	5,00	4,75
Rota 7	3,37	3,44	3,44	2,91	3,17	2,38	3,04	3,17	3,04	3,79	3,79	3,79	3,79
Rota 8	3,22	3,92	3,89	3,00	3,53	3,91	4,65	4,47	4,31	3,32	3,94	3,53	3,94
Rota 9	3,15	3,82	3,82	2,98	3,52	3,81	4,65	4,48	4,38	3,21	3,81	3,52	3,87
Rota 10	4,78	5,01	4,78	4,80	5,04	4,80	5,04	5,04	5,06	4,77	5,00	5,04	4,77
Rota 11	3,47	3,90	3,74	2,22	2,05	2,03	3,38	2,55	2,76	2,49	2,80	2,03	2,49
Rota 12	3,17	3,84	3,78	3,02	3,54	3,79	4,48	4,46	4,28	3,24	3,81	3,54	3,81
Rota 13	3,13	3,79	3,73	2,98	3,52	3,72	4,59	4,48	4,37	3,17	3,77	3,52	3,77
Rota 14	5,73	5,00	5,73	4,43	2,75	3,44	3,00	1,99	2,76	4,43	3,74	2,76	3,74

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A partir dos dados de saída, são observados valores de classificação superiores dos níveis de serviço para alternativas que envolvem o transporte por ferrovia na maior parte dos cenários, dado que esta modalidade é mais benéfica em relação a custos e emissão. Somente

quando o desempenho operacional é priorizado (Cenários I, II e III) ocorre de a alternativa rodoviária individual (Rota 14), havendo ainda algumas exceções em relação ao Cenário II, em que a Rota 2 se mostra mais vantajosa, mesmo que com pouca diferença.

O *framework* sustenta as observações iniciais a respeito do nível de serviço esperado para cada cenário, demonstrando como a classificação de cada alternativa pode variar em função da ordem de prioridade dos indicadores. Como principais características da estruturação desse recurso de apoio à decisão, cita-se: seleção dos indicadores, precisão quanto aos dados simulados e consistência satisfatória na concepção das regras de inferência para a classificação final.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Uma característica de grande impacto observada na análise dos resultados é o traçado da via. Devido à presença de traçados antieconômicos em alguns trechos da linha ferroviária considerada, a distância individual por trens se torna consideravelmente maior que a distância individual por caminhões para ambas as origens. Este fator, além do desempenho operacional, também afeta os custos de transporte e os fatores de emissão, visto que os mesmos são proporcionais à distância percorrida. Desta forma, um traçado ferroviário mais eficiente reduziria ainda mais os custos e emissões em relação ao transporte rodoviário, além de aumentar, em relação ao mesmo, sua competitividade operacional.

No caso dos custos, o fator de economia de escala é preponderante, uma vez que, para longas distâncias, o frete se torna proporcionalmente menor, por tonelada transportada, que para curtas distâncias. Com isso, as alternativas em que apenas os trechos iniciais e finais são percorridos por rodovias, complementadas por ferrovias no tronco principal, se mostram menos onerosas do que o transporte rodoviário individual.

O framework atende satisfatoriamente aos parâmetros definidos, como os dados de entrada, regras de inferência e resultados. Ao mesmo tempo, apresenta flexibilidade em relação a modelagens e alterações para que sejam avaliados outros indicadores, além de modificações nas regras de interpretação e associação dos mesmos. Outro ponto positivo do framework é a possibilidade de receber como parâmetros outras modalidades, bem como ser adaptado para serviços de transporte de passageiros, o que significa maior abrangência de sua aplicabilidade.

De maneira geral, a proposta desenvolvida se mostra consistente com o objetivo principal de estabelecer um arcabouço que permite avaliar alternativas com diferentes modalidades para o transporte de grãos agrícolas, incluindo a combinação rodoferroviária.

Quanto aos objetivos específicos, são contempladas todas as diretrizes definidas, são elas: a determinação do desempenho operacional com apoio de ferramentas de simulação de eventos discretos; levantamento de indicadores econômicos e ambientais para o serviço avaliado; desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão baseado em lógica difusa e demonstrações de como o nível de classificação dos serviços de transporte. Com isso, estabelece-se um ponto de partida para pesquisas relacionadas a este tema.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listadas algumas sugestões para pesquisas futuras que possam complementar o *framework* quanto a sua abrangência de fatores e recursos para avaliação:

- Avaliar outros indicadores que venham a ser relevantes para a modalidade a ser escolhida, como a segurança, confiabilidade, disponibilidade, capacidade, entre outros parâmetros, a partir de ferramentas específicas.
- Verificar o melhor arranjo para montagem e desmontagem de um conjunto rodotrilho considerando composições em locais distintos do trajeto que, em determinada posição, se unirão para composição final do trem (um exemplo seria sequenciamento parcial dos semirreboques em Londrina, enquanto outra parte pode ser sequenciada em Apucarana ou Mauá da Serra simultaneamente ao trajeto da composição iniciada em Londrina).
- Avaliar o desempenho de outras malhas ferroviárias frente ao transporte rodoviário para as respectivas características de atendimento das mesmas.
- Configurar o *framework* para investigação do nível de serviço no transporte de passageiros.
- Incluir no modelo de simulação eventuais impactos de poluição durante as operações de carregamento dos vagões ou montagem dos rodotrilhos.
- Para situações em que a carga também possa ser movimentada pelo modo hidroviário, avaliar o desempenho geral deste transporte quanto aos critérios apontados (ou mais).
- Além da caracterização dos cenários propostos, incorporar à estrutura um método de quantificar a priorização a cada indicador avaliado, a exemplo de um modelo multicritério de apoio à tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR ISO 37101: Desenvolvimento sustentável de comunidades — Sistema de gestão para desenvolvimento sustentável — Requisitos com orientações para uso**Rio de Janeiro, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Ferrovias - Declaração de rede**. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/ferrovias>>. Acesso em: 7 mar. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Anuário do setor ferroviário**. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>>. Acesso em: 18 dez. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Declaração de rede**. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede>>. Acesso em: 22 dez. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Declaração de rede**. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede-2022>>. Acesso em: 20 out. 2022.
- ALVARENGA, H. **Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos**. Disponível em: <<https://www.ilos.com.br/web/matriz-de-transportes-do-brasil-a-espera-dos-investimentos/>>. Acesso em: 31 ago. 2021.
- ALVES, A. C. B.; MENEZES, M. A. F. **Introdução à pesquisa operacional**. 1. ed. Goiânia: PUC Goiás, 2010.
- ARIAS, J. A. C. **Mitigação de falhas e atrasos em roteiros milk-run operando em cadeias de suprimentos do tipo OEM**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- ARIF, F.; BAYRAKTAR, M. E. **Theoretical framework for transportation infrastructure asset management based on review of best practices**. Construction Research Congress. **Anais...**West Lafayette: American Society of Civil Engineers, 2012
- ASSEMBLEIA GERAL DAS NAÇÕES UNIDAS. **UNCTAD Framework for Sustainable Freight Transport**UNCTAD Framework for Sustainable Freight Transport. Nova Iorque/Genebra: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.sft-framework.org/>>, 2017.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. **Do campo ao porto**. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/releases/do-campo-ao-porto/>>. Acesso em: 28 ago. 2021.
- AYRES, G. D. J.; NASCIMENTO, J. W. B.; FRANCISCO, P. R. M. **Vazão mássica de descarga em silo modelo reduzido**. Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia. **Anais...**Virtual: CONFEA, 2021. Disponível em: <<https://www.confesa.org.br/eventos/contecc>>
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimento/logístico empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.
- BANISTER, D. Policy on sustainable transport in England: the case of high speed 2. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, v. 18, n. 3, p. 262–275, 2018.
- BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA FILHO, J. V. Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, n. 3, p. 703–738, 2008.
- BATEMAN, R. E. et al. **Simulação de Sistemas**. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- BHAT, U. N. **An introduction to queueing theory: modeling and analysis in applications**. 2. ed. Nova Iorque: Birkhauser, 2015.
- BIGAZZI, A. Comparison of marginal and average emission factors for passenger transportation modes. **Applied Energy**, v. 242, p. 1460–1466, 2019.
- BONK, D.; KOWALSKA, S. Modal choice preferences in inland container transport

- in Poland. **European Research Studies Journal**, v. 23, n. Special Issue 2, p. 99–109, 2020.
- BOYSEN, N. et al. A survey on container processing in railway yards. **Transportation Science**, v. 47, n. 3, p. 312–329, 2013.
- BRAGA, E. **Rodoviário perde participação, mas matriz de carga ainda é desequilibrada**. Disponível em: <<https://www.ilos.com.br/web/rodoviario-perde-participacao-mas-matriz-de-carga-ainda-e-desequilibrada/>>, 2019. Acesso em: 13 out. 2021.
- BRAILSFORD, S.; CHURILOV, L.; DANGERFIELD, B. **Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2014.
- BRUCE, P.; BRUCE, A. **Estatística prática para cientistas de dados**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.
- BRUNS, R. **Adequabilidade de Terminais Ferroviários para o Sistema Roadrailer**. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2002.
- BUTUNOV, D. et al. Methods of improving technological practices of processing of combined trains at intermediate stations. **The scientific heritage**, v. 1, n. 67, p. 39–43, 2021.
- CAMPOS NETO, C. A. S.; PAULA, J. M. P.; SOUZA, F. H. **Rodovias brasileiras: políticas públicas, investimentos, concessões e tarifas de pedágio**. Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011.
- CARDOSO, A. L. et al. Características de fluxo e vazão de soja em silos prismáticos com tremonhas retangulares cuneiformes. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28886–28903, 2020.
- CHOOSAKUN, A.; YEOM, C. Developing evaluation framework for intelligent transport system on public transportation in Bangkok metropolitan regions using fuzzy AHP. **Infrastructures**, v. 6, n. 12, p. 182–201, 2021.
- COLAVITE, A. S.; KONISHI, F. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. XII SEGeT. Anais...Resende, RJ: AEDB, 2015
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Portal de informações agropecuárias**. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/armazenagem.html>>, 2022. Acesso em: 19 mar. 2022.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **O sistema ferroviário brasileiro**. Brasília, 2013.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Ferrovias 2015: 656.2.025.4(81)**. Brasília. Disponível em: <<https://cnt.org.br/pesquisa-cnt-ferrovias>>, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2019: 23**. Brasília. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>, 2019.
- CORREA, V. H. C.; RAMOS, P. A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: Situação e perspectivas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 2, p. 447–472, 2010.
- CRISTEA, A. et al. Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 65, n. 1, p. 153–173, 2013.
- DAI, Q.; YANG, J.; LI, D. Modeling a three-mode hybrid port-hinterland freight intermodal distribution network with environmental consideration: The case of the Yangtze River economic belt in China. **Sustainability**, v. 10, n. 9, p. 1–26, 2018.
- DAS, R. D.; WINTER, S. A fuzzy logic based transport mode detection framework in urban environment. **Journal of intelligent transportation systems**, v. 22, n. 6, p. 478–489, 2018.

DE RUS, G. et al. Cost-benefit analysis of transport projects: Theoretical framework and practical rules. **Transport Policy**, v. 123, n. October 2021, p. 25–39, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Quadro de fabricantes de veículos**. Brasília, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Histórico**. Disponível em: <<https://189.9.128.64/ferrovias/historico/historico>>. Acesso em: 15 nov. 2019a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ISF-227: Estudos operacionais**. Brasília. DNIT, 2015b.

DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND REGIONAL DEVELOPMENT. **Why short-haul intermodal rail services succeed**. Camberra: [s.n.].

DZEMYDIENĖ, D.; BURINSKIENĖ, A.; MILIAUSKAS, A. Integration of multi-criteria decision support with infrastructure of smart services for sustainable multi-modal transportation of freights. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 1–26, 2021.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. **Transporte inter-regional de carga no Brasil - Panorama 2015**. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/transporte-inter-regional-de-carga-no-brasil-panorama-2015>>, 2015. Acesso em: 26 jan. 2020.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. **Relatório Executivo do Plano Nacional de Logística - PNL 2025**. Brasília. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>>, 2018.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. **Metodologia de custos de transporte**. Brasília. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/manual-metodologia-de-custos-de-transporte>>, 2020.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. **Simulador de Custo de Transporte**. Disponível em: <<https://ontl.epl.gov.br/aplicacoes/simulador-de-custo-de-transporte/>>. Acesso em: 24 jun. 2022a.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. **Simulador de Custo de Transbordo**. Disponível em: <<https://ontl.epl.gov.br/aplicacoes/simulador-de-custo-de-transbordo/>>. Acesso em: 24 jun. 2022b.

FEO, M.; ESPINO, R.; GARCÍA, L. An stated preference analysis of Spanish freight forwarders modal choice on the south-west Europe Motorway of the Sea. **Transport Policy**, v. 18, n. 1, p. 60–67, 2011.

FERREIRA, L.; SIGUT, J. Modelling Intermodal Freight Terminal Operations. **Road and Transport Research Journal**, v. 4, n. 4, p. 4–16, 1995.

FLORA, M.; EWBANK, H.; VIDAL VIEIRA, J. G. Framework for urban freight transport analysis in medium-sized cities. **Urbe**, v. 11, p. 1–12, 2019.

GABRIELE, P. D. et al. Comparação internacional da eficiência ambiental dos modos de transporte rodoviário e ferroviário. **Journal of Transport Literature**, v. 7, n. 1, p. 212–229, 2013.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994.

GOULART, V. D. G.; CAMPOS, A. **Logística de Transporte - Gestão Estratégica no Transporte de Cargas**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2018.

HAVENGA, J. H. et al. Sustainable freight transport in South Africa: domestic intermodal solutions. **Journal of Transport and Supply Chain Management**, v. 5, n. 1, p. 149–169, 2011.

HE, Z.; HAASIS, H.-D. A theoretical research framework of future sustainable urban freight transport for smart cities. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 1–28, 2020.

HEINOLD, A.; MEISEL, F. Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. **Transportation Research Part**

D: Transport and Environment, v. 65, p. 421–437, 2018.

HIJJAR, M. F. **Cenário da infraestrutura rodoviária no Brasil**. Disponível em: <<https://www.ilos.com.br/web/cenario-da-infraestrutura-rodoviaria-no-brasil/>>, 2011. Acesso em: 26 jan. 2020.

HOEL, L. A.; GARBER, N. J.; SADEK, A. W. **Transportation Infrastructure Engeneering: A Multimodal Integration**. SI ed. Stamford: Global Engeneering Program, 2010.

IQBAL, K.; KHAN, M. A.; FATIMA, A. Intelligent transportation system (ITS) for smart-cities using Mamdani fuzzy inference system. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 9, n. 2, p. 94–105, 2018.

ISLAM, D. M. Z. Prospects for European sustainable rail freight transport during economic austerity. **Benchmarking: An International Journal**, v. 25, n. 8, p. 2783–2805, 2018.

JEON, C. M.; AMEKUDZI, A. Addressing sustainability in transportation systems: definitions, indicators, and metrics. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 0342, n. March 2005, 2014.

KIM, K. H.; GÜNTHER, H.-O. **Container Terminals and Cargo Systems**. 1. ed. Berlin: Springer, 2007.

KIRSCHSTEIN, T.; MEISEL, F. GHG-emission models for assessing the eco-friendliness of road and rail freight transports. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 73, p. 13–33, 2015.

KOLB, A.; WACKER, M. Calculation of energy consumption and pollutant emissions on freight transport routes. **Science of the Total Environment**, v. 169, n. 1–3, p. 283–288, 1995.

KOOHATHONGSUMRIT, N.; MEETHOM, W. A fuzzy decision-making framework for route selection in multimodal transportation networks. **Engineering management journal**, v. 34, n. 4, p. 689–704, 2022.

KOPP, A.; BLOCK, R. I.; IIMI, A. **Turning the Right Corner: Ensuring Development through a Low-Carbon Transport Sector**. 1. ed. Washington D.C.: The World Bank, 2013.

KOPYTOV, E.; ABRAMOV, D. Multiple-criteria analysis and choice of transportation alternatives in multimodal freight transport system. **Transport and Telecommunication**, v. 13, n. 2, p. 148–158, 2012.

KUNADHAMRAKS, P.; HANAOKA, S. Evaluating the logistics performance of intermodal transportation in Thailand. **Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics**, v. 20, n. 3, p. 323–342, 2008.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LANG, A. E. **As Ferrovias No Brasil E Avaliação Econômica De Projetos : Uma Aplicação Em Projetos**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2007.

LI, F.; KLETTE, R. **Euclidean shortest paths: exact or approximate algorithms**. 1. ed. Londres: Springer, 2011.

LIBA, C. J. **Considerations for roadrailers and their future applications**. Canadian Transportation Research Forum. **Anais...**Montreal: 1982

LIU, J. et al. An overview of conceptual model for simulation and its validation. **Procedia Engineering**, v. 24, p. 152–158, 2011.

LOBO, A. **Transporte de cargas e a encruzilhada do Brasil para o futuro**. Disponível em: <<https://www.ilos.com.br/web/transporte-de-cargas-e-a-encruzilhada-do-brasil-para-o-futuro/>>, 2017. Acesso em: 26 jan. 2020.

LOBO, E.; VALENTE, A. M. Brazilian cargo road transportation infrastructure:

globalization, logistics, policy and growth. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 36, n. 3, p. 381–387, 2014.

LOWE, D. **Intermodal Freight Transport**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2005.

MACHARIS, C.; MEERS, D.; VAN LIER, T. Modal choice in freight transport: Combining multi-criteria decision analysis and geographic information systems. **International Journal of Multicriteria Decision Making**, v. 5, n. 4, p. 355–371, 2015.

MARCHETTI, D. S.; FERREIRA, T. T. Situação atual e perspectivas da infraestrutura de transportes e da logística no Brasil. In: **BNDES 60 anos: perspectivas setoriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 232–270.

MATTILA, T.; ANTIKAINEN, R. Backcasting sustainable freight transport systems for Europe in 2050. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1241–1248, 2011.

MCCOOL, J. I. **Using the weibull distribution**. 1. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

MILLER, H. J.; WITLOX, F.; TRIBBY, C. P. Developing context-sensitive livability indicators for transportation planning: A measurement framework. **Journal of Transport Geography**, v. 26, p. 51–64, 2013.

MINÁRIK, M. Sustainable Transport of Goods Using Combined Transport Solutions: The Case of EU. **Naše gospodarstvo/Our economy**, v. 67, n. 2, p. 29–39, 2021.

MINDUR, L. Concept of Freight Road-Railing Transport in Bimodal. **Logistics and Transport**, v. 2, n. 30, p. 67–72, 2016.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Dados de Transportes**. Disponível em: <<http://www.infraestrutura.gov.br/grandes-numeros/88-dados-de-transportes.html>>1 2017. Acesso em: 22 mar. 2020.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Plano Nacional de Logística 2035**. Brasília: Empresa de Planejamento e Logística, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Setor de transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/6191-setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactos-na-qualidade-do-ar>>, 2010. Acesso em: 17 jul. 2020.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT - Relatório Final**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>>. 2012.

MONIOS, J.; BERGQVIST, R. **Intermodal Freight Transport and Logistics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

MORASH, E. A.; CALANTONE, R. J. Rail selection, service quality, and innovation'. **Journal of the Transportation Research Forum**, v. 32, n. 1, p. 205–215, 1991.

MOREIRA, M. A. L.; FREITAS JUNIOR, M. F.; TOLOI, R. C. O transporte rodoviário no Brasil e suas deficiências. **Refas - Revista Fatec Zona Sul**, v. 4, n. 4, p. 1–13, 2018.

NAZÁRIO, P. **Intermodalidade: importância para a logística e estágio atual no Brasil**. Disponível em: <<https://www.ilos.com.br/web/intermodalidade-importancia-para-a-logistica-e-estagio-atual-no-brasil/>>. Acesso em: 3 mar. 2020.

OL'SHANSKII, A. M. Methodology of designing adaptive supervisory control system for railway freight terminals. **Automation and Remote Control**, v. 73, n. 3, p. 575–581, 2012.

ONETTA, J. DE S.; RUFFATO, S. **Propriedades Físicas de Grãos de Soja em Diferentes Safras**. VII Conferência Brasileira de Pós-Colheita. **Anais...**Londrina: Abrapos, 2018. Disponível em: <https://eventos.abrapos.org.br/anais/paperfile/910_20181103_02-45-08_837.pdf>

ORJI, I. J. et al. Evaluating challenges to implementing eco-innovation for freight logistics sustainability in Nigeria. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 129, p. 288–305, 2019.

ORTEGA, L. C.; OTERO, L. D.; OTERO, C. Fuzzy inference system framework to prioritize the deployment of resources in low visibility traffic conditions. **Institute of Electronical and Electronics Engineers**, v. 7, p. 174368–174379, 2019.

ÖZKIR, V.; DEMIREL, T. A fuzzy assessment framework to select among transportation investment projects in Turkey. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 74–80, 2012.

PAULA, D. A. 154 Anos de Ferrovias no Brasil: Para Onde Caminha esse Trem? **História Revista**, v. 13, n. 1, p. 45–69, 2008.

PEREIRA, I. C. F.; SILVA, S. S.; SANTOS, R. **Análise de uma operação intermodal com a utilização do rodotrilho**. Logística 4.0 & a sociedade do conhecimento. **Anais...Guarulhos: FatecLOG**, 2019

PEREIRA NETO, W. DE A.; WIDMER, J. A. Compatibilidade das faixas de mudança de velocidade para o tráfego de veículos pesados em rodovias brasileiras. **Transportes**, v. 16, n. 2, p. 32–40, 2008.

PINCHASIK, D. R. et al. Crossing borders and expanding modal shift measures : effects on mode choice and emissions from freight transport in the Nordics. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1–23, 2020.

PINHEIRO, J. I. D. et al. **Probabilidade e estatística: Quantificando a incerteza**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

POPPER, R. How are foresight methods selected ? **Foresight**, v. 10, n. 6, p. 62–89, 2008.

POWELL, W. B.; CARVALHO, T. A. Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations. **Transportation Science**, v. 32, n. 2, p. 110–126, 1998.

PRADO, D. S. **Teoria das filas e da simulação**. 2. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços LTDA, 2004.

PRADO, D. S. **Usando o ARENA em simulação**. 5. ed. Nova Lima: Falconi, 2014. v. 3

PRENTICE, B. E.; HEMMES, M. Containerization of grain: emergence of a new supply chain market. **Journal of Transportation Technologies**, v. 05, n. 02, p. 55–68, 2015.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway management and engineering**. 4. ed. Burlington: Ashgate, 2014.

PSARAFTIS, H. N.; KONTOVAS, C. A. Transportation Emissions: Some Basics. In: **Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions**. 1. ed. [s.l.] Springer, 2016. p. 41–79.

PUNAKIVI, M.; HINKKA, V. Selection criteria of transportation mode: a case study in four finnish industry sectors. **Transport Reviews**, v. 26, n. 2, p. 207–219, 2006.

PYRGIDIS, C. N. **Railway Transportation Systems**. ed. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

REIS, F. P. et al. **Avaliação da influência da sobrecarga dos veículos pesados na rodovia BR-290/RS**. XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. **Anais...Recife: ANPET**, 2017

ROCHA, J. G. C.; VANALLE, R. M. **Caminhos para a modicidade tarifária nas rodovias pedagiadas no Brasil**Transportes, 2004.

ROSA, R. A. **Modelo de simulação aplicado à avaliação da capacidade dos recursos de um terminal ferroviário**. XLI SBPO. **Anais...Porto Seguro**: 2009

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

RUMO LOGÍSTICA. **Procedimento de manobra ferroviária em terminais**. Brasil, Rumo, 2016.

RUMO LOGÍSTICA. **Setor ferroviário de cargas 2040**. Paraná, Disponível em:

- <https://rumolog.com/wp-content/uploads/2020/08/RUMO_mapa-1.pdf>, 2019.
- SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 1, p. 25–43, 2009.
- SALVATORE, C. et al. Methodological approach to study the dynamics of production networks: discrete-event simulation modelling. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 16, n. 2, p. 211–223, 2013.
- SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. DEL P. B. **Metodologia de pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.
- SANTOS, J. A.; PARRA-FILHO, D. **Metodologia científica**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- SANTOS, Y. R. P.; BRITO, J. J. C. P. DE A.; SILVA, M. DO S. S. Avaliação dos elementos de projeto e do estado de conservação do trecho de uma estrada vicinal do Estado de Pernambuco, Brasil Evaluation. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. 1–16, 2020.
- SHORTLE, J. F. et al. **Fundamentals of queueing theory**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- SILVEIRA, M. R. Transporte e Logística: as Ferrovias no Brasil. **Geosul**, v. 17, n. 34, p. 63–86, 2002.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- SKRÚCANÝ, T. et al. Environmental comparison of different transport mode. **Naše more**, v. 65, n. 4 Special issue, p. 192–196, 2018.
- SOLIANI, R. D. Brazilian road freight transportation sector: the challenge of sustainability. **Journal of Traffic and Logistics Engineering**, v. 9, n. 2, p. 32–41, 2021.
- SOUTHERN RAILWAY. **Southern Railway conducts trial run of Road Railer Unit**. Disponível em: <https://sr.indianrailways.gov.in/view_detail.jsp?lang=0&id=0,4,268&dcd=7109&did=1537444598132ED8D73EE8FF93E3B3D2B15BE6EE42B63>, 2019. Acesso em: 13 set. 2021.
- SOUTHWORTH, F. Freight transportation planning: models and methods. In: **Transportation systems planning: methods and applications**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. p. 427.
- STANK, T. P.; GOLDSBY, T. J. A framework for transportation decision making in an integrated supply chain. **Supply Chain Management**, v. 5, n. 2, p. 71–78, 2000.
- STEADIESEIFI, M. et al. Multimodal freight transportation planning: A literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 1, p. 1–15, 2014.
- TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, v. 52, n. 4, p. 802–815, 2012.
- THOMOPOULOS, N. T. **Essentials of Monte Carlo Simulation**. 1. ed. Nova Iorque: Springer, 2013.
- THOMOPOULOS, N. T. **Statistical distributions**. 1. ed. Burr Ridge: Springer, 2017.
- TORRES, O. et al. Impacto da implantação do custo do pedágio na BR-163 em relação ao transporte de soja. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 3, p. 533–550, 2017.
- TRANSPORT AND INFRASTRUCTURE COUNCIL. **Australian transport assessment and planning guidelines**. Camberra. Disponível em: <<http://atap.gov.au/>>, 2022.
- VITINS, J. **Reducing energy costs with electric, diesel and dual-powered locomotives**. ASME Joint Rail Conference. **Anais...**Pueblo: JRC2009-63019, 2009
- WANG, L. Framework for Evaluating Sustainability of Transport System in Megalopolis and its Application. **IERI Procedia**, v. 9, p. 110–116, 2014.
- WANG, Y. Fuzzy Semantic Models of Fuzzy Concepts in Fuzzy Systems.

International Journal of Fuzzy Systems and Advanced Applications, v. 9, p. 57–62, 2022.

WANG, Z.; CHEN, F.; FUJIYAMA, T. Carbon emission from urban passenger transportation in Beijing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 41, n. 3, p. 217–227, 2015.

WEE, B. VAN; JANSE, P.; BRINK, R. VAN DEN. Comparing energy use and environmental performance of land transport modes. **Transport Reviews**, v. 25, n. 1, p. 3–24, 2005.

WILLIAMS, S. B. et al. Grain size and grain depth restrict oxygen movement in leaky hermetic containers and contribute to protective effect. **Journal of Stored Products Research**, v. 69, p. 65–71, 2016.

WINEBRAKE, J. J. et al. Assessing energy, environmental, and economic tradeoffs in intermodal freight transportation. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 58, n. 8, p. 1004–1013, 2008.

WITASZEK, M.; WITASZEK, K. Comparison of Carbon Dioxide Emission for Different Modes of Transport. **Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport**, v. 88, p. 145–153, 2015.

WOXENIUS, J. Generic framework for transport network designs: Applications and treatment in intermodal freight transport literature. **Transport Reviews**, v. 27, n. 6, p. 733–749, 2007.

YAN, J.; LIU, J.; TSENG, F. M. An evaluation system based on the self-organizing system framework of smart cities: A case study of smart transportation systems in China. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 153, n. 1, p. 1–12, 2020.

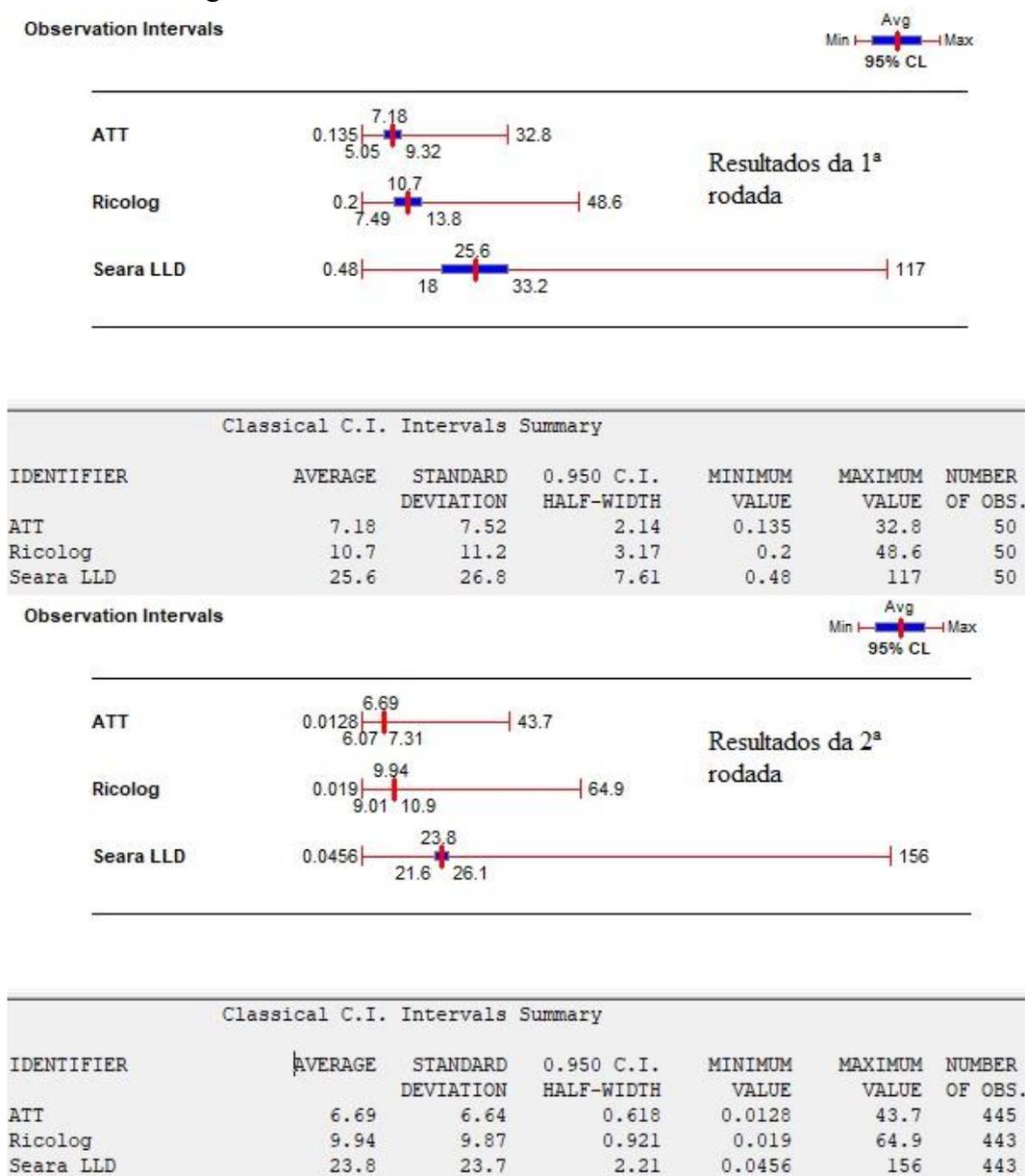
ZADEH, L. A. Fuzzy sets*. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de Pesquisa**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2011.

ZHANG, Z. et al. Multicriteria intermodal freight network optimal problem with heterogeneous preferences under belt and road initiative. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 24, p. 1–24, 2020.

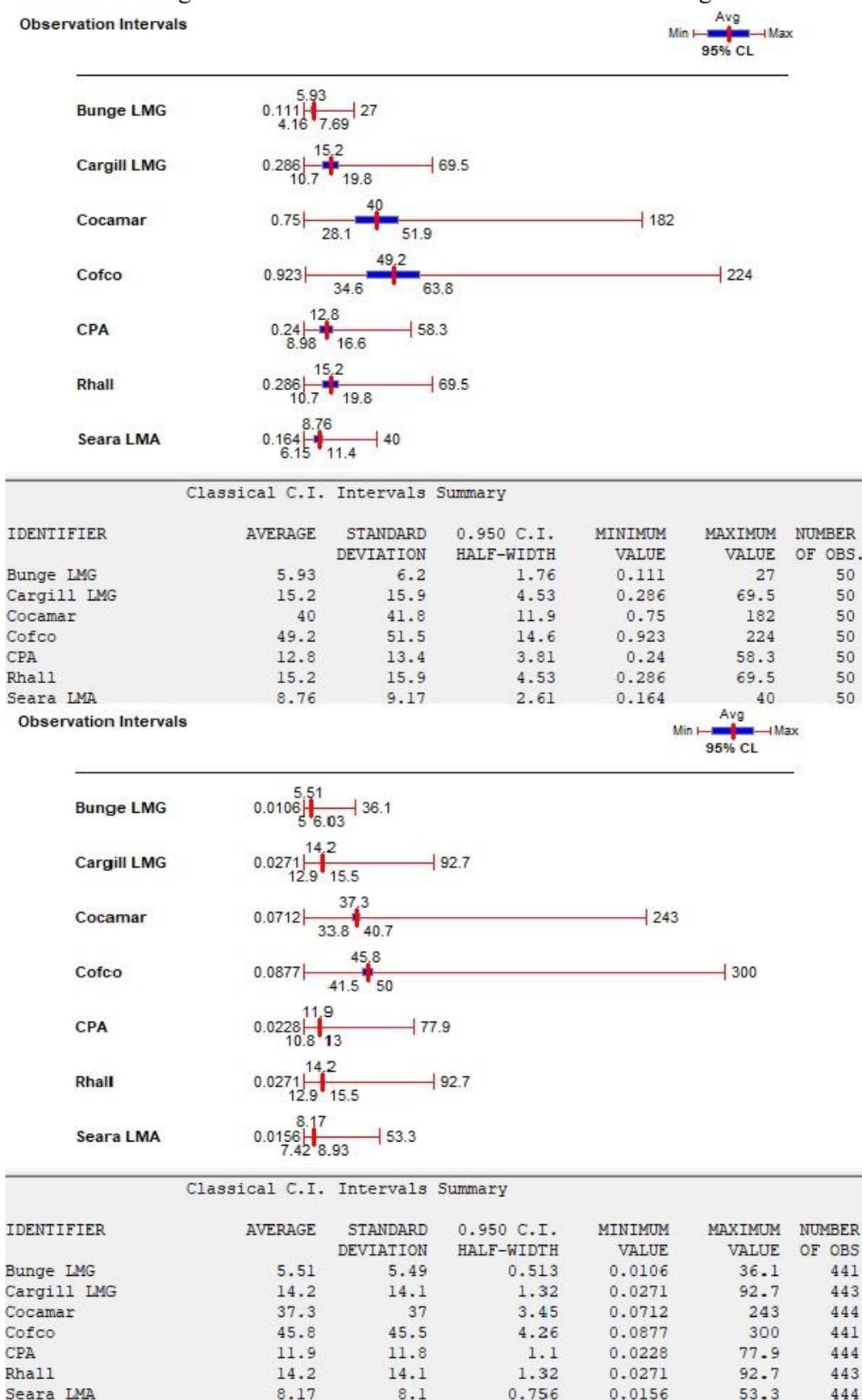
APÊNDICE A – DADOS DE SAÍDA DO MODELO DE SIMULAÇÃO DE TRANSBORDO (*OUTPUT ANALYZER*) ANTES E APÓS CORREÇÃO

Figura A.1 – Dados de saída dos terminais de Londrina



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

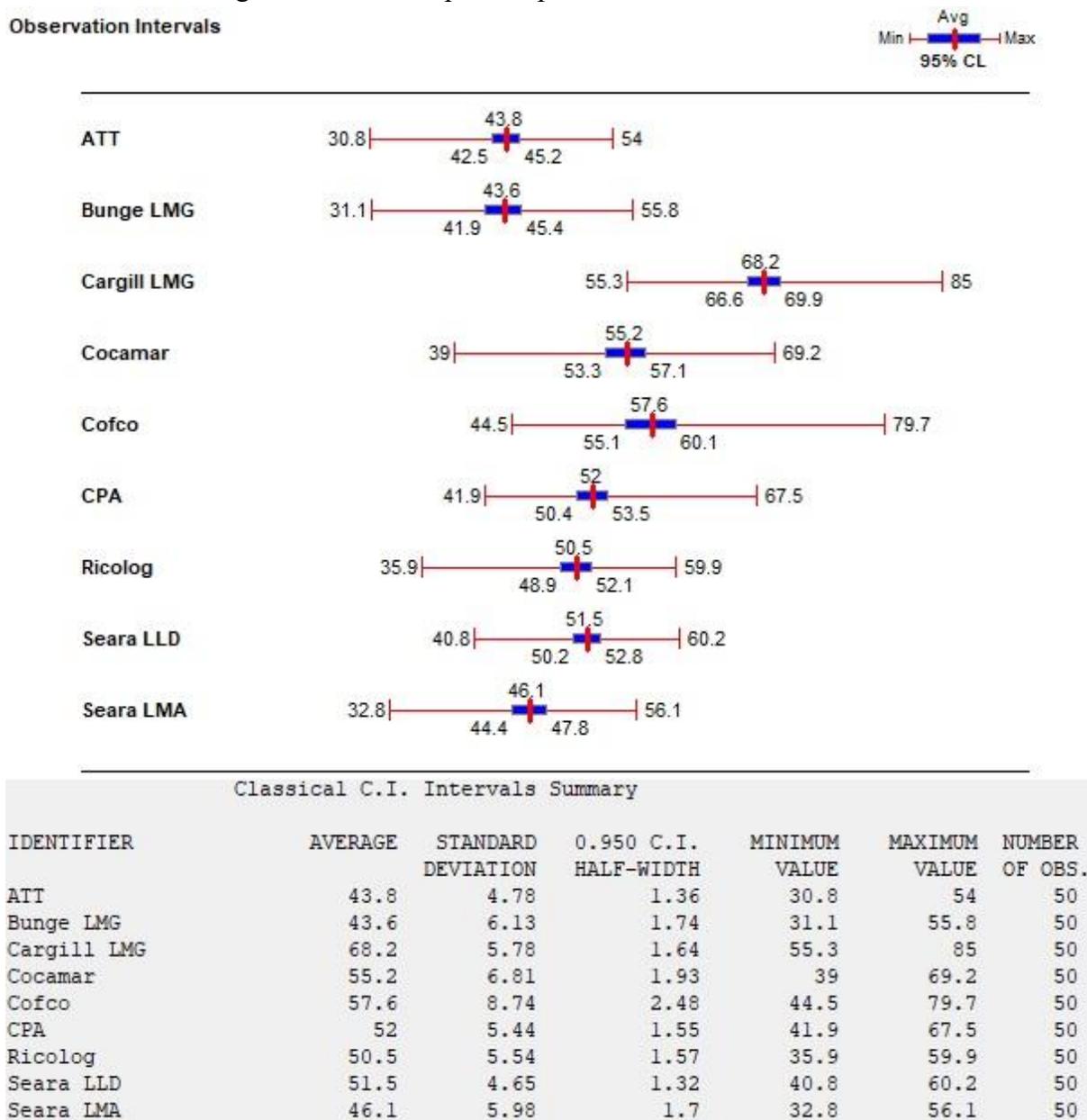
Figura A.2 – Dados de saída dos terminais de Maringá



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

APÊNDICE B – RESULTADOS DE DESEMPENHO OPERACIONAL DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO (*OUTPUT ANALYZER*)

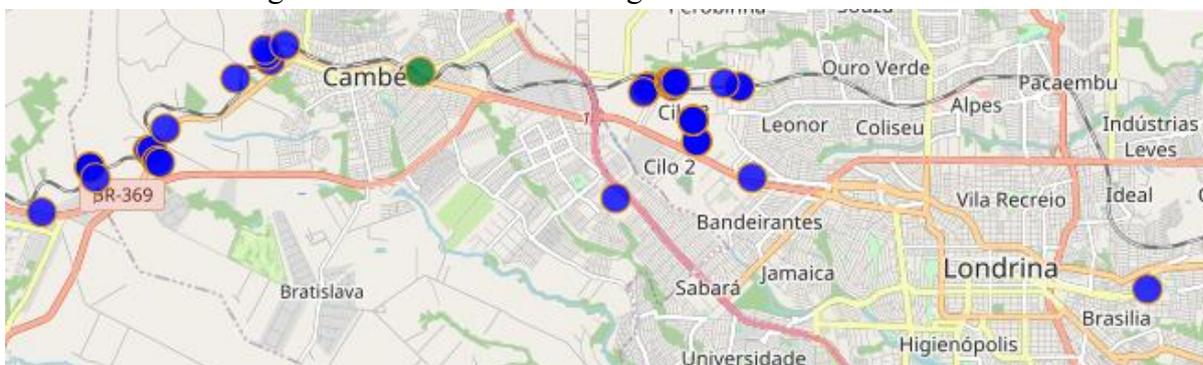
Figura B.1 – Desempenho operacional do modo rodoviário



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

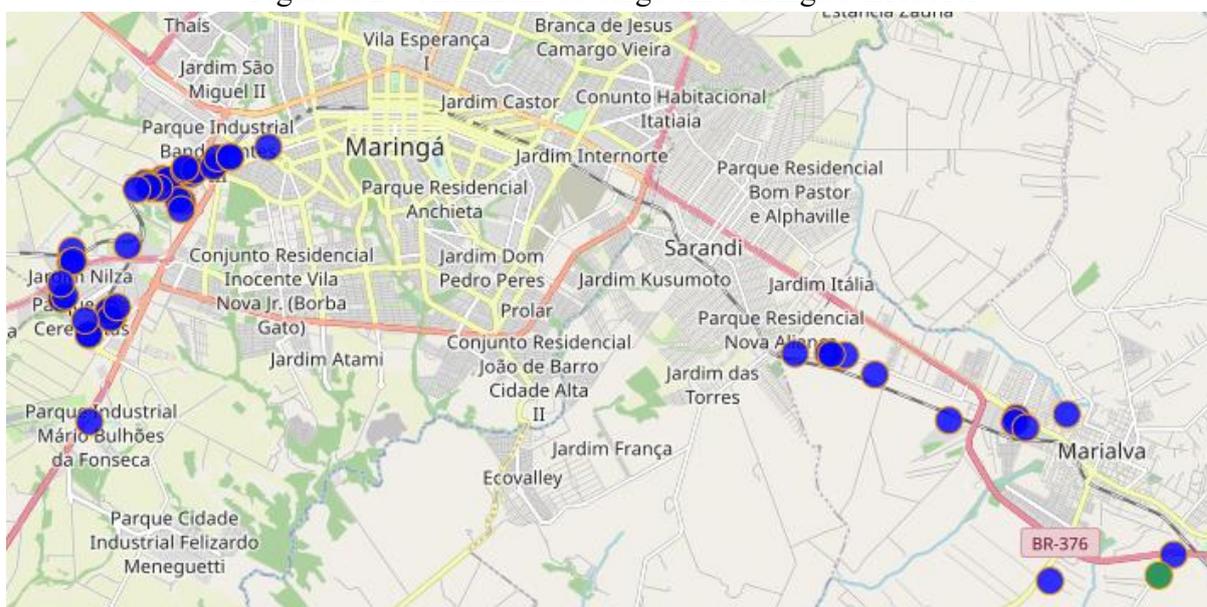
APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS ARMAZÉNS DE CARGA GRANEL PARA MOVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

Figura C.1 – Armazéns de carga em Londrina e arredores



Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento (2022)

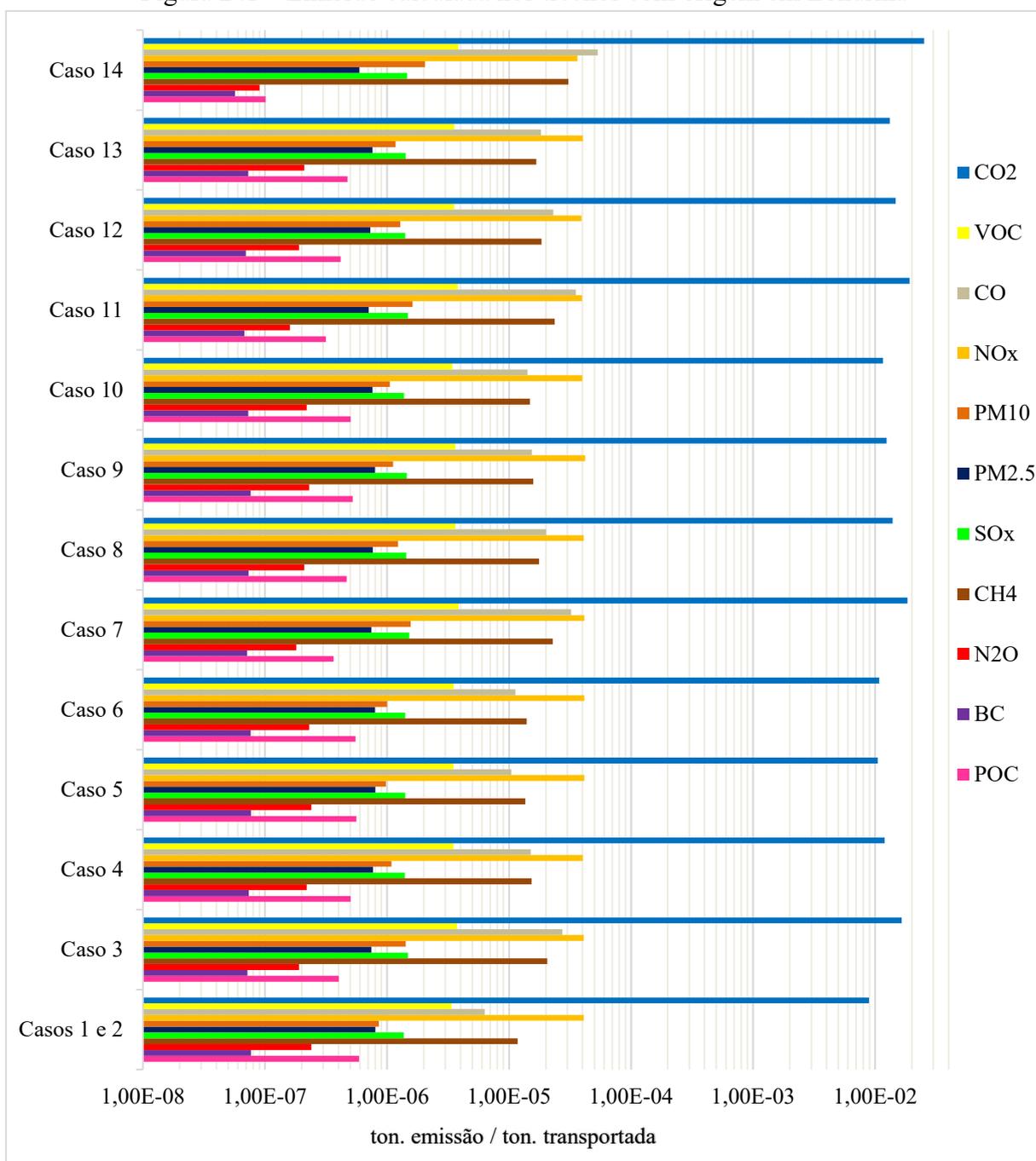
Figura C.2 – Armazéns de carga em Maringá e arredores



Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento (2022)

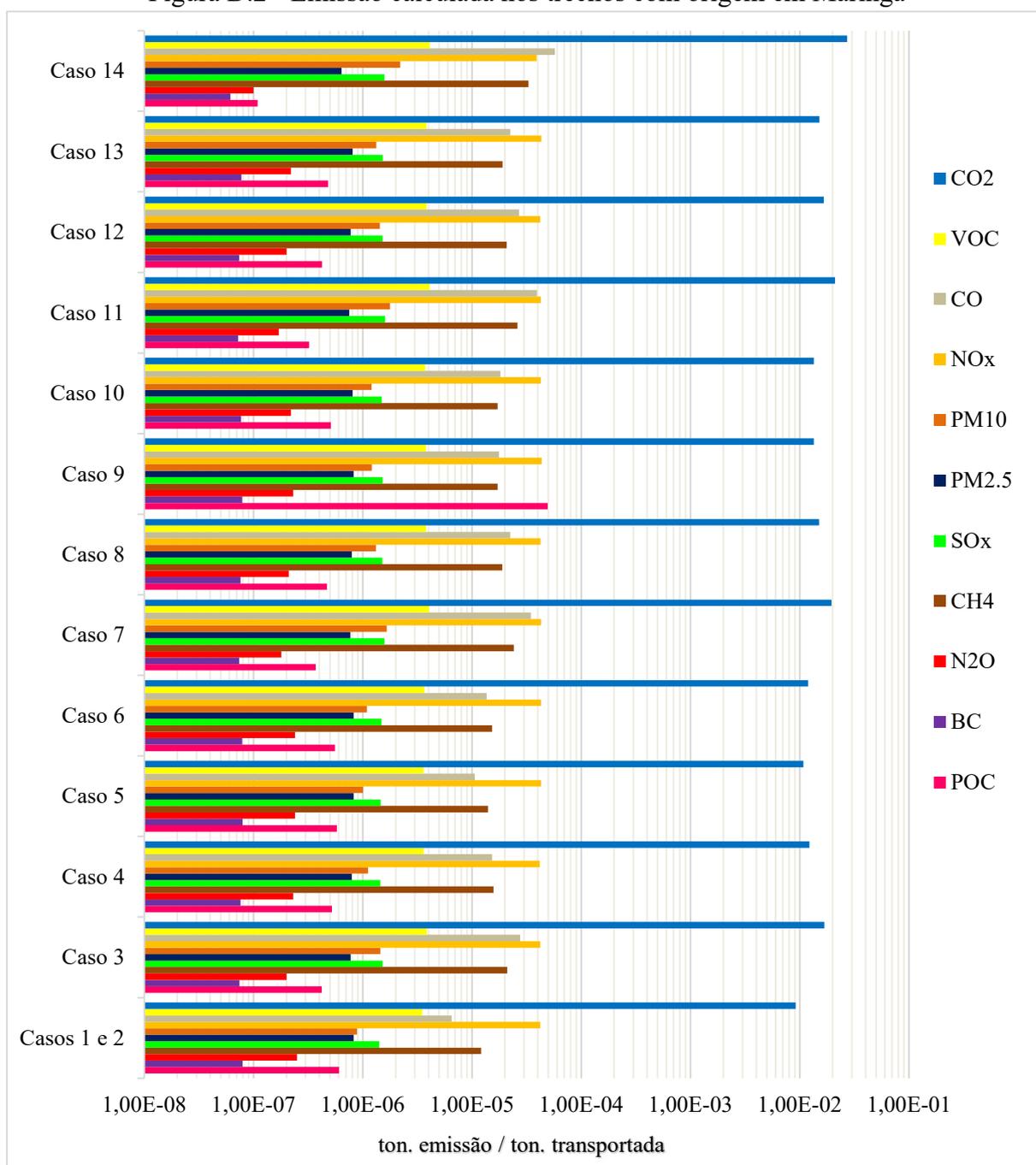
APÊNDICE D – EMISSÃO DOS POLUENTES EM CADA CASO POR MUNICÍPIO

Figura D.1 – Emissão calculada nos trechos com origem em Londrina



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura D.2 - Emissão calculada nos trechos com origem em Maringá



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

D = C > E	D = E > C	C = E > D	D = C = E
Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo
Péssimo	Muito ruim	Muito ruim	Muito ruim
Muito ruim	Moderado	Moderado	Ruim
Muito ruim	Péssimo	Muito ruim	Muito ruim
Ruim	Ruim	Ruim	Ruim
Ruim	Moderado	Bom	Moderado
Moderado	Muito ruim	Ruim	Ruim
Moderado	Ruim	Bom	Moderado
Bom	Bom	Muito bom	Bom
Muito ruim	Muito ruim	Péssimo	Muito ruim
Ruim	Ruim	Ruim	Ruim
Ruim	Bom	Moderado	Moderado
Ruim	Ruim	Ruim	Ruim
Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Moderado	Bom	Bom	Bom
Bom	Ruim	Moderado	Moderado
Bom	Moderado	Bom	Bom
Muito bom	Muito bom	Excelente	Muito bom
Ruim	Ruim	Muito ruim	Ruim
Moderado	Bom	Ruim	Moderado
Bom	Muito bom	Bom	Bom
Bom	Moderado	Ruim	Moderado
Bom	Bom	Moderado	Bom
Muito bom	Excelente	Muito bom	Muito bom
Muito bom	Bom	Bom	Bom
Excelente	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Fonte: elaborado pelo autor (2022)