

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção

Carlos Henrique Fernandes de Faria

**A OTIMIZAÇÃO VIA SIMULAÇÃO DO PLANEJAMENTO TÁTICO DA CADEIA
DE EXPORTAÇÃO DOS GRÃOS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL**

Belo Horizonte
2023

Carlos Henrique Fernandes de Faria

**A OTIMIZAÇÃO VIA SIMULAÇÃO DO PLANEJAMENTO TÁTICO DA CADEIA
DE EXPORTAÇÃO DOS GRÃOS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Doutor João Flávio de Freitas Almeida

Coorientador: Prof. Doutor Luiz Ricardo Pinto

Belo Horizonte
2023

F224o

Faria, Carlos Henrique Fernandes de.

A otimização via simulação do planejamento tático da cadeia de exportação dos grãos [recurso eletrônico] : uma abordagem sustentável / Carlos Henrique Fernandes de Faria. - 2023.

1 recurso online (121 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: João Flávio de Freitas Almeida.

Coorientador: Luiz Ricardo Pinto.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 105-121.

Bibliografia: f. 95-104.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Transporte de cargas - Teses. 3. Planejamento integrado - Teses. 4. Sustentabilidade - Teses. 5. Otimização - Teses. 6. Simulação (Computadores) - Teses. I. Almeida, João Flávio de Freitas. II. Pinto, Luiz Ricardo. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 658.5(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

FOLHA DE APROVAÇÃO

A otimização via simulação do planejamento tático da cadeia de exportação dos grãos: uma abordagem sustentável

CARLOS HENRIQUE FERNANDES DE FARIA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E INTERVENÇÃO EM SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS, linha de pesquisa Otimização e Simulação de Sistemas Logíst. e de Grande Porte.

Aprovada em 24 de maio de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). João Flavio de Freitas Almeida - Orientador

UFMG

Prof(a). Luiz Ricardo Pinto

UFMG

Prof(a). Alexandre Xavier Martins

UFOP

Prof(a). Ormeu Coelho da Silva Júnior

CEFET/RJ

Prof(a). Marta Monteiro da Costa Cruz

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof(a). Lásara Fabrícia Rodrigues

UFMG

Belo Horizonte, 24 de maio de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **João Flavio de Freitas Almeida, Professor do Magistério Superior**, em 24/05/2023, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lásara Fabrícia Rodrigues, Professora do Magistério Superior**, em 24/05/2023, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Ricardo Pinto, Professor do Magistério Superior**, em 24/05/2023, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Xavier Martins, Usuário Externo**, em 24/05/2023, às 14:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marta Monteiro da Costa Cruz, Usuário Externo**, em 25/05/2023, às 08:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ormeu Coelho da Silva Júnior, Usuário Externo**, em 25/05/2023, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2323356** e o código CRC **D8F46342**.

À minha família, minha base.

Agradecimentos

À Deus e aos bons espíritos, pela vida, pela proteção e pelas graças recebidas no fim de mais um ciclo.

Aos meus pais, Carlos e Lêda, pelos incentivos e pelos ensinamentos para que eu pudesse alcançar os meus sonhos.

À minha irmã, Aline, que com o seu sorriso, torna a minha caminhada mais leve.

À Carolina, pela paciência, pelo companheirismo e por sua capacidade de me trazer a paz e a tranquilidade na correria do dia a dia.

Ao Miguel. A minha menor presença nesses seus três primeiros meses de vida foi pensando em um futuro melhor para você.

Ao Fred pelo companheirismo.

Ao Professor e Orientador, Doutor João Flávio de Freitas Almeida, que com extrema paciência e competência ímpar conduziu a orientação do trabalho. Saiba que sem você, esse trabalho não teria sido concluído.

Ao coorientador Professor Doutor Luiz Ricardo Pinto por ter aberto as portas a esta oportunidade acadêmica.

À VLI pela confiança para a realizar este curso e a todos os companheiros de trabalho que direta ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Professor Doutor Alexandre Xavier Martins, à Professora Doutora Lásara Fabrícia Rodrigues, à Professora Doutora Marta Monteiro da Costa Cruz e ao Professor Doutor Ormeu Coelho da Silva Júnior por aceitarem participar da banca de defesa de avaliação desta tese.

Aos professores e servidores do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais por todos os serviços prestados.

Resumo

As exportações de grãos do Brasil são realizadas por diversas empresas logísticas e reguladas por duas agências governamentais, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ). Embora os atores envolvidos tenham interesses particulares, há uma preocupação comum sobre a sustentabilidade das operações ferroviárias, o que representa um desafio ao planejamento tático. Aliado a isso e à luz de lacunas na literatura sobre o planejamento sustentável de cadeias logísticas multimodais em países com proporções continentais, esta tese propõe uma abordagem de otimização via simulação para atribuir composições ferroviárias às rotas e balancear suas cargas minimizando a emissão de CO₂ sem comprometer a entrega do volume planejado. O modelo contempla parâmetros financeiros e considera um sistema em circuito fechado multimodal que integra terminais, ferrovias e portos. A aplicabilidade desse modelo unificado é testado em um estudo de caso, sendo capaz de capturar várias sinergias e *trade-offs* oriundos de objetivos por vezes conflitantes e desafiadores no planejamento logístico: o atendimento ao volume exportado, a agilidade no transporte das cargas e a possibilidade de redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Os resultados revelam um plano integrado e mais sustentável que viabiliza um incremento da exportação de grãos em 146,2 kt/ano (aproximadamente +0,28%) e a redução da emissão de 66,8 kt de CO₂ por ano (cerca de -2,51%). Além disso, o modelo também é aplicável a cenários futuros. Com o crescimento na produção de grãos do Brasil no longo prazo, esta tese contribui para o direcionamento das cargas aos terminais portuários de maneira sustentável, antecipando a necessidade de novos investimentos capazes de proporcionar um planejamento ambientalmente mais sustentável.

Palavras-chaves: Cadeias logísticas multimodais. Planejamento integrado. Otimização via simulação. Sustentabilidade.

Abstract

The grain exported from Brazil is operated by several logistics companies and regulated by two government agencies, the National Land Transport Agency (ANTT) and the National Waterway Transport Agency (ANTAQ). Although the actors involved have particular interests, a common concern about the operations' sustainability is a challenge to tactical planning. In light of gaps in the literature on sustainable planning of multimodal logistics chains in countries with continental proportions, this thesis proposes a simulation-optimization approach to assign trains' routes and balance their loads, minimizing CO₂ emissions without compromising the planned volume. The model includes financial parameters and considers a closed-loop system integrating terminals, railways and ports. The model's applicability is tested in a case study, capturing synergies and trade-offs from conflicting and challenging objectives in logistical planning: meeting the exported volume, agility in transporting loads and the possibility of reducing greenhouse gas emissions. The results reveal an integrated and more sustainable plan that enables an increase in grain exports of 146.2 kt/year (approximately +0.28%) and reduced emissions of 66.8 kt of CO₂ per year (about -2.51%). Furthermore, the model is also applicable to future scenarios. With grain production's growth in Brazil in the long term, this thesis contributes to directing cargo to port terminals sustainably, anticipating the need for new investments to provide more environmentally sustainable planning.

Keywords: Multimodal logistics chain. Integrated planning. Simulation-optimisation. Sustainability.

Lista de Figuras

2.1	Elementos físicos de um terminal intermodal. Fonte: Autor	25
2.2	Sistema logístico multimodal e seus benefícios. Fonte: Autor	26
2.3	Mapa ferroviário brasileiro. Fonte: Revista Ferroviária (2021).	27
2.4	Características das ferrovias brasileiras: extensões e tipos de bitolas. Fonte: Autor	28
2.5	Evolução do volume ferroviário em toneladas úteis. Fonte: Autor	29
3.1	Sistema logístico multimodal em circuito fechado. Fonte: Autor.	44
3.2	Fluxograma do módulo rodoviário. Fonte: Autor.	49
3.3	Fluxograma do módulo ferroviário nos terminais. Fonte: Autor.	51
3.4	Fluxograma do módulo ferroviário nos portos. Fonte: Autor.	52
3.5	Fluxograma do módulo portuário. Fonte: Autor.	54
4.1	Posições geográficas do sistema logístico multimodal. Fonte: Autor.	64
4.2	Conexões do modelo de otimização via simulação: origens i e destinos j . Fonte: Autor.	65
4.3	Interação entre os pacotes de otimização e simulação. Fonte: Oliveira (2019)	67
4.4	Volume de grãos nos terminais de origem no ano 2022 em Mt/ano. Fonte: Autor.	68
4.5	Volume de grãos nos terminais portuários no ano 2022. Fonte: Autor.	73
4.6	Árvore de indicadores ferroviários. Fonte: Autor.	77
5.1	Volume exportado planejado.	83
5.2	Plano de emissões de CO ₂ na ferrovia.	83
5.3	Receita ferroviária planejada.	83
5.4	Comparativo do volume no cenário simulado versus cenário otimizado.	85
5.5	Variação do volume exportado: cenário simulado e o cenário otimizado.	86
5.6	Evolução do volume ferroviário destinados aos Portos em Itaqui.	87
5.7	Comparativo da emissão de CO ₂ no cenário simulado versus cenário otimizado.	88
5.8	Comparativo da receita no cenário simulado versus cenário otimizado.	89

Lista de Tabelas

2.1	<i>Softwares</i> específicos de simulação com seus respectivos otimizadores.	33
2.2	Os estudos recentes em comparação com a presente tese proposta.	40
3.1	Parâmetros e variáveis - Modelo de otimização e Algoritmos de simulação.	45
3.2	Parâmetros para o cálculo do intervalo médio de chegada entre caminhões y	48
3.3	Parâmetros para o cálculo do intervalo médio de chegada entre navios s	53
3.4	Parâmetros para o cálculo das emissões de CO ₂	57
3.5	Parâmetros para o cálculo do teto tarifário.	59
3.6	Parâmetros para o cálculo do <i>transit time</i> médio no trecho ferroviário t	61
4.1	Atividades do processo rodoviário nos terminais de origem para cada caminhão.	69
4.2	Informações das frotas de material rodante no Brasil: vagões e locomotivas.	69
4.3	Informações dos tipos de composições ferroviárias no modelo de otimização via simulação.	70
4.4	Principais informações da capacidade dos grãos nos terminais de origem. Fontes: Revista Ferroviária (2021); Conab (2023).	71
4.5	Principais informações da capacidade dos grãos (soja e milho) nos terminais de destino. Fontes: ANTAQ (2018); Conab (2023); ANTT (2022a).	72
4.6	Principais informações portuárias. Fonte: ANTAQ (2018).	73
4.7	Consumo de combustível no transporte ferroviário por locomotiva (l /milhares TKU)	74
4.8	Teto tarifário ferroviário - produto Soja	75
4.9	Teto tarifário ferroviário - produto Milho	75
4.10	Velocidade média (km/h) nos corredores ferroviários.	76
4.11	A distância (km) entre as origens e os destinos nos corredores ferroviários.	78
5.1	Parâmetros para a definição do número de replicações.	82
5.2	Comparativo do volume real (ano 2022) versus cenário simulado nos portos.	83
5.3	Comparativo da distribuição das composições ferroviárias: cenário real (ano 2022) versus cenário otimizado.	84

5.4	Comparativo do volume no cenário simulado versus cenário otimizado nos portos.	85
5.5	Comparativo das emissões de CO ₂ no cenário simulado versus cenário otimizado.	87
5.6	Comparativo das receitas no cenário simulado versus cenário otimizado. . .	88
5.7	Parâmetros estatísticos dos indicadores no cenário simulado e no cenário otimizado.	89
A.1	Atributos do modelo de simulação via otimização.	105
A.2	Parâmetros de <i>inputs</i> gerais do modelo de simulação via otimização. . . .	105
A.3	Parâmetros de produtividade do modelo de simulação via otimização. . . .	106
A.4	Variáveis controle do modelo de simulação.	106
A.5	Variáveis controle do modelo de otimização.	106
A.6	Variáveis de <i>outputs</i> do modelo simulação via otimização.	106
A.7	Principais atividades do modelo de simulação via otimização.	107
A.8	Estatística descritiva do cenário base (volume total exportado).	108
A.9	Estatística descritiva do cenário base (emissão total de CO ₂).	108
A.10	Estatística descritiva do cenário base (receita ferroviária).	108
A.11	Estatística descritiva do cenário otimizado (volume total exportado). . . .	109
A.12	Estatística descritiva do cenário otimizado (emissão total de CO ₂).	109
A.13	Estatística descritiva do cenário otimizado (receita ferroviária).	109
A.14	Volume de soja nos terminais de origem - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)	110
A.15	Volume de milho nos terminais de origem - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)	110
A.16	Volume de grãos (soja e milho) nos terminais de origem - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)	111
A.17	Volume de soja nos terminais de destino - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)	111
A.18	Volume de milho nos terminais de destino - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)	111
A.19	Volume de grãos (soja e milho) nos terminais de destino - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)	111
A.20	Volume exportado (toneladas) de soja e de milho nos portos	112
A.21	TKU nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos	113
A.22	Consumo diesel (litros) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos .	114
A.23	Emissão CO ₂ (kg) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos	115
A.24	Receita (US\$) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos.	116
A.25	Volume exportado (toneladas) de soja e de milho nos portos	117
A.26	TKU nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos	118
A.27	Consumo diesel (litros) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos .	119
A.28	Emissão CO ₂ (kg) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos	120

A.29 Receita (US\$) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos. 121

Lista de abreviaturas

ANTT:	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANTAQ:	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTF:	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
AE:	Algoritmos Evolutivos
AG:	Algoritmos Genéticos
BT:	Busca Tabu
DES:	<i>Discrete Event Simulation</i>
SA:	<i>Simulated Annealing</i>
SS:	<i>Scatter Search</i>
RN:	Redes Neurais
GEE:	Gases de Efeito Estufa
IC:	Intervalo de confiança
KPIs:	<i>Key Performance Indicators</i> - Indicadores-chave de desempenho
DWT:	<i>Deadweight</i> - Carga total em toneladas de uma embarcação
MR:	Material rodante (vagões e locomotivas)
PM:	Peso médio
TB:	Toneladas brutas
TU:	Toneladas úteis
TKB:	Tonelada-quilômetro bruto
TKU:	Tonelada-quilômetro útil
EFC:	Estrada de Ferro Carajás
EFVM:	Estrada de Ferro Vitória-Minas
FCA:	Ferrovias Centro Atlântica
FNS:	Ferrovias Norte Sul
RMC:	Rumo Malha Central
RMN:	Rumo Malha Norte
RMO:	Rumo Malha Oeste
RMP:	Rumo Malha Paulista
RMS:	Rumo Malha Sul
VLI:	Valor da Logística Integrada

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação e relevância da pesquisa	17
1.2	Objetivo geral da pesquisa	18
1.2.1	Objetivos específicos da pesquisa	19
1.3	Limitações da pesquisa	19
1.4	Organização da pesquisa	19
2	Exame da Literatura	21
2.1	O planejamento tático da cadeia logística	22
2.1.1	O transporte intermodal	23
2.1.2	O transporte ferroviário	26
2.2	A otimização via simulação	32
2.2.1	<i>Scatter Search</i> (SS)	34
2.2.2	Busca Tabu (BT)	36
2.2.3	Redes Neurais (RN)	37
2.3	Limitações da literatura e as principais contribuições deste trabalho . .	38
3	Método	42
3.1	O modelo conceitual	43
3.2	O planejamento do transporte ferroviário sustentável	47
3.2.1	O módulo rodoviário	47
3.2.2	O módulo dos terminais ferroviários	50
3.2.3	O módulo portuário	53
3.3	A otimização via simulação	54
3.4	O cálculo das emissões de CO ₂	57
3.5	O cálculo dos parâmetros financeiros	58
3.6	O cálculo das estimativas de tempos dos percursos	60
4	Estudo de Caso	62
4.1	Descrição do sistema logístico	63

4.1.1	O sistema rodoviário	68
4.1.2	O sistema ferroviário	69
4.1.3	O sistema dos terminais	70
4.1.4	O sistema portuário	72
4.2	As emissões de CO ₂ no transporte ferroviário	74
4.3	As tarifas ferroviárias	74
4.4	As velocidades médias ferroviárias	75
4.5	As distâncias ferroviárias	76
5	Resultados e Discussões	79
5.1	Verificação e validação	81
5.2	Resultados da simulação - cenário base	83
5.3	Resultados da otimização via simulação - cenário otimizado	84
5.4	Análises dos resultados e discussões	89
6	Conclusões e Trabalhos futuros	92
	Referências Bibliográficas	95
A		105
A.1	Parâmetros do modelo de simulação via otimização	105
A.2	Parâmetros estatísticos da simulação - cenário base	108
A.3	Parâmetros estatísticos da simulação - cenário otimizado	109
A.4	Dados históricos dos volumes de grãos	110
A.5	Dados simulados: cenário base	112
A.6	Dados simulados: cenário otimizado	117

Capítulo 1

Introdução

“You will never do anything in this world without courage. It is the greatest quality of the mind next to honor.”

Aristóteles

O planejamento da cadeia logística para a exportação dos grãos no Brasil enfrenta diversos desafios, desde uma infraestrutura deficiente e uma sazonalidade acentuada na produção agrícola, à falta de padronização e de transparência nos processos de licenciamento e de regulação. Além de englobar decisões dos diversos elos da cadeia, tais como, os produtores agrícolas, as áreas para armazenagem, os modos de transporte, os operadores portuários e as agências reguladoras, a integração entre eles é fundamental para aumentar a sustentabilidade, reduzir os custos e melhorar o nível de serviço oferecido aos clientes.

A crescente consciência social sobre sustentabilidade e as novas regulamentações governamentais levam as organizações que realizam a exportação dos grãos no Brasil a reconsiderar o planejamento da cadeia de suprimentos, trazendo melhorias ligadas à eficiência de combustível e à alocação dos ativos responsáveis pelo transporte. Assim, escolher os modos de transporte adequados, definir uma consolidação da carga apropriada e fazer a manutenção preventiva da frota são práticas que viabilizam a redução das emissões e não exigem altos investimentos.

No entanto, a usual pressão por prazos curtos de entrega nos portos leva à escolha dos modos de transporte que não são necessariamente os mais sustentáveis, uma vez que tais atividades tradicionalmente produzem resíduos e poluição (Mokhtari e Hasani, 2017; Layeb et al., 2018). Nesses casos, as empresas podem enfrentar objetivos conflitantes como reduzir o atraso da entrega e reduzir as emissões de CO₂ (Eskandarpour et al., 2015; Farahani et al., 2018).

O transporte multimodal pode ser uma alternativa eficaz ao problema descrito, uma vez que, ao permitir a combinação entre diferentes modos de transporte associados à

utilização de tecnologias mais limpas e às práticas de gestão mais eficientes, levam à redução nas emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Para auxiliar o planejamento nestes sistemas, ferramentas de gerenciamento selecionam rotas de transporte de forma a tornar as cadeias de suprimentos mais produtivas, rentáveis e ambientalmente sustentáveis (Baykasoglu e Subulan, 2016; Koberg e Longoni, 2019).

Os sistemas logísticos de transporte podem ser representados pela integração entre entidades, recursos, atividades e filas. No entanto, os estudos focam apenas em alguns componentes da cadeia de suprimentos ao invés de tratá-los de forma integrada, o que limita a representatividade da modelagem de sistemas reais (Crainic et al., 2018; Faria e Cruz, 2015). Além disso, as incertezas, as não linearidades e o nível de detalhamento requerido em redes logísticas complexas impõem desafios de resolução por programação matemática para as tomadas de decisões. Da mesma forma, representar tais problemas apenas por modelos de simulação pode ser uma abordagem míope para atingir as metas de operações sustentáveis, como emissões de CO₂ mais baixas (Almeder e Preusser, 2007; Oliveira et al., 2019).

Computacionalmente, a otimização via simulação tem sido adotada como uma abordagem adequada para apoiar as estratégias e as tomadas de decisão dos sistemas de planejamento da cadeia de suprimentos complexos e dinâmicos, além de capturar sinergias e o *trade off* entre a sustentabilidade ambiental e o desempenho operacional. Além disso, pode reduzir as incertezas inerentes ao processo de planejamento ao integrar as questões ambientais e sociais com métricas focadas em meio ambiente e em incentivos governamentais (Rebsa et al., 2019).

1.1 Motivação e relevância da pesquisa

No planejamento da cadeia de suprimentos, implementar políticas sustentáveis traz benefícios. Essas práticas mais “limpas”, além de contribuir para a preservação do meio ambiente e melhorar a qualidade do ar com a redução das emissões dos GEE, são vistas de maneira positiva perante uma sociedade cada vez mais ecologicamente responsável.

No passado recente, as empresas de logística resistiam a adotar práticas sustentáveis. Tais medidas poderiam impactar nos tempos de entrega aos clientes devido à escolha por modos de transporte mais rápidos, mas menos eficientes ambientalmente. Além disso, temiam a redução do lucro, em consequência do aumento de custos advindos dos investimentos em tecnologias “verdes” ou da implantação de processos ecologicamente corretos, por exemplo.

Entretanto, utilizar métodos mais sustentáveis e seguir as diretrizes de responsabi-

lidade social e ambiental é uma tendência que reflete uma mudança de paradigma das relações entre as empresas e a sociedade. O compromisso ambiental é uma conquista imaterial relacionada à missão e ao propósito de uma marca e à sua contribuição para a humanidade. As cadeias logísticas de exportação dos grãos multimodais possuem melhor eficiência energética, além de emitirem menos CO₂ em suas operações (Bowersox et al., 1996).

Adicionalmente, é relevante à empresa integrar os interesses, por hora conflitantes, das diversas áreas de negócios, tais como: operação, planejamento, comercial, financeiro e *marketing*, capturando as diversas sinergias existentes (Faria, 2016).

Todavia, muitos estudos tratam os componentes do *supply chain* de maneira independente devido à alta complexidade. Isso eleva os riscos e leva a decisões limitadas devido às simplificações adotadas. Algumas técnicas adotadas pelo método de otimização podem não representar devidamente as incertezas inerentes aos processos ou a simulação que, por se basear na análise de cenários formulados pelo tomador de decisão, pode não encontrar o melhor ponto de decisão do sistema.

1.2 Objetivo geral da pesquisa

Esta tese propõe uma estratégia de otimização via simulação para o planejamento tático multimodal (terminais, ferrovias e portos) envolvendo toda a extensão territorial de um país com proporções continentais de uma cadeia logística responsável pela exportação dos grãos. O objetivo é elaborar um plano integrado mais sustentável, devido às crescentes preocupações com as questões ambientais, e que atenda aos requisitos da demanda de forma a reduzir as emissões de CO₂ no transporte ferroviário, além de trazer estimativas da receita logística neste modo de transporte.

1.2.1 Objetivos específicos da pesquisa

Em resumo, os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Viabilizar uma nova análise ainda inexplorada na literatura do planejamento integrado da exportação de grãos no nível tático integrada a uma abordagem sustentável e com estimativas financeiras.
2. Usar a metodologia de otimização via simulação em um problema estocástico de grande porte envolvendo os modos de transporte ferroviário, rodoviário e portuário.
3. Testar a aplicabilidade do modelo desenvolvido no sistema brasileiro de exportação de grãos a nível nacional, desde os pontos de origem das *commodities* agrícolas aos terminais portuários.
4. Propor uma nova capacidade dos sistemas envolvidos nas análises via planejamento logístico integrado dos terminais, das ferrovias e dos portos no horizonte tático.
5. Apontar o direcionamento para possíveis novos investimentos que seja mais sustentável na logística nacional.

1.3 Limitações da pesquisa

A modelagem para um planejamento da cadeia de suprimentos possui abordagens estratégicas, táticas ou operacionais. Este estudo aborda apenas o planejamento logístico de médio prazo. O detalhamento das operações nos terminais, nas ferrovias ou nos portos não é escopo, já que está relacionado às decisões de nível operacional. Além disso, as estimativas das receitas e das emissões de CO₂ englobam apenas o sistema de transporte ferroviário por dificuldade de se obter dados públicos.

1.4 Organização da pesquisa

A tese está organizada da seguinte forma: o capítulo 1 apresenta a relevância do trabalho, as motivações e os objetivos geral e específicos. A literatura é examinada no capítulo 2. Apresenta-se uma revisão sobre modelos de otimização via simulação que lidam com as incertezas no contexto do planejamento da cadeia de suprimentos, além de discorrer sobre as heurísticas *Scatter Search*, Busca Tabu e Redes Neurais e contextualizar sobre o planejamento logístico no que tange o transporte intermodal, o transporte ferroviário incluindo os temas acerca da emissão dos gases de efeito estufa e

das tarifas neste modo de transporte. Por fim, discorre-se acerca dos principais estudos correlatos e suas limitações, além das principais contribuições desta tese.

No capítulo 3 são apresentados o modelo conceitual, as principais hipóteses e as formulações do modelo logístico de grande porte. As eficiências dos métodos são avaliadas e discutidas no capítulo 4 a partir da aplicação do modelo computacional a um estudo de caso da cadeia logística de exportação dos grãos no Brasil.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as discussões sobre os resultados, e o capítulo 6 conclui este trabalho com as sugestões de trabalhos futuros a serem explorados e as principais conclusões obtidas com o estudo realizado.

Capítulo 2

Exame da Literatura

“When it is obvious that the goals cannot be reached, don’t adjust the goals, adjust the action steps.”

Confúcius

A suposição de que um sistema de transporte multimodal opera em um ambiente estável não é realista. Portanto, os modelos computacionais devem considerar as incertezas para retratar a flexibilidade e os riscos inerentes à cadeia de suprimentos (Abadi et al., 2015; Elbert et al., 2020). Há limitações nos modelos devido à dificuldade de representar de forma aproximada e consistente o sistema real e sua respectiva dinâmica. As incertezas estão relacionadas ao *lead time* da oferta e da demanda (Schwartz et al., 2006; Bandaly et al., 2012), ao preço do frete das mercadorias (You et al., 2009), aos fatores sazonais (Srivastav et al., 2011), à perecibilidade do produto (Duan e Liao, 2014), ao desempenho das frotas (Moallemi et al., 2018) e até mesmo às condições do trânsito (Chávez et al., 2017). Estes pesquisadores adotaram com sucesso a otimização via simulação para lidar com tais elementos em uma cadeia de suprimentos complexa.

Neste capítulo a literatura sobre o planejamento tático e estratégico da cadeia logística é revisada em 2.1. Ainda nesta seção, discorre-se acerca da intermodalidade em 2.1.1 e do transporte ferroviário em 2.1.2, com suas respectivas características nos temas relacionados às questões ambientais das emissões dos poluentes em 2.1.2.1 e das tarifas praticadas neste modo de transporte em 2.1.2.2. As próximas seções são divididas de forma que em 2.2 é abordado o método de otimização via simulação e a heurística *Scatter Search* em 2.2.1. Por fim, em 2.3 discute-se sobre as lacunas presentes na literatura e as principais contribuições acadêmicas deste trabalho .

2.1 O planejamento tático da cadeia logística

O planejamento da cadeia de suprimentos é um processo crítico e complexo para as empresas na busca por uma maior eficiência e produtividade. Esse termo surgiu na década de 90 e, anteriormente, focava-se apenas no gerenciamento do fluxo físico dos produtos (Christopher, 1992).

Com a globalização dos negócios e a necessidade de gerenciar de forma eficaz a complexidade e os riscos inerentes à cadeia de suprimentos, focou-se principalmente na eficiência operacional e na redução dos custos através de um planejamento mais colaborativo entre os diversos atores envolvidos (Park e Kim, 2016).

Embora existam outras técnicas utilizadas no desenvolvimento dos modelos computacionais de planejamento da cadeia de suprimentos, algumas podem ser baseadas tanto em otimização quanto em simulação e o seu respectivo uso está relacionado a alguns fatores a se destacar:

- Os modelos de programação matemática possuem uma visão mais geral do processo e com o objetivo principal de encontrar a solução ótima.
- Os modelos de simulação possuem uma ótica mais detalhada do processo sob condições de incertezas e estocasticidade, mas com alto grau de acuracidade (Fahimnia et al., 2012).

Entretanto, a concepção e o estabelecimento de uma rede da cadeia de suprimentos são medidas estratégicas, cujo efeito das tomadas de decisões perdurará por anos. Com isso, a definição inadequada dos parâmetros incertos tem consequências negativas no longo prazo. Dessa forma, passou-se a incorporar tanto os fatores estocásticos quanto os determinísticos no planejamento da cadeia de suprimentos (Listes e Dekker, 2005; Nikolopoulou e Ierapetritou, 2012). Para auxiliar nestes processos decisórios e no gerenciamento dos riscos, o método de otimização via simulação mostra-se eficaz (Oliveira et al., 2019; Srivastav et al., 2011).

É fundamental o entendimento dos níveis de hierarquia do planejamento da cadeia de suprimentos e as suas respectivas responsabilidades. Joborn et al. (2004) dividem o planejamento em três níveis de acordo com o horizonte de tempo a ser considerado: o estratégico (longo prazo), o tático (médio prazo) e o operacional (curto prazo). O nível estratégico através da localização de facilidades e a definição da capacidade do sistema, dita as políticas e as diretrizes gerais para as decisões a serem tomadas no nível tático. Este nível, por sua vez, determina as principais regras e os limites técnicos da alocação dos recursos e do fluxo de materiais para o nível de decisão operacional, que regem e controlam a execução do sistema. O fluxo das informações entre estes níveis é uma

condição para o funcionamento adequado da cadeia. A informação fornecida por um nível de planejamento inferior é usada para decisões em um nível superior.

No planejamento da cadeia logística, o transporte geralmente representa a maior despesa logística, equivalente a 13,3% do PIB brasileiro (FGV, 2022), sendo responsáveis pela movimentação dos estoques através da cadeia de suprimentos. Este estoque fica inacessível durante todo o processo logístico e, nesta etapa, denomina-se estoque em trânsito.

A utilização de diferentes modos de transporte no planejamento da cadeia de suprimentos é uma estratégia para reduzir os custos logísticos e aumentar a eficiência no transporte de cargas. Além disso, o transporte exerce influência relevante sobre os fatores ambientais. O seu funcionamento depende do consumo de combustíveis e, indiretamente, pode causar congestionamentos de tráfego, poluição sonora e atmosférica. Segundo Bowersox et al. (1996), os modais devem ser avaliados em cinco dimensões principais, a saber:

1. Disponibilidade: atendimento a qualquer origem e destino;
2. Capacidade: atendimento a qualquer carga e quantidade;
3. Frequência: atendimento sem restrição de horário;
4. Velocidade: tempo de atendimento em trânsito;
5. Confiabilidade: variabilidade do tempo de atendimento para a entrega.

Nesse sentido, o modo ferroviário tem-se mostrado uma opção atraente no transporte a longas distâncias, devido à alta capacidade de carga e à menor emissão de CO₂. Esta última ganha relevância em um atual cenário por pressão crescente por parte dos clientes e dos órgãos governamentais no que tange à sustentabilidade ambiental.

2.1.1 O transporte intermodal

O transporte intermodal é definido como o transporte de cargas em uma mesma unidade de carga intermodal (contêiner, reboque, carroceria, dentre outros) utilizando sucessivos modos de transporte (ferroviário, marítimo, rodoviário). Existem algumas terminologias diferentes na literatura, tais como, multimodal, intermodal e sincromodal. Entretanto, o transporte multimodal é o termo mais amplo e abrange todos os outros (Baykasoglu e Subulan, 2016).

O planejamento da cadeia logística utilizando o transporte intermodal de carga traz benefícios devido à sua capacidade de aumentar a segurança do tráfego e o nível de

serviço do cliente, além de diminuir os custos com transporte, em virtude do congestionamento e a poluição ambiental gerada pelo modo rodoviário, já que combina pelo menos dois modos de transporte diferentes em uma única cadeia de transporte. Além disso, o aspecto ambiental dos sistemas de transporte intermodais é uma tendência de pesquisa como destacado por Caris et al. (2013).

Por outro lado, os problemas de planejamento no transporte intermodal podem se tornar muito mais complexos do que os sistemas tradicionais de transporte unimodal e, por isso, exigem metodologias avançadas de solução e apoio à tomada de decisão baseadas em Pesquisa Operacional (Macharis e Bontekoning, 2004).

O gerenciamento e a integração dos diferentes modos de transporte traz benefícios a todos os elos envolvidos no planejamento da cadeia, seja em termos de melhoria de eficiência, no aumento da segurança, na redução dos riscos associados à logística e das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) ou no menor custo logístico (Rondinell e Berry, 2000).

Para esta integração e conexão entre os diferentes modos de transporte, são necessárias estruturas de apoio dos terminais de carga que geralmente são posicionados de maneira estratégica ao longo da cadeia logística. Estas estruturas realizam as atividades de transferência e de armazenagem provisória das cargas e, até mesmo, redirecionam as cargas para outros destinos ao longo das ferrovias (Marinov et al., 2013).

A Figura 2.1 traz alguns elementos presentes em um terminal de carga nas origens. Os tombadores são estruturas nas quais os caminhões ou basculantes realizam a descarga dos grãos e, após esse processo, o produto descarregado dirige-se às correias transportadoras através das moegas rodoviárias, seguindo posteriormente para a armazenagem. Já os armazéns são instalações onde as cargas são recebidas via modo rodoviário e estocadas antes de serem transportadas por ferrovia até o destino final, facilitando a programação e o planejamento do transporte. Por fim, as tulhas ferroviárias são estruturas equipadas com elevadores e com correias transportadoras capazes de carregar os vagões ferroviários com os produtos armazenados e evitam as perdas ou os danos às cargas durante essa etapa inicial do processo logístico.

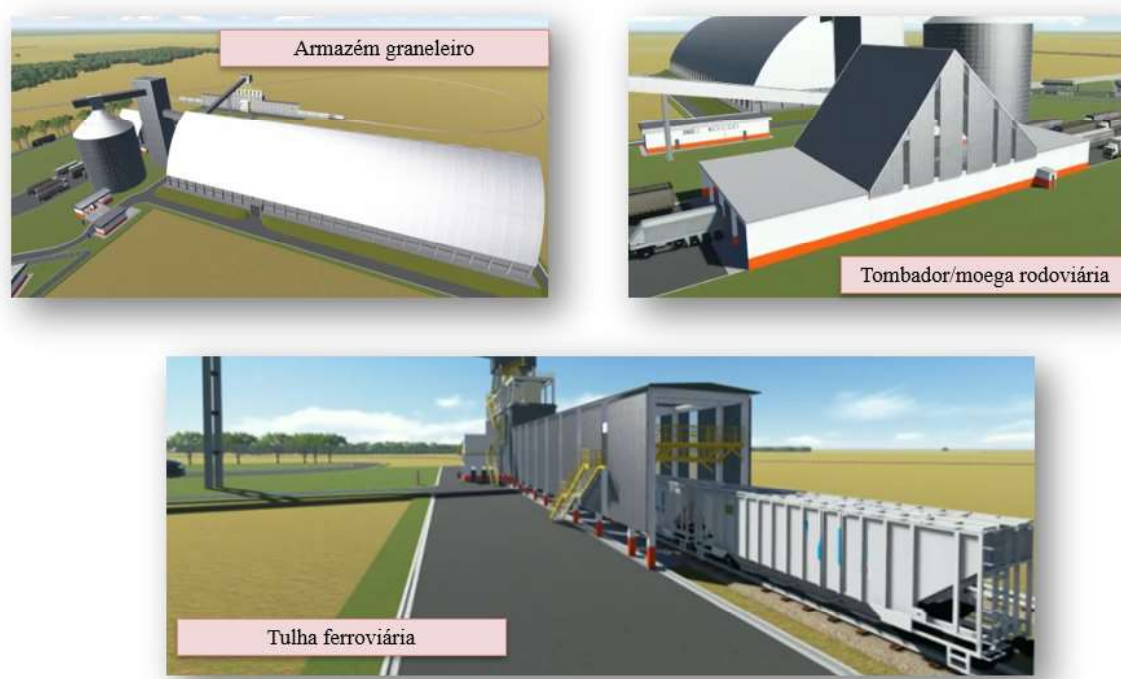


Figura 2.1: Elementos físicos de um terminal intermodal. Fonte: Autor

Assim, essa infraestrutura conecta o modo rodoviário ao modo ferroviário em uma operação que minimiza os tempos de espera ao longo dos processos, auxiliando na redução dos custos de transporte. Ela permite que o sistema logístico seja mais sustentável ambientalmente, já que os diferentes modos de transporte são utilizados de forma integrada e complementar, beneficiando-se das vantagens de cada um e otimizando os recursos nas operações.

Todavia, o dimensionamento inadequado da infraestrutura necessária para o transporte intermodal traz impactos ambientais, uma vez que pode gerar filas ao longo do processo logístico, atrasos na movimentação das cargas, aumento dos tempos de viagem e, conseqüentemente, maior consumo de combustíveis e emissões de poluentes. Adicionalmente, afeta o nível de serviço do atendimento ao cliente e os custos de transporte.



Figura 2.2: Sistema logístico multimodal e seus benefícios. Fonte: Autor

A Figura 2.2 descreve os benefícios da integração da cadeia logística por uma abordagem multimodal com destaque para a abordagem deste estudo: um modelo integrado para a exportação dos grãos envolvendo os terminais, as ferrovias e os portos.

2.1.2 O transporte ferroviário

O modo ferroviário transporta grandes volumes a médias e longas distâncias com uma alta eficiência energética, baixa variedade nos tempos de entrega, menor quantidade de acidentes, além de ser menos poluente que o modo rodoviário (ANTT, 2022b).

Em contrapartida, este modo de transporte necessita de uma infraestrutura em boas condições operacionais para ser eficiente. Isso exige altos investimentos em via permanente e em material rodante. Caracteriza-se também pela baixa flexibilidade no trajeto (rotas fixas) e, no caso do Brasil, pela incompatibilidade das bitolas entre algumas ferrovias (Fioroni, 2008). Entende-se como bitola, a distância entre as faces internas dos boletos dos trilhos.

O termo “material rodante” engloba todos os veículos capazes de trafegar em uma malha ferroviária, incluindo as locomotivas ou unidades de tração, os vagões, os autos de linha responsável pela inspeção e pela manutenção da via permanente. No caso desta tese, a citação a este termo referencia apenas as locomotivas e os vagões. A malha ferroviária brasileira possui mais de 29 mil quilômetros (ANTT, 2022b), dos quais cerca de 47% está concentrado na região Sudeste (vide Figura 2.3). Estas ferrovias são operadas por 13 concessionárias e reguladas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), são elas: a MRS Logística, a Ferrovia Centro Atlântica (FCA), a Ferrovia Norte Sul (FNS), a Ferrovia Transnordestina (FTL), a Ferrovia Tereza Cristina

(FTC), a Rumo Malha Central (RMC), a Rumo Malha Paulista (RMP), a Rumo Malha Norte (RMN), a Rumo Malha Oeste (RMO), a Rumo Malha Sul (RMS), a Estrada de Ferro Carajás (EFC), a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e a Estrada de Ferro Paraná Oeste (FERROESTE). A Rumo Logística administra a maior linha ferroviária, com 12 mil quilômetros de malha, nas regiões Sul, Sudeste e Norte do país.



Figura 2.3: Mapa ferroviário brasileiro. Fonte: Revista Ferroviária (2021).

A malha ferroviária brasileira possui três tipos de bitolas: as métricas com largura igual a 1,00 metro, as largas com largura igual a 1,60 metros e as mistas que possuem os trilhos compostos tanto para as bitolas métricas quanto para as bitolas largas e permitem assim, a passagem de veículos de bitolas diferentes. A proporção aproximada de cada um dos tipos de bitolas é detalhada na Figura 2.4 (ANTF, 2022).



Figura 2.4: Características das ferrovias brasileiras: extensões e tipos de bitolas. Fonte: Autor

Algumas ferrovias possuem limitações quanto ao transporte de determinados tipos de cargas, devido a fatores como: capacidade operacional da linha férrea, inadequação da infraestrutura para movimentação de cargas específicas ou limitações impostas pelas agências reguladoras do transporte ferroviário. Por outro lado, há ferrovias altamente especializadas com operações regulares e com alta utilização dos seus recursos, como por exemplo, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) e a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), ambas operadas pela empresa Vale e que realizam o transporte de minério de ferro.

Embora, no Brasil o minério de ferro corresponda a 73% do volume total transportado nas ferrovias, a presença da carga geral também é significativa. Em mais de duas décadas após o início das concessões, nos anos de 1996 a 1999, a movimentação de cargas pelas ferrovias brasileiras cresceu 100,1% (Figura 2.5) e já foram investidos mais de US\$ 28,38 bilhões¹ em infraestrutura em via permanente, compra de material rodante, aquisição de novas tecnologias, dentre outras iniciativas, conforme dados disponíveis em ANTF (2022).

¹Todos os valores financeiros citados ao longo deste estudo tiveram a conversão de um dólar americano para cada cinco reais brasileiro.

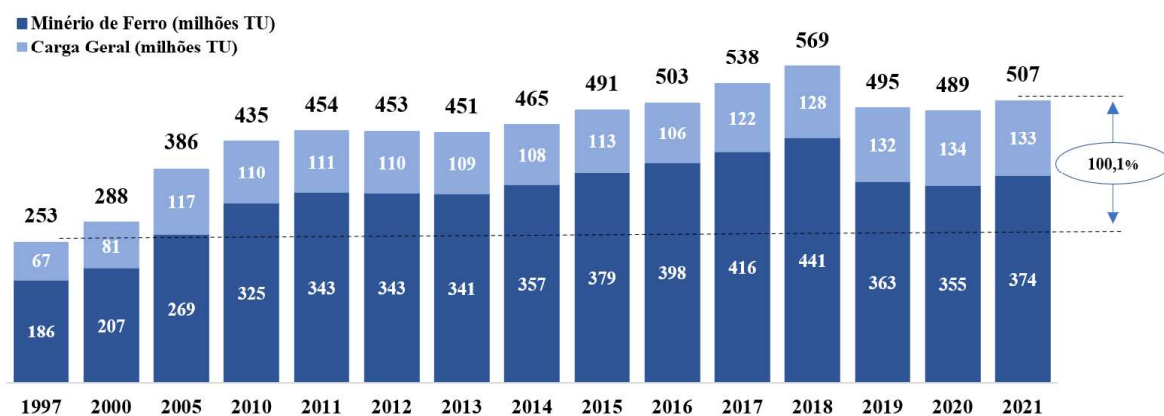


Figura 2.5: Evolução do volume ferroviário em toneladas úteis. Fonte: Autor

Do ponto de vista ambiental, uma composição ferroviária responsável pela movimentação dos grãos nas malhas ferroviárias brasileiras é capaz de transportar o equivalente a 368 caminhões, levando a uma redução significativa dos gases de efeito estufa (GEE), aproximadamente 85% a menos de emissão de CO₂ quando comparada ao modo rodoviário (ANTT, 2022a).

2.1.2.1 As emissões dos poluentes no transporte ferroviário

As atividades de transporte de cargas e logística representam de 8 a 10% das emissões globais de gases de efeito estufa. Em 2015, cerca de 7% das toneladas-quilômetro de carga foram transportados por modo ferroviário, resultando na emissão de 336 milhões toneladas de CO₂, cerca de 4% das emissões do setor de transportes. A maioria das emissões ferroviárias são oriundas da China (44%), enquanto os Estados Unidos são o segundo maior emissor, com 12% das emissões ferroviárias globais (GLEC, 2022).

Existem diversos fatores que podem influenciar negativamente nas emissões de poluentes no transporte ferroviário. Os tipos de combustíveis fósseis como o diesel, a exigência logística por velocidades mais altas dos trens a fim de reduzir o *lead time*, a quantidade excessiva de carga transportada, as condições meteorológicas adversas e a precária manutenção do material rodante (os vagões e as locomotivas) e da via permanente são apenas alguns exemplos.

Um esforço global e coordenado deste setor é fundamental para atingir as metas em prol do desenvolvimento sustentável. Com esta finalidade, um grupo de empresas se uniram e formaram a *Global Logistics Emissions Council* (GLEC) no ano de 2016, estabelecendo uma metodologia global para o cálculo e o reporte das emissões dos GEE no transporte de carga. Desde então, as empresas globais fizeram progressos significativos neste entendimento, rastreando as emissões de GEE ao longo da cadeia de suprimentos, estabelecendo os indicadores-chave de desempenho (KPIs) e as metas para esta finalidade. Ou seja, o objetivo final é fornecer uma metodologia comum e

conhecida para medir e relatar as emissões de GEE em toda a cadeia de fornecimento logística.

No gerenciamento da cadeia logística é possível a escolha por rotas mais eficientes do ponto de vista financeiro e, da mesma forma, com o auxílio de ferramentas robustas, atingir o objetivo por um transporte mais sustentável. Com isso, o crescimento do setor logístico não tem necessariamente que levar ao aumento das emissões. Melhores práticas operacionais, como a consolidação da carga, a escolha por um modal mais eficiente e o uso de tecnologias, direcionam à economia de combustível e têm o potencial para diminuir as emissões sem, necessariamente, haver a necessidade de investimento financeiro.

Atualmente, a venda de carbono é uma prática comum pelas empresas que buscam a redução dos GEE e o atingimento das metas de sustentabilidade. Este processo envolve a compra dos chamados “créditos de carbono” ou “certificados de redução de emissão” (CRE). A estratégia visa compensar as próprias emissões de GEE ou vender tais créditos excedentes ao mercado como forma de investimento (Rezaee et al., 2017). Entretanto, essa compensação das emissões não é uma solução definitiva para os problemas das mudanças climáticas. Deve haver uma conscientização de medidas mais efetivas como investimentos em tecnologias limpas e um planejamento estratégico da cadeia de suprimentos que considerem tais fatores como prioridades.

Nesta tese, para as estimativas do cálculo das emissões de CO₂, utiliza-se a metodologia de EcoTransIT (2023), que inclui parâmetros como: o peso da carga contida na composição ferroviária, a distância percorrida, o fator de consumo de combustível e o fator de emissão de CO₂ por litro de diesel consumido. O método para o cálculo das emissões no modo ferroviário é detalhado na Seção 3.4.

2.1.2.2 As tarifas no transporte ferroviário

As operações ferroviárias possuem custos fixos elevados devido ao alto valor do material rodante (vagões e locomotivas), das faixas de domínio, da dormentação da via permanente e das estruturas presentes nos terminais de origem e de destino das cargas. Por outro lado, os custos operacionais são relativamente baixos comparados a outros modos de transporte.

As tarifas ferroviárias são estimadas levando em consideração uma série de fatores, tais como: as faixas das distâncias percorridas pelas composições, o tipo de carga transportada e os vagões utilizados, a velocidade máxima permitida, as condições da via permanente, dentre outros. Os cálculos incluem tanto os custos fixos, como a manutenção e operação da infraestrutura ferroviária, quanto os custos variáveis, como o combustível consumido pelas locomotivas e as manutenções do material rodante (vagões

e locomotivas).

A ANTT é a agência reguladora responsável pela fiscalização do transporte ferroviário brasileiro. Como parte das suas responsabilidades, a ANTT estabelece o chamado “teto tarifário”. Entende-se por este conceito, o valor máximo que as concessionárias ferroviárias podem cobrar pelos serviços de transporte, com base em alguns fatores, tais como: os custos operacionais, os investimentos em infraestrutura, a mão de obra, dentre outros. O principal objetivo para esta regulação é evitar que ocorram abusos por parte dessas empresas na cobrança de tarifas e garantir preços justos e competitivos aos clientes dependentes deste serviço. Além disso, são estabelecidas de forma a incentivar o desenvolvimento do transporte ferroviário, refletindo os custos e os benefícios sociais deste tipo de transporte.

Anualmente, a ANTT disponibiliza um simulador tarifário com o objetivo de divulgar as estatísticas descritivas dos valores das tarifas de transporte praticados pelas concessionárias ferroviárias. Com base nessas informações, a agência reguladora determina o teto tarifário a ser praticado (ANTT, 2022c). Dessa forma, para cada grupo de mercadorias, faixas de distâncias percorridas pelas composições e corredor ferroviário, é possível estimar a receita tarifária com base neste valor de referência.

Em alguns casos específicos acerca dos contratos de longo prazo envolvendo as concessionárias e os clientes usuários da estrutura ferroviária, o custo unitário do transporte pode ser mais baixo que o definido pela ANTT, já que pode haver por exemplo, coparticipação do cliente nos investimentos (capacitação da via permanente e compra de material rodante). Já em contratos de curto prazo e em momentos de escassez de oferta de transporte por falta de capacidade da malha ferroviária em períodos de safra, as tarifas de transporte são mais elevadas e se aproximam do teto tarifário e do valor praticado pelo modo rodoviário.

Seja k o tipo de *commodity*. A receita tarifária para cada *commodity* k no transporte ferroviário é definida pela equação 2.1:

$$R_{kij} = \sum_{z=1}^Z TU_z * TAU_{kij} \quad \forall k \in K, i \in I, j \in J \quad (2.1)$$

Onde:

- R_{kij} : receita tarifária para cada *commodity* k da origem i ao destino j
- TU_z : tonelada útil da composição ferroviária z
- TAU_{kij} : tarifa unitária da *commodity* k da origem i ao destino j

Os cálculos das tarifas para cada concessionária e as faixas de distâncias para os fluxos de soja e milho são descritos na seção 3.5.

2.2 A otimização via simulação

O método de otimização via simulação é definido como um processo para encontrar os melhores valores das variáveis de entrada entre todas as possibilidades sem, necessariamente, avaliar cada alternativa. O objetivo é minimizar os recursos computacionais dispendidos e maximizar as informações obtidas em um experimento de simulação (Carson e Maria, 1997; Tsai e Zheng, 2013). Farhad (1992) descreve esse método como um problema de otimização no qual a função objetivo, as restrições ou ambas são respostas que só podem ser avaliadas por simulação computacional. Além disso, essas funções são frequentemente de natureza estocástica.

De acordo com a estrutura subjacente das variáveis de decisão, é possível dividir os problemas de otimização em duas categorias distintas: os problemas de otimização que contém apenas variáveis contínuas e os problemas de otimização que contém as variáveis inteiras. Para cada tipo de problema, vários métodos ou técnicas são descritos, tais como: os princípios metodológicos, os tipos de procedimentos para implementação, as aplicações, as vantagens e as desvantagens de cada técnica (Wang e Shi, 2013).

Não obstante, a otimização via simulação tem como objetivo fornecer o melhor conjunto de parâmetros do modelo de simulação que minimiza ou maximiza uma determinada medida de desempenho. A simulação é uma técnica descritiva capaz de prever o comportamento das diversas variáveis do sistema modelado, mas sem gerar soluções ótimas. Ou seja, é um método que se baseia na análise dos cenários que devem ser formulados pelo tomador de decisão (Chwif e Medina, 2007). Já a otimização é uma técnica prescritiva e pode conter diversas variáveis inteiras, reais ou binárias e o seu método de solução consiste em encontrar os valores ótimos dessas variáveis ao incorporar as técnicas para os modelos matemáticos e não lineares (Fu, 2002). Porém, é limitada ao modelar os sistemas complexos onde é necessário descrever de forma detalhada as interações entre as diversas partes que compõem o problema ou terem que lidar com um grande número de variáveis. Dessa forma, a otimização via simulação surge da junção das ferramentas de simulação e otimização, associando as vantagens contidas em cada um desses métodos.

Além disso, Tekin e Sabuncuoglu (2004) destacam as potenciais oportunidades para estudos, como a possibilidade de combinar variáveis discretas e contínuas em problemas de grande escala, a capacidade de lidar eficazmente com as restrições estocásticas e determinísticas, o tratamento eficaz de múltiplos resultados em simulação, a consolidação de várias técnicas e sua sinergia com algoritmos híbridos e a possibilidade de comparar o desempenho de diferentes abordagens e aplicações.

Neste tipo de abordagem, o modelo de simulação cria a superfície de resposta esperada (função objetivo) a partir das diversas configurações dos parâmetros de entrada.

Adicionalmente, o modelo de otimização é o responsável por identificar o melhor conjunto de parâmetros a partir da superfície de resposta disponível (Fu, 2002).

A construção iterativa de modelos substitutos baseados nos resultados da simulação são capazes de capturar a relação causal entre as principais variáveis de decisão que podem ser otimizadas posteriormente para economizar esforço computacional (Wan et al., 2005). Atualmente, existem vários *softwares* de simulação de eventos discretos que possuem otimizadores integrados e com métodos ou técnicas de solução avançados (Swain, 2005). A Tabela 2.1 consolida estas informações.

Tabela 2.1: *Softwares* específicos de simulação com seus respectivos otimizadores.

<i>Softwares</i> de simulação	Empresa	País sede	Otimizador	Método de otimização
@Risk	Palisade Corp.	E.U.A.	RiskOptimizer	AG
Anylogic	XJ Technologies	Rússia	Optquest	SS, BT, RN
Arena	Rocwell Automation	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Automod	AutoSimulations Inc.	E.U.A.	AutoStat	AE e AG
Cristal Ball	Deciosion Engeneering	E.U.A.	Optquest	SSS, BT, RN
CSIM 19	Deciosion Engeneering	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Enterprise D. Simulation	Production Modeling Corp.	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Enterprise D. Studio	Enterprise Dynamics, Inc.	Holanda	Optquest	SS, BT, RN
Extend Industry	Imagine That, Inc.	E.U.A.	Extend Optimizer	AE
Extend OR	Imagine That, Inc.	E.U.A.	Extend Optimizer	AE
Extend Suite	Imagine That, Inc.	E.U.A.	Extend Optimizer	AE
FlexSim	FlexSim Software, Inc.	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Micro Sant Charp	Micro Analysis Design	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Process Model	Promodel Inc.	E.U.A.	SimRunner	AE e AG
Promodel	Promodel Corp.	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Service Model Optimization	Promodel Corp.	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
SimCad PRO	CreateSoft, Inc.	E.U.A.	Integrado ao simulador	Repetição de cenários
Simul8	Simul8 Corp.	E.U.A.	Optquest	SS, BT, RN
Witness	Lanner Group	Inglaterra	Witness Optimizer	SA e BT

AE (Algoritmos evolutivos), AG (Algoritmos genéticos), BT (Busca tabu), DES (*Discrete event simulation*)
RN (Redes neurais), SA (*Simulated annealing*), SS (*Scatter search*)

A otimização via simulação permite modelar características operacionais de planejamento logístico intermodal com diferentes objetivos, incluindo a redução dos custos e das emissões, o aumento da confiabilidade do tempo de viagem no transporte ou a variabilidade de demanda (Liotta et al., 2016; Hrušovský et al., 2017). Alguns estudos também visam melhorar a eficiência multimodal das rotas de transporte para reduzir o tempo de viagem e, conseqüentemente, o consumo de energia e as emissões de carbono (Tran e Lam, 2021; Wang et al., 2020).

Os pesquisadores adotaram a otimização via simulação em várias aplicações (Chávez et al., 2015; Pinto et al., 2015; Felberbauer et al., 2020; Wang et al., 2021; Shahabi et al., 2021; Rachih et al., 2022) apresentando uma tendência de acordo com as análises de periódicos relevantes (Huerta-Barrientos et al., 2014; Amaran et al., 2016; Crainic et al., 2018; Oliveira et al., 2019).

Na abordagem proposta nesta tese, o modelo de simulação cria a superfície de resposta esperada para as diversas configurações das locomotivas, dos vagões, dos volumes e das rotas. Em seguida, o modelo de otimização considera a superfície de resposta

como sua função objetivo, buscando o melhor conjunto de parâmetros de acordo com essa superfície de resposta específica a partir da heurística *Scatter Search* como principal estratégia, da Busca Tabu como método secundário e das Redes Neurais como o último método.

A heurística *Scatter Search* gera um conjunto inicial de vetores de solução para designar um subconjunto dos melhores vetores para ser as soluções de referência. Em seguida, o algoritmo forma a combinação linear dos subconjuntos de pontos como referência atual e gera novos pontos. Na próxima etapa, o algoritmo seleciona uma combinação das melhores soluções para utilizar como pontos de partida em uma nova aplicação dos processos heurísticos. Essas etapas se repetem até um número especificado de iterações ou até que se alcance os critérios de parada definidos. Já a Busca Tabu usa a memória adaptável para proibir a busca de reinvestigar soluções já avaliadas, orientando assim, a busca para uma solução ótima global. Por fim, a Rede Neural é utilizada para filtrar as soluções ruins e impedir que a simulação as avalie. Ou seja, trata-se de um modelo de previsão para ajudar o sistema a acelerar a sua busca e evitar a necessidade de avaliar uma função objetivo de baixa qualidade para um recém-criado ponto de referência (Eskandari et al., 2011).

2.2.1 *Scatter Search* (SS)

A construção de modelos de simulação que retratam um sistema real têm como consequência a demora na execução devido à grande área de decisão a ser explorada (Li et al., 2010). Esta longa pesquisa é encurtada ao se construir uma heurística que é caracterizada por procurar o melhor conjunto de variáveis de decisão, sendo classificadas como locais ou globais, dependendo das estratégias de busca (Barton, 2009). As chamadas meta-heurísticas geram apenas aproximações locais, enquanto que a segunda classe (as globais) podem gerar soluções globalmente ótimas. A construção da heurística pode ser feita tanto no início da otimização, ou dinamicamente, à medida que a simulação progride.

Dessa forma, as heurísticas são métodos aproximativos que buscam soluções de boa qualidade, muitas vezes ótimas ou sub-ótimas, nos quais os métodos exatos não atendem satisfatoriamente devido à limitação de descrever detalhadamente as interações entre as diversas partes que compõem o problema. Para Banks et al. (2005), a existência de variabilidade na amostragem das variáveis de entrada obriga muitas vezes a necessidade da otimização possuir heurísticas robustas e poderosas. Muitas abordagens heurísticas foram desenvolvidas para problemas de otimização que, apesar de não garantir encontrar a melhor solução, mostram-se eficientes em problemas práticos complexos.

O uso de heurísticas como o algoritmo genético e a *Scatter Search* (SS) na otimização via simulação é recorrente e tem se mostrado eficaz (M.Gendreau e J.Potvin, 2009). É uma abordagem orientada por informações, explorando o conhecimento derivado do espaço de pesquisa, as soluções dentro do espaço e as possíveis trajetórias através do espaço ao longo do tempo. A combinação desses fatores cria um processo de solução eficaz com capacidade de resolver os problemas. Basicamente é um método de busca populacional, cujas soluções são obtidas através da combinação de outras soluções, tendo a sua origem em estratégias propostas na área de programação inteira.

A heurística SS foi desenvolvida por Glover (1977) apresentando-se como um método de combinação de duas ou mais soluções do conjunto de referência, atribuindo pesos à combinação dessas soluções.

A SS apresenta algumas similaridades com os algoritmos genéticos, mas difere-se pelo tamanho da população menor e pelo uso das estratégias determinísticas em detrimento das probabilísticas, com o objetivo de atingir a diversificação e a intensificação, com base em um critério sistemático. O uso da memória é um conceito fundamental nesse método, que utiliza o histórico de pesquisa para guiar todo o processo, evitando re-investigar as soluções já avaliadas. De forma geral, o algoritmo do SS é composto por três passos, segundo Glover et al. (1998):

1. Diversificar: gerar um conjunto P variado de soluções iniciais distantes entre si de forma a garantir a diversidade e avaliá-las;
2. Melhorar: a partir do subconjunto de boas soluções geradas no Passo 1, melhorá-las iterativamente através de uma busca local e avaliá-las;
3. Criar e atualizar: com base no conjunto de soluções P geradas no Passo 1 e Passo 2, cria-se um subconjunto de soluções de alta qualidade e outro subconjunto de soluções diversas, gerando uma estratégia de intensificação e de diversificação (*ConjRef*).
4. Gerar: a partir das soluções contidas no conjunto de referência (*ConjRef*), gerar novos subconjuntos, nos quais será aplicado um método de combinação de forma exaustiva.
5. Combinar: a partir dos subconjuntos obtidos no passo 4, combiná-los a partir de atualização dinâmica (*ConjRef*) ou estática (combinação de todas as soluções) e, ao término, aplica-se o método de melhoria às melhores soluções geradas.

A SS é baseada em formulações e estratégias introduzidas na década de 60. Entretanto, os seus princípios e conceitos foram propostos na década de 70 e sua disseminação com aplicações em diversos sistemas somente se deu na década de 90.

2.2.2 Busca Tabu (BT)

O método *Tabu Search* também conhecido como Busca Tabu originou-se nos trabalhos de Glover (1986) e Hansen (1986). É uma das metaheurísticas mais difundidas, já que produz soluções de alta qualidade para problemas combinatórios complexos, tais como: *scheduling*, roteirização e sequenciamento.

É um procedimento iterativo de otimização local que admite soluções de piora. Ou seja, trata-se de uma heurística de busca pelo ótimo local a partir da exploração do espaço das soluções em sua vizinhança, utilizando-se de estruturas organizadas e flexíveis de memória para armazenar o conhecimento sobre o espaço de busca.

Para gerar uma solução inicial em um algoritmo mais simples, é necessário definir alguns critérios importantes e componentes básicos, tais como: os movimentos e os atributos para se explorar o espaço de soluções, os critérios de paradas e da escolha da próxima solução vizinha, a memória de curto prazo para armazenar as regras de proibição do atributo selecionado e, por fim, o critério de aspiração. Entende-se este último como uma condição em que um movimento se torna permitido apesar de estar na lista tabu. Os critérios de aspiração mais comuns são:

- Aspiração por objetivo global: consiste em retirar a condição tabu de um movimento caso seja produzida uma solução com a melhor avaliação global.
- Aspiração por objetivo regional: um movimento tabu perde sua condição quando for gerada uma solução melhor que a melhor encontrada na região atual de busca. Uma forma de se delimitar a região atual de busca e registrar a melhor solução encontrada em um passado recente, é utilizar o valor dessa solução como critério para aspiração.
- Aspiração *default*: se todos os movimentos possíveis são tabus e não é possível aplicar outro critério de aspiração, então o movimento mais antigo perde sua condição tabu.

Já para os algoritmos de Busca Tabu mais sofisticados há a utilização da memória de longo prazo (ou soluções de elite) para auxiliar nas estratégias de diversificação, intensificação e/ou oscilação, o que proporciona explorar melhor o espaço das soluções e evitar que a busca fique presa em certas regiões do espaço de soluções. A vantagem é que, ao invés de ocorrer uma simples reinicialização do algoritmo, com a memória de curto prazo diminui-se consideravelmente o risco de voltar a visitar uma mesma região do espaço de soluções.

A intensificação é caracterizada por concentrar a busca em regiões promissoras do espaço, em torno de boas soluções, modificando as regras de escolha da próxima

solução ao combinar os movimentos com a estrutura destas soluções. Entende-se por diversificação, a busca em regiões ainda inexploradas. Isto se torna possível ao penalizar os movimentos que utilizem elementos frequentemente presentes em soluções visitadas e/ou incentivando a entrada daqueles pouco utilizados anteriormente. Já a oscilação estratégica trata-se da alternância entre intensificação e diversificação.

2.2.3 Redes Neurais (RN)

A origem das Redes Neurais, ou computação neural surge na década de 1940 com o trabalho de McCulloch e Pitts (1943). Este método fornece uma variedade de novas técnicas para resolver problemas com padrões de reconhecimento, análise de dados e controle. São caracterizadas pela alta velocidade de processamento, pela capacidade de aprender a solução para um problema a partir de um conjunto de exemplos, pela flexibilidade a novos ambientes por meio do processo de aprendizagem com base na informação contida nos dados de treinamento e pela tolerância a falhas.

A inspiração para esta metodologia vem originalmente de estudos dos mecanismos de processamento das informações em sistemas nervosos biológicos, particularmente no cérebro humano (Bishop, 1994). Na forma mais geral, uma RN é uma máquina projetada para modelar a maneira como o cérebro realiza uma determinada tarefa e alcança um bom desempenho ao empregar uma interligação maciça de células computacionais simples denominadas “neurônios” ou “unidades de processamento” (Haykin, 2001). Esses “neurônios” possui várias entradas, que correspondem às conexões sinápticas com outras unidades semelhantes a ele e uma saída, cujo valor depende da somatória ponderada de todas as saídas dos outros neurônios a ele conectado.

O conhecimento sobre o problema está armazenado a partir dos exemplos disponíveis. Assim, o algoritmo de aprendizagem generaliza essas informações e memoriza o conhecimento dentro dos parâmetros adaptáveis da rede de neurônios que interagem entre si. Ou seja, as RN possuem a capacidade de coletar, utilizar e armazenar as informações baseadas nos experimentos (algoritmos de aprendizagem).

O aprendizado das RN pode se dar de maneira supervisionada ou não supervisionada. No primeiro caso, o instrutor confere o quanto a rede está próxima a uma solução aceitável, adaptando o treinamento caso necessário. No segundo caso, as saídas da rede não são conhecidas, diferenciando classes de padrões diferentes dos dados apresentados à rede, por meio de algoritmos baseados nos conceitos de vizinhança e de agrupamento.

2.3 Limitações da literatura e as principais contribuições deste trabalho

No contexto de sistemas de transporte sustentáveis, De La Torre et al. (2021) revisaram alguns dos métodos mais populares para sua análise usando modelos de otimização e de simulação. No entanto, o planejamento da cadeia de suprimentos dos grãos tem sido modelado principalmente com técnicas de otimização, além de abordar a sustentabilidade. Neste mesmo contexto de otimização, Sun et al. (2015) apresentam uma revisão sistemática sobre o problema de planejamento de roteamento de cargas no transporte multimodal, trazendo os aspectos de formulação de modelos e o desenho dos algoritmos utilizados.

Neste sentido, ao abordar a intermodalidade sustentável, Baykasoglu e Subulan (2016) apresentam um modelo de programação inteira mista para o problema de planejamento tático sustentável de carga multiobjetivo, multimodo e multiperíodo de grande escala na Turquia. O modelo é capaz de lidar com várias decisões simultaneamente, envolvendo a seleção do modo de transporte, a alocação periódica de carga (sentido importação ou exportação) e sua consolidação nos portos marítimos e estações ferroviárias de transbordo. O objetivo deste estudo é minimizar os custos gerais de transporte, considerando a máxima satisfação do cliente, minimizando o tempo total de trânsito rodoviário, marítimo e ferroviário, além das quantidades totais de CO₂ emitidas pelos diferentes modos de transporte.

Além disso, os trabalhos exploram o planejamento da cadeia de suprimentos, considerando o tempo de permanência (Mogale et al., 2018), os desperdícios (Maiyar e Thakkar, 2019), a incerteza na demanda (Mogale et al., 2020) ou as interrupções/anomalias em um sistema de larga escala na indústria de alimentos dos grãos sob um aspecto sustentável (Maiyar e Thakkar, 2020), porém, todos sob uma perspectiva de otimização.

Mogale et al. (2018) têm o objetivo de determinar o conjunto de soluções para resolver o *trade-off* entre objetivos conflitantes por meio de modelagem matemática multiobjetivo: o custo total da cadeia de suprimentos dos grãos e o *lead time* total (tempo de trânsito e tempo de permanência), com as decisões de transporte acerca da localização / alocação dos silos de grãos e da capacidade dos recursos envolvidos. O estudo propõe a resolução do problema através da otimização e, embora cite um problema real na Índia, as análises de sensibilidade são realizadas apenas acerca da qualidade das soluções. Além de não abordar a sustentabilidade, não são incorporados os fatores estocásticos nos diversos parâmetros presentes no modelo.

Da mesma forma, Maiyar e Thakkar (2019) desenvolvem um modelo robusto linear inteiro misto, considerando a complexidade do transporte intermodal e trazendo a

sustentabilidade para o transporte dos grãos ao considerar as emissões dos gases de efeito estufa. Porém, propõem apenas uma abordagem mono-objetivo, enquanto na prática, é importante capturar o *trade-off* entre as facetas econômica e ambiental da sustentabilidade.

Por fim, Maiyar e Thakkar (2020) propõem uma ferramenta eficaz de apoio à decisão para resolver o problema de transporte dos grãos em tempo real e com um foco ambiental, considerando os desperdícios com minimização do custo total da rede de abastecimento e da emissão de gases de efeito estufa por meio de uma formulação bi-objetivo. Entretanto, da mesma forma que os estudos anteriores, não incorpora fatores probabilísticos importantes e intrínsecos à abordagem do estudo.

Por outro lado, Crainic et al. (2018) e Elbert et al. (2020) estruturam estudos sobre a literatura relevante e recente, identificando as principais descobertas, as tendências e os caminhos futuros dos trabalhos envolvendo otimização via simulação acerca dos sistemas intermodais de transporte de carga em várias dimensões, tais como: os modos envolvidos, as extensões geográficas, os serviços que compõem a rede, os horizontes de tempo considerados, os níveis de planejamento e as metodologias utilizadas.

Neste contexto, Silveira (2017) propõe uma metodologia de otimização via simulação para o dimensionamento da infraestrutura de um sistema logístico intermodal para o transporte de *commodities*, visando a minimização dos custos logísticos e, conseqüentemente, a maximização do uso dos recursos. Busca-se a otimização dos custos logísticos relacionados ao dimensionamento dos armazéns e das composições ferroviárias. Embora tenha algumas facetas semelhantes ao proposto nesta tese, o estudo não possui um escopo logístico de grande porte e não traz uma abordagem voltada à sustentabilidade.

Dentre os estudos que envolvem a metodologia de otimização via simulação no contexto do planejamento da cadeia de suprimentos, destacam-se os três principais. O primeiro é um plano de transporte intermodal incluindo os custos e a emissão de CO₂ que tem o foco no planejamento de curto prazo de última milha no modo rodoviário, envolvendo apenas 20 localidades (Hrušovský et al., 2017). O segundo traz os efeitos da incerteza da demanda no desempenho econômico e ambiental, mas não aborda a cadeia de grãos e não detalha o planejamento de transporte (Liotta et al., 2016). Por fim, há um problema de maximização do lucro dos operadores ferroviários com a minimização da fila de espera dos clientes frente às emissões de CO₂ (Zhang et al., 2019).

Adicionalmente, existem estudos semelhantes sobre o planejamento de exportação dos grãos, embora não englobem todo o escopo contido na proposta desta tese. Layeb et al. (2018), por exemplo, modelam o transporte de carga multimodal para o transbordo de contêineres na região da bacia de Danúbio na Europa e utilizam a ferramenta de otimização via simulação multiobjetiva para minimizar simultaneamente os custos

de transporte, os tempos das viagens através da penalidade por atrasos e as emissões de CO₂. No entanto, o modelo tem um horizonte de planejamento de curto prazo (horizonte semanal) e trata-se da aplicação de um estudo em uma pequena região (contendo 10 nós ou terminais com 32 arcos ou serviços).

A Tabela 2.2 apresenta as abordagens adicionais para o planejamento da cadeia de suprimentos utilizando a metodologia de otimização via simulação. No entanto, existe uma lacuna para a qual esta tese pode contribuir.

Tabela 2.2: Os estudos recentes em comparação com a presente tese proposta.

Artigo	DES ⁽¹⁾	SS ⁽²⁾	SC integrada	Ferrovias	Intermodalidade	Extensão nacional	Sustentabilidade	Abordagem Financeira
Bahramian e Bagheri (2015)	✓			✓				
Sahay e Ierapetritou (2015)			✓					
Baykasoglu e Subulan (2016)					✓	✓	✓	✓
Crainic et al. (2016)		✓						✓
Liotta et al. (2016)	✓		✓		✓		✓	
Park e Kim (2016)						✓		
Ye e You (2016)			✓					✓
Chávez et al. (2017)	✓							✓
Hrušovský et al. (2017)	✓				✓		✓	✓
Mesabbah et al. (2017)	✓							✓
Silveira (2017)	✓	✓	✓		✓			✓
Yegul et al. (2017)	✓							
Layeb et al. (2018)	✓				✓		✓	
Moallemi et al. (2018)	✓							
Mogale et al. (2018)			✓	✓	✓	✓		✓
Maiyar e Thakkar (2019)			✓	✓	✓		✓	✓
Zhao et al. (2019)	✓				✓			✓
Zhang et al. (2019)				✓			✓	✓
Felberbauer et al. (2020)	✓				✓			✓
Ghasemi e Khalili-Damghani (2020)	✓							✓
Mogale et al. (2020)			✓		✓		✓	✓
Maiyar e Thakkar (2020)			✓	✓	✓		✓	✓
Mommens et al. (2020)					✓	✓		✓
Park (2020)			✓					✓
Shahabi et al. (2021)	✓			✓				
Sharifnia et al. (2021)			✓					✓
Solomon et al. (2022)	✓	✓						
Tese proposta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1: DES (*Discrete event simulation*)

2: SS (*Scatter search*)

Para lidar com tais limitações e lacunas na literatura (Huerta-Barrientos et al., 2014; April et al., 2003), esta tese propõe um modelo dinâmico e utiliza a otimização via simulação para planejar a capacidade e integrar os diversos elos presentes em um sistema logístico de grande porte, abordando a sustentabilidade, o atendimento ao nível de serviço com a exportação das *commodities* e estimando os resultados financeiros do plano de transporte logístico.

Assim, o estudo em questão propõe uma nova abordagem, representando as operações multimodais (terminais, ferrovias e portos) para uma cadeia de suprimentos integrada e responsável pela exportação dos grãos a nível nacional, de um país com grande extensão territorial e, sugerindo uma operação otimizada e sustentável, que minimiza as emissões de CO₂ atendendo aos requisitos da demanda e computando estimativas financeiras no plano de transporte.

Além disso, os sistemas de distribuição de soja e de milho incluem corredores multimodais, ou seja, o modelo representa um sistema ferroviário, mas também insere os sistemas rodoviários, os sistemas de terminais de cargas e os sistemas portuários, de forma a permitir o fluxo de cargas dos terminais de origem aos portos de destino.

Adicionalmente, a abordagem de modelagem através da simulação de eventos discretos representa a atual alocação dos recursos ferroviários que produz altas emissões de CO₂.

Por isso, propõe-se um plano mais sustentável por meio do método de otimização via simulação, a partir da heurística SS, BT e RN, que ajusta as diversas filas presentes na cadeia de suprimentos e o balanceamento geral dos vagões, das locomotivas e do volume, produzindo o mínimo de emissões de CO₂.

Capítulo 3

Método

“Our characters are the result of our conduct.”

Aristóteles

Esta seção apresenta os elementos do modelo de otimização via simulação e suas restrições. São descritos as especificações do modelo, os parâmetros de entrada, as variáveis de saída, as premissas e simplificações adotadas. Os fluxogramas apresentados ao longo desta seção ilustram o processo de modelagem conceitual dos sistemas logísticos (terminais, ferrovias e portos).

A seção também descreve as peculiaridades e limitações do sistema ferroviário, como por exemplo: (i) há vagões e locomotivas que só podem circular em trechos específicos devido aos diferentes tipos de bitolas para acesso aos portos; (ii) a produção dos grãos geralmente ocorre em áreas sem infraestrutura ferroviária que exigem caminhões para transportar os produtos até os terminais intermodais. Esses *hubs* oferecem uma capacidade de armazenamento limitada; (iii) há uma concentração de carga nas origens em períodos de acentuada sazonalidade dos grãos, limitando o escoamento logístico; (iv) empresas compradoras dos grãos, conhecidas como *traders*, podem optar por atrasar a comercialização devido às oscilações dos preços, gerando ainda mais concentração de cargas.

Portanto, os terminais intermodais são pontos de diversas decisões, como alterações dos “arcos” das rotas e, até mesmo, a modificação do porto de destino da carga.

3.1 O modelo conceitual

O desenho do modelo conceitual é uma das etapas mais críticas e importantes de um projeto de simulação e deve ser realizada de maneira criteriosa (Pidd, 2004; Robinson, 2008). No entanto, muitas vezes é o estágio menos compreendido no processo de modelagem (Liu et al., 2011; Remiel et al., 2014; Furian et al., 2015). Além disso, esta etapa dá suporte às demais como a verificação e a validação do projeto, uma vez que registra a lógica do modelo.

Nesse sentido, admitindo que os portos brasileiros exportam *commodities* do tipo k , a modelagem compreende as etapas de chegada do caminhão y ao ponto de origem (zonas de produção) i em terminais multimodais, onde ocorrem as operações de armazenagem, movimentação nos pátios do terminal e carregamento dos vagões. Cada terminal de origem i possui uma capacidade individual de armazenamento e produção, além de ser responsável por restringir a operação de determinados tipos de *commodities*.

Posteriormente, a composição z é escolhida para o transporte até o ponto de destino j (portos), respeitando a quantidade disponível de vagões e de locomotivas. Além disso, não são todas as composições z que podem circular em todos os corredores ferroviários devido às restrições dos diferentes tipos de bitolas existentes nas ferrovias brasileiras, conforme detalhado na Seção 2.1.2. Essa diferenciação é importante para que apenas o material rodante específico daquele tipo de bitola possa circular na malha ferroviária semelhante ao seu eixo.

A descarga dos vagões, as operações nos armazéns e o posterior despacho da carga através dos navios ocorrem no ponto de destino j . Cada ponto de destino tem sua capacidade, produtividade e a respectiva mercadoria a ser operada em cada carregador de navios.

A chegada dos navios s é aleatória, porém, baseada em uma sazonalidade mensal pré-definida com diferentes embarcações que realizam as operações de navegação para a entrada no canal, a pré-atracação, o embarque, a pós-atracação e a navegação de saída neste canal.

A navegação de entrada é a atividade que compreende a chegada do práctico até a atracação da embarcação, compreendendo o percurso da embarcação pelo canal de acesso ao porto desde sua entrada até as instalações do píer. Por outro lado, atracação é a fixação da embarcação ao berço, onde são realizadas as atividades de embarque e desembarque das mercadorias. Desatracar é a operação oposta à atracação. A atividade de pré-carregamento diz respeito à inspeção das condições físicas da embarcação, à limpeza dos porões (se necessário), à adoção de procedimentos de segurança, à verificação de documentos e à liberação de ordens para iniciar o carregamento ou descarregamento. A atividade de pós-carregamento inclui a verificação das retenções e a liberação da do-

cumentação fiscal. Após o processo de embarque portuário, o retorno dos trens aos terminais ferroviários é definido respeitando as regras de balanceamento da carga ao longo da cadeia logística.

Além disso, o modelo deve estabelecer a quantidade de cada tipo de mercadoria a ser transportada da origem i até o destino j , utilizando a composição ferroviária z (modelo de trens com quantidade de vagões e de locomotivas definidos) em cada trecho ferroviário para respeitar a quantidade de material rodante disponível e a capacidade dos terminais de origem e destino. Assim, o plano deve estabelecer a quantidade da *commodity* do tipo k a ser exportada na rota de origem i ao destino j com a menor emissão de CO₂ pela composição ferroviária z . Os parágrafos a seguir descrevem as entidades, os recursos, os atributos, as variáveis e as atividades detalhadas no modelo de simulação de eventos discretos.

Uma entidade é considerada qualquer componente no modelo que retém sua identidade ao longo do tempo (Chwif e Medina, 2007). Por exemplo, as entidades da ferramenta logístico em questão são o caminhão y , a composição ferroviária z (formado por locomotivas e por vagões), e a embarcação s . Os caminhões y e as embarcações s são entidades temporárias que são geradas no modelo de simulação e, após realizarem suas respectivas atividades, saem do sistema. Por outro lado, as composições ferroviárias z são entidades permanentes, pois operam em circuito fechado durante todo o processo de simulação (vide Figura 3.1).

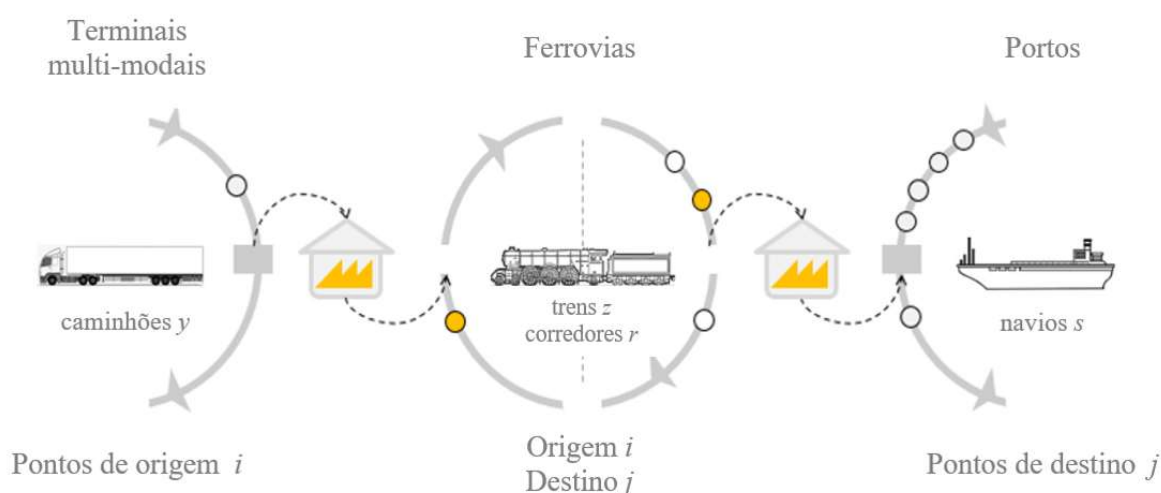


Figura 3.1: Sistema logístico multimodal em circuito fechado. Fonte: Autor.

Já os recursos são os equipamentos e as estruturas necessárias de todos os tipos para o funcionamento do sistema, por exemplo: as estruturas de carga ou descarga de caminhões em terminais ou dos vagões em terminais e portos, dos carregadores de navios, dos canais de navegação e dos berços para atracação (ver Figura 3.1).

Um atributo define as características ou propriedades de uma entidade. Após definir um atributo, apenas o valor daquela entidade específica será alterado, mesmo que esse valor seja alterado ao longo do processo. Portanto, quando se deseja alterar o valor de todas as entidades, é necessário utilizar “variáveis” e não atributos. As variáveis (de entrada ou de saída) estão presentes no modelo que representa o sistema atual. Os parâmetros de entrada se enquadram em duas categorias: aquelas que possuem as informações gerais e as que trazem informações sobre a produtividade. Essas variáveis também se transformam ao longo das replicações e são divididas em variáveis de controle para a otimização e variáveis controle para a simulação. As atividades ou processos são ações executadas que requerem tempo e recursos e afetam diretamente as entidades.

As composições ferroviárias z presentes no modelo de simulação são inseridas em subsistemas “vazias”. Ou seja, nesse momento inicial, a composição ferroviária recebe os atributos que a qualificam como entidade e esta verifica quais as mercadorias deve transportar e qual o terminal tem maior necessidade de recebê-lo no momento.

Os parâmetros do modelo de otimização e as variáveis de decisão dos algoritmos de simulação são descritos na Tabela 3.1. O Algoritmo 1 define a atribuição de destino das composições ferroviárias z que se encontram nos portos j e irão se dirigir aos terminais i .

Tabela 3.1: Parâmetros e variáveis - Modelo de otimização e Algoritmos de simulação.

Parâmetro	Descrição	Unidade
D_{ki}	Produção da <i>commodity</i> k no terminal de origem i	t
D_{kj}	Demanda da <i>commodity</i> k no porto de destino j	t
W_{a_z}	Número de vagões totais disponíveis para o tipo da composição ferroviária z	vagões
L_{a_z}	Número de locomotivas totais disponíveis para o tipo da composição ferroviária z	locomotivas
Sc_i	Capacidade total de carregamento no terminal de origem i (moega)	t
Bc_j	Capacidade total de carregamento no porto de destino j (berço)	t
Sa_{ki}	Capacidade total de armazenagem da <i>commodity</i> k no terminal de origem i	t
Sa_{kj}	Capacidade total de armazenagem da <i>commodity</i> k no porto de destino j	t
M	Valor inteiro elevado	escalar
Variável	Descrição	Unidade
ev_{kj}	Volume exportado da <i>commodity</i> k no porto de destino j	t
wu_z	Número de vagões utilizados na composição ferroviária z	vagões
lu_z	Número de locomotivas utilizadas na composição ferroviária z	locomotivas
sv_i	Volume total carregado no terminal de origem i	t
ov_j	Volume total exportado no porto de destino j	t
scu_{ki}	Estoque atual da <i>commodity</i> k no terminal de origem i	t
scd_{kj}	Estoque atual da <i>commodity</i> k no porto de destino j	t
stu_{ki}	Estoque em trânsito das composições ferroviárias com a <i>commodity</i> k para o terminal de origem i	t
std_{kj}	Estoque em trânsito das composições ferroviárias com a <i>commodity</i> k para o porto de destino j	t
acu_{ki}	Identifica onde é possível a operar a <i>commodity</i> k no terminal de origem i	binário
acd_{kj}	Identifica onde é possível a operar a <i>commodity</i> k no porto de destino j	binário

Algorithm 1 Atribuição de destino para as composições ferroviárias z que se dirigem aos terminais i .

```

1: procedure TERMINAIS
2:   for  $k = 1..p$  do
3:     for  $i = 1..n - 1$  do
4:        $ru_{ki} = D_{ki} - (Sa_{ki} - scu_{ki} - stu_{ki} + acu_{ki} * M)$ 
5:       if  $ru_{ki} > ru_{ki-1}$  then  $terminal = i$ 
6:       end if
7:     end for
8:   end for
9:   return  $terminal$ 
10: end procedure

```

A variável ru_{ki} neste Algoritmo 1 identifica o terminal de origem com maior prioridade para receber a composição ferroviária de acordo com as regras estabelecidas.

Suponha que a necessidade da carga (*commodity*) k e do terminal i seja nula. Outra rotina é verificar qual o terminal tem maior capacidade de armazenamento disponível no momento, direcionando, assim, a composição ferroviária z . Após chegar ao terminal de destino com maior necessidade, tal atividade é realizada se o equipamento de carregamento da composição ferroviária e os produtos estiverem disponíveis nos armazéns.

Da mesma forma, as composições ferroviárias z , agora carregadas com a *commodity* k , verificam qual o porto j tem a maior necessidade de recebê-la, de acordo com o Algoritmo 2. Este algoritmo se refere à atribuição de destino das composições ferroviárias z que se encontram nos terminais i e irão se dirigir aos portos j . Já a variável rd_{kj} especifica o terminal de destino com maior necessidade para receber a composição ferroviária de acordo com as regras estabelecidas.

Algorithm 2 Atribuição de destino para as composições ferroviárias z que se dirigem aos portos j .

```

1: procedure PORTOS
2:   for  $k = 1..p$  do
3:     for  $j = 1..m - 1$  do
4:        $rd_{kj} = D_{kj} - (Sa_{kj} - scd_{kj} - std_{kj} + acd_{kj} * M)$ 
5:       if  $rd_{kj} > rd_{kj-1}$  then  $porto = j$ 
6:       end if
7:     end for
8:   end for
9:   return  $porto$ 
10: end procedure

```

O Apêndice A.1 descreve os parâmetros gerais do modelo de otimização via simu-

lação e as variáveis controle referentes à otimização. Esses valores foram obtidos via modelo de otimização à medida que as variáveis de resposta foram atualizadas ao final da simulação. A Seção 3.4 detalha as variáveis de controle e como são utilizadas neste estudo.

O modelo conceitual representa o sistema logístico multimodal genérico envolvendo a movimentação dos diversos modais de transporte presentes no sistema: caminhões y , composições ferroviárias z e embarcações s . Os fluxogramas contidos na Seção 3.2 descrevem de forma macro as atividades e as principais decisões para modelagem de cada subsistema: os modos rodoviário, marítimo e ferroviário nos terminais i e nos portos j .

O modelo de simulação é uma abordagem genérica e, dessa forma, é utilizado para representar a prática atual, ou seja, visa atender a demanda agregada sem considerar a redução de emissão de CO₂. Consequentemente, os analistas priorizam a maior capacidade possível nos arcos i - j . A abordagem de otimização proposta auxilia a tomada de decisão nos níveis tático e estratégico no transporte multimodal para minimizar a emissão de CO₂ no transporte ferroviário, respeitando o atendimento ao volume e todas as restrições de capacidade definidas ao longo da cadeia de suprimentos.

3.2 O planejamento do transporte ferroviário sustentável

No modelo de otimização via simulação desenvolvido nesta tese, embora integrados, os macroprocessos da cadeia logística foram divididos conforme o modo de transporte: o rodoviário, o ferroviário e o portuário. Para entender a operação deste sistema em circuito fechado é fundamental a construção de um modelo conceitual.

A utilização de fluxogramas é um método muito comum nesta criação, sendo uma representação gráfica da relação entre as etapas do processo, as variáveis envolvidas e as possíveis decisões a serem tomadas. Antecipadamente à construção de um modelo computacional, permitem identificar as possíveis falhas ou as limitações lógicas do processo.

3.2.1 O módulo rodoviário

A entidade rodoviária representada por caminhões y chegam aos terminais de origem i em intervalos que seguem uma distribuição exponencial negativa, levando em consideração os fatores de volume e de sazonalidade das *commodities* k contidas em ANTT (2022a).

Neste ponto, recebem os seus respectivos atributos como o tipo de *commodity* k , a tonelada transportada TU_k e o indicativo de qual deve ser o terminal de origem i ao qual devem se dirigir.

Os parâmetros para o cálculo do intervalo médio entre caminhões s da *commodity* k chegando no terminal de origem i são descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros para o cálculo do intervalo médio de chegada entre caminhões y .

Parâmetro	Descrição	Unidade
NE_{kim}	Quantidade de caminhões com a <i>commodity</i> k no terminal de origem i no mês m	caminhões
IC_{kim}	Intervalo entre chegadas dos caminhões com a <i>commodity</i> k no terminal de origem i no mês m	dias/caminhão
D_m	Número de dias de um determinado mês m	dias
D_{ki}	Demanda da <i>commodity</i> k no terminal de origem i	t
Sz_{km}	Sazonalidade da <i>commodity</i> k no determinado mês m	%
TU_k	Carga média total contida em cada caminhão com a <i>commodity</i> k	t/caminhão

O parâmetro Sz_{km} indica o valor percentual do volume mensal da *commodity* k perante ao seu respectivo volume anual.

A Equação 3.1 indica a quantidade mensal de caminhões y necessária para o cumprimento da demanda sinalizada da *commodity* k para o terminal de origem i . Já a Equação 3.2 representa o valor médio para o intervalo entre as chegadas IC_{kim} dos caminhões com a *commodity* k no terminal de origem i naquele determinado mês m .

$$NE_{kim} = \frac{(D_{ki} * Sz_{km})}{TU_k} \quad \forall k \in K, i \in I, m \in M \quad (3.1)$$

$$IC_{kim} = \frac{D_m}{NE_{kim}} \quad \forall k \in K, i \in I, m \in M \quad (3.2)$$

Para os demais tempos das atividades rodoviárias executadas nos terminais de origem i , tais como, a recepção, a classificação, a pesagem e a descarga são adotados um tempo padrão para os terminais (vide Tabela 4.1 na Seção 4.1.1). A Figura 3.2 ilustra o fluxograma do processo rodoviário nos terminais de origem i .

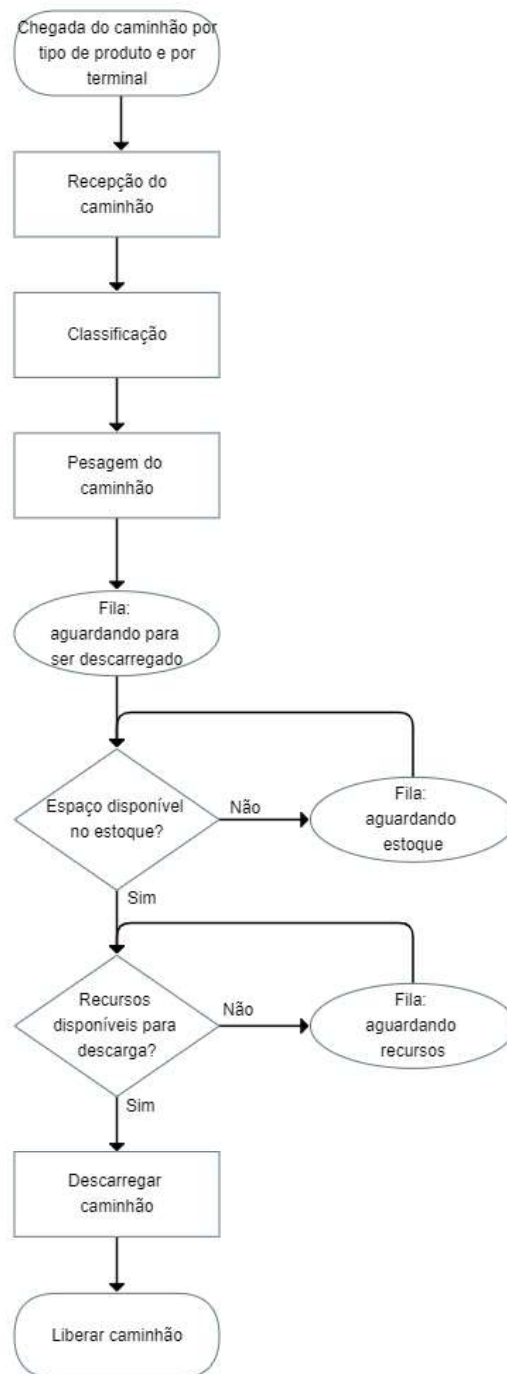


Figura 3.2: Fluxograma do módulo rodoviário. Fonte: Autor.

Após finalizar todas as atividades no terminal de origem i , a entidade caminhão y é descartada do sistema logístico.

3.2.2 O módulo dos terminais ferroviários

No momento inicial da rodada de simulação, a entidade composição ferroviária z é lançada nos pontos de destino j em que podem operar a *commodity* k e recebem algumas atribuições, tais como: a tonelada útil transportada total (TU_z) calculada como o produto do número de vagões pelo seu respectivo peso médio em toneladas.

Os fatores sensíveis à definição da capacidade dos terminais de origem i , como a armazenagem estática e a produtividade na descarga, são divididas por terminal e por tipo de *commodity* k , conforme as informações públicas contidas na Revista Ferroviária (2021). Os valores utilizados para este estudo estão detalhados na Tabela 4.4 na Seção 4.1.2.

A Figura 3.3 traz o detalhamento do fluxograma da entidade composição ferroviária z para o processo ferroviário nos terminais de origem i .

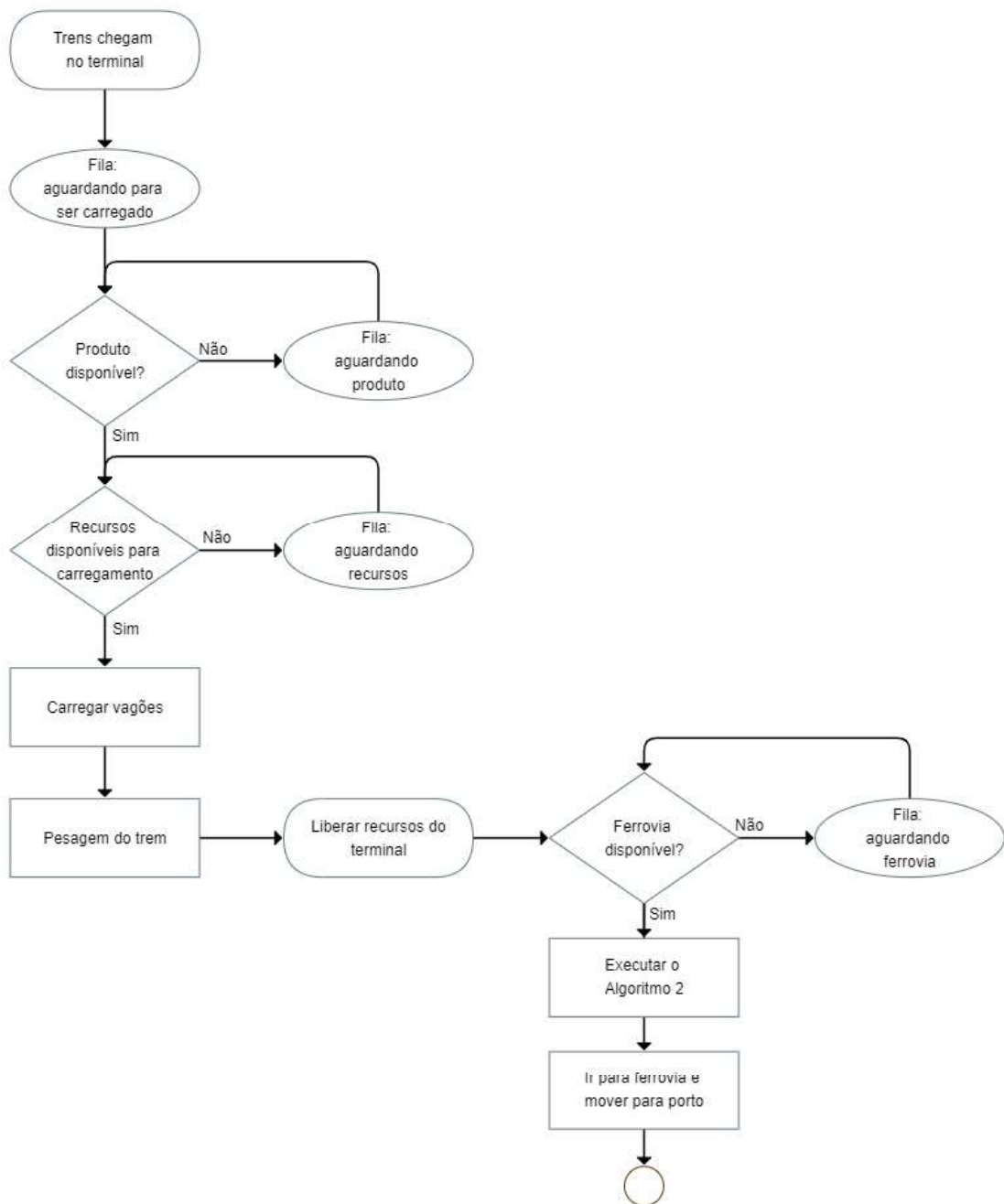


Figura 3.3: Fluxograma do módulo ferroviário nos terminais. Fonte: Autor.

Após finalizar as atividades no terminal de origem i , a composição ferroviária z executa o Algoritmo 2 e se dirige ao terminal de destino j atribuído neste processo. Ao finalizar o tempo do percurso no arco $i-j$, a entidade chega ao terminal de destino j e executa as atividades ferroportuárias, segundo o fluxograma da Figura 3.4.

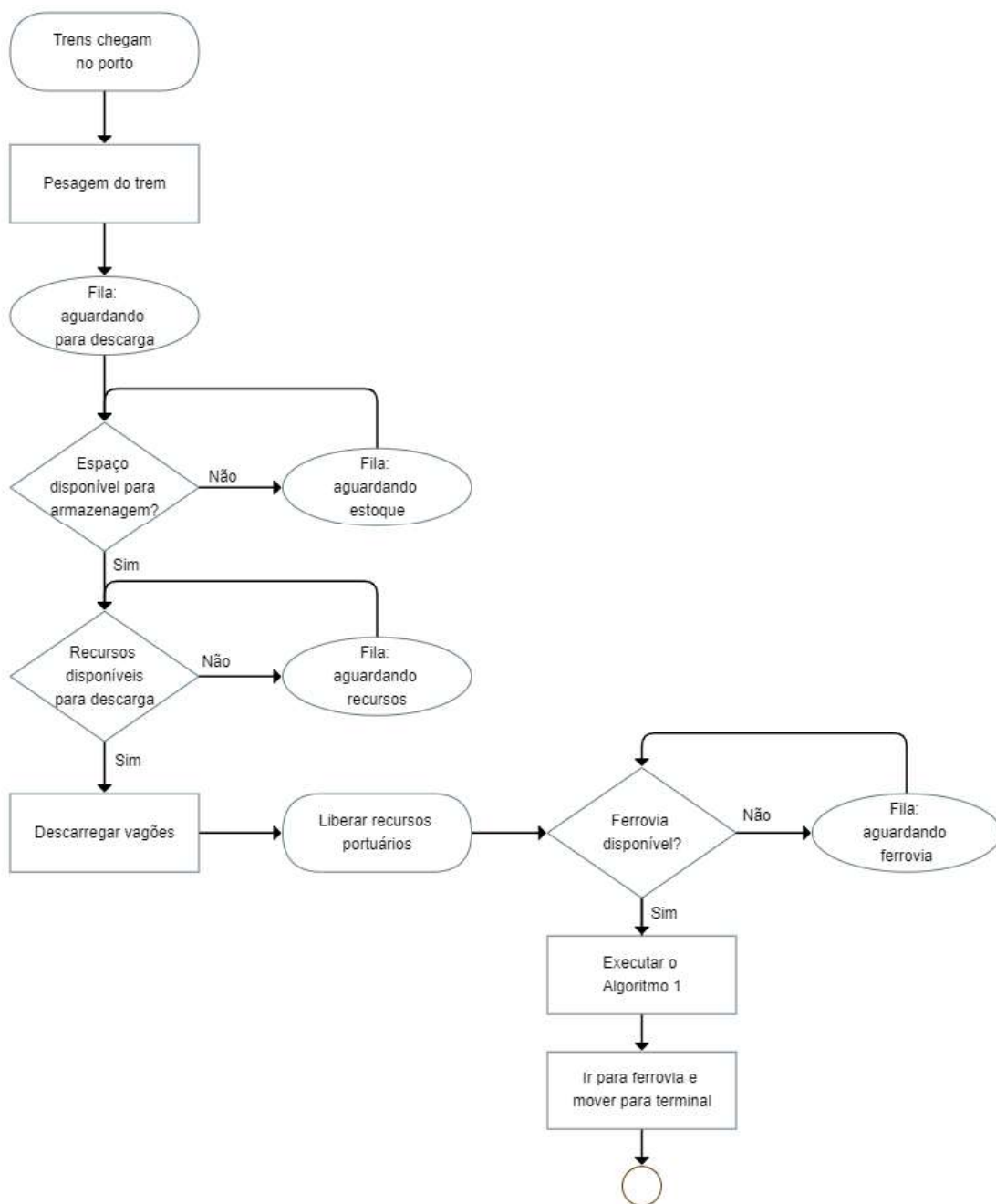


Figura 3.4: Fluxograma do módulo ferroviário nos portos. Fonte: Autor.

Após finalizar todas as atividades no terminal de destino j , a entidade composição ferroviária z executa o Algoritmo 1 e retoma novamente a modelagem lógica, agora em direção aos terminais de origem i .

As informações gerais dos portos j , tais como, a capacidade estática de armazenagem, o número de berços, o *deadweight* (DWT) médio dos navios, os tempos médios de operação, a produtividade média, dentre outros, estão disponíveis em ANTAQ (2018) e especificadas na Tabela 4.6 na Seção 4.1.4.

3.2.3 O módulo portuário

A entidade portuária representada por navios s chegam aos terminais de destino j em intervalos que seguem uma distribuição exponencial negativa, levando em consideração os fatores de volume e de sazonalidade das *commodities* k contidas em ANTT (2022a). Neste ponto, recebem os seus respectivos atributos como o tipo de *commodity* k , o *DWT* médio (TU_k) e o indicativo de qual deve ser o terminal de destino j ao qual devem se dirigir.

Os parâmetros para o cálculo do intervalo médio entre navios s chegando no terminal de destino j são descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros para o cálculo do intervalo médio de chegada entre navios s .

Parâmetro	Descrição	Unidade
NE_{kjm}	Quantidade de navios com a <i>commodity</i> k no terminal de destino j no mês m	navios
IC_{kjm}	Intervalo entre chegadas dos navios com a <i>commodity</i> k no terminal de destino j no mês m	dias/navios
D_m	Número de dias de um determinado mês m	dias
D_{kj}	Demanda da <i>commodity</i> k no terminal de destino j	t
Sz_{km}	Sazonalidade da <i>commodity</i> k no determinado mês m	%
TU_k	Carga média total contida em cada navio com a <i>commodity</i> k	t/navio

A Equação 3.3 indica a quantidade mensal de navios s com a *commodity* k necessária para o cumprimento da demanda sinalizada para o terminal de destino j . Já a Equação 3.4 representa o valor médio para o intervalo entre as chegadas IC_{kjm} dos navios com *commodity* k no terminal de destino j naquele determinado mês m . A Figura 3.5 ilustra o fluxograma do processo portuário nos terminais de destino j .

$$NE_{kjm} = \frac{(D_{kj} * Sz_{km})}{TU_k} \quad \forall k \in K, j \in J, m \in M \quad (3.3)$$

$$IC_{kjm} = \frac{D_m}{NE_{kjm}} \quad \forall k \in K, j \in J, m \in M \quad (3.4)$$

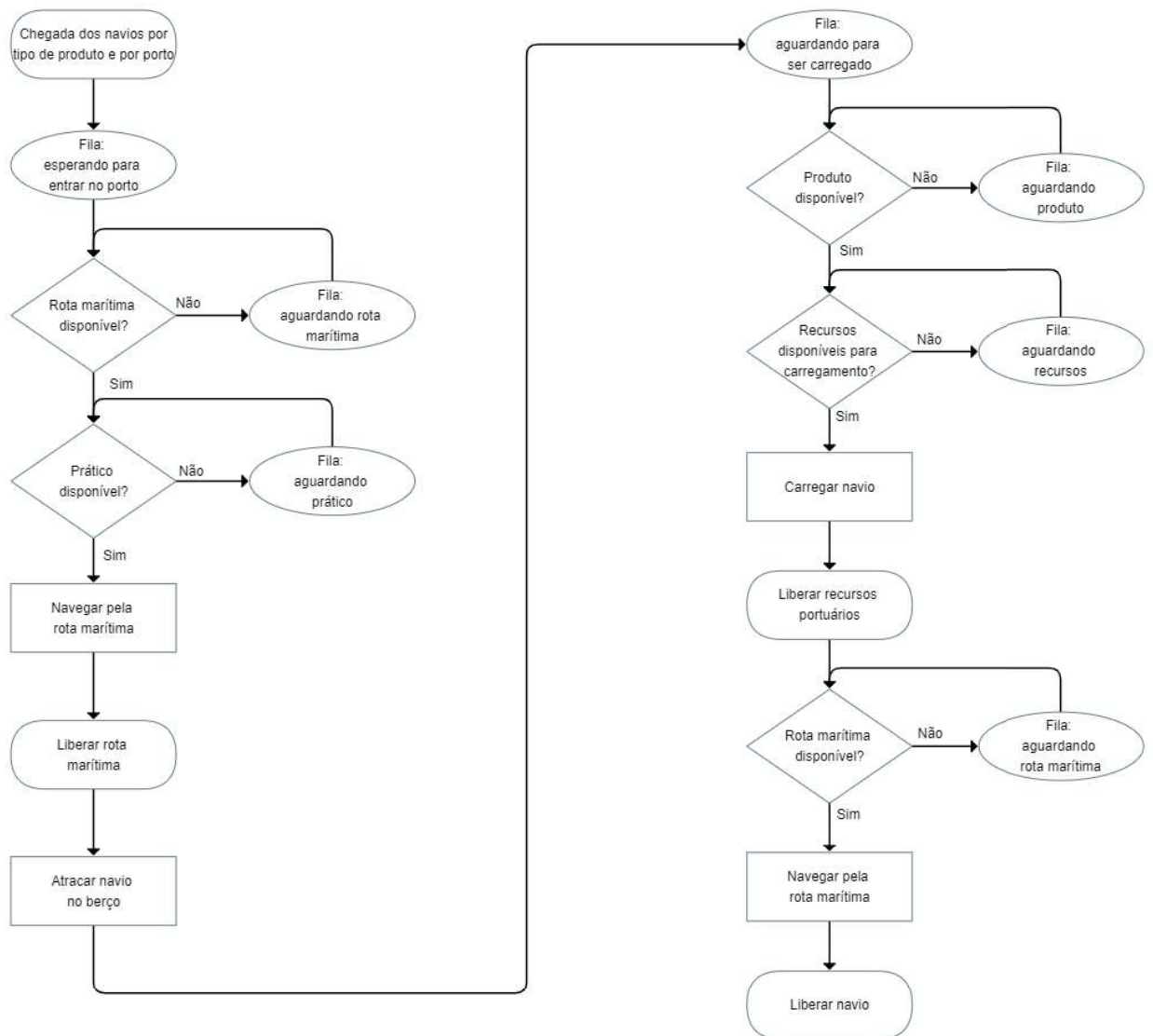


Figura 3.5: Fluxograma do módulo portuário. Fonte: Autor.

Após finalizar todas as atividades no terminal de destino j , a entidade navio s é descartada do sistema logístico.

3.3 A otimização via simulação

O objetivo da otimização via simulação (3.5) é encontrar uma solução capaz de minimizar as emissões de CO₂ no transporte ferroviário e, concomitantemente, garantir o nível de serviço do sistema logístico.

$$\min_{\theta \in \Theta} J(\theta) = E[D(\theta, \omega)] \tag{3.5}$$

Onde:

- θ : é o vetor de *input* das variáveis
- $J(\theta)$: é a função objetivo para redução da emissão de CO₂
- ω : indica a replicação da simulação
- $D(\theta, \omega)$: a emissão de CO₂, medida de desempenho estimada pela simulação
- E : é o valor estimado para $D(\theta, \omega)$

As principais variáveis de controle durante o processo de otimização com o objetivo de minimizar as emissões de CO₂ no transporte ferroviário são os vetores de decisão que definem:

- $\alpha_z \in \mathbb{Z}^+$ o número de composições ferroviárias z ;
- para quais arcos i - j a *commodity* k será transportada de forma a atender a exportação dos grãos de forma mais sustentável ambientalmente.

As restrições do problema estão relacionadas a seguir. A descrição dos parâmetros e variáveis, citados anteriormente, encontram-se na Tabela 3.1 na Seção 3.1:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J ev_{kj} \geq \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J D_{kj} \quad (3.6)$$

$$\alpha_z w u_z \leq W a_z \quad \forall z \in Z \quad (3.7)$$

$$\alpha_z l u_z \leq L a_z \quad \forall z \in Z \quad (3.8)$$

$$s v_i \leq S c_i \quad \forall i \in I \quad (3.9)$$

$$o v_j \leq B c_j \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^K s c u_{ki} \leq \sum_{k=1}^K S a_{ki} \quad \forall i \in I \quad (3.11)$$

$$\sum_{k=1}^K s c d_{kj} \leq \sum_{k=1}^K S a_{kj} \quad \forall j \in J \quad (3.12)$$

$$\alpha_z, wu_z, lu_z \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall z \in Z \quad (3.13)$$

$$ev_{kj} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall k \in K, j \in J \quad (3.14)$$

$$scu_{ki} \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in I \quad (3.15)$$

$$scd_{kj} \geq 0 \quad \forall k \in K, j \in J \quad (3.16)$$

$$sv_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.17)$$

$$ov_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (3.18)$$

Para minimizar a emissão de CO₂ no transporte ferroviário, o modelo de otimização via simulação considera algumas restrições importantes. Por exemplo, o atendimento à demanda total exportada para cada tipo de *commodity* k é traduzido na Equação 3.6. O modelo considera que deve ser atendido o somatório da demanda total sinalizada D_{kj} .

O planejamento do transporte ferroviário deve atender à limitação da quantidade de material rodante (os vagões e as locomotivas) disponíveis. Uma consideração importante diz respeito aos diferentes tipos de bitolas na malha ferroviária brasileira. Essa restrição é considerada no modelo de otimização via simulação e, com isso, apenas as composições ferroviárias com bitolas idênticas às características do trecho ferroviário podem circular (Equação 3.7 e Equação 3.8). Com essa finalidade, wu_z e lu_z também são variáveis controle da otimização com os limites superiores de Wa_z e La_z , respectivamente.

A necessidade de se respeitar a capacidade total de carregamento via moegas da *commodity* k no terminal i (Equação 3.9) e a capacidade total de carregamento via berços da *commodity* k no porto j (Equação 3.10) também estão representadas. Ou seja, o volume realizado ev_{kj} para cada terminal portuário pode variar de forma a respeitar as capacidades Bc_j e, no final, atender ao somatório da demanda D_{kj} . Isso garante o balanceamento do sistema de forma que possíveis cargas possam ser migradas entre os terminais portuários j com o objetivo de minimizar a emissão de CO₂.

Por fim, deve-se considerar a capacidade total de armazenagem da *commodity* k disponível no terminal i (Equação 3.11) e a capacidade total de armazenagem da *commodity* k disponível no porto j (Equação 3.12).

3.4 O cálculo das emissões de CO₂

Com relação aos cálculos das estimativas acerca das emissões de CO₂ na cadeia de suprimentos utiliza-se a abordagem descrita pelo *Global Logistics Emissions Council Framework*. Esta metodologia estima o total de toneladas-quilômetro para um conjunto de viagens (GLEC, 2022). Para calcular as emissões ferroviárias é necessário considerar o peso total da carga, a distância do trecho ferroviário, o fator de consumo de combustível e o fator de emissão de CO₂ por litro de diesel consumido. Os parâmetros são descritos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros para o cálculo das emissões de CO₂.

Parâmetro	Descrição	Unidade
Et_t	Emissões do transporte ferroviário para cada trecho ferroviário t	t CO ₂
TU_z	Carga total contida em cada composição ferroviária z	t
DP_t	Distância percorrida em cada seção ferroviária t	km
Fd	Fator de consumo de combustível por tkm de carga movimentada	litros/t.km
Fe	Fator emissão de CO ₂ por litro de diesel consumido	kg CO ₂ /l

A Equação (3.19) estima as emissões de CO₂ no transporte ferroviário, onde t representa as viagens em cada trecho ferroviário:

$$Et_t = \sum_{z=1}^Z (TU_z) * DP_t * Fd * Fe \quad \forall t \in T \quad (3.19)$$

Para o cálculo do fator de emissão de CO₂ por litro de diesel consumido no modo ferroviário, utiliza-se o valor padrão igual $74,100 \text{ kg} * CO_2 / TJ$ conforme IPCC (2016), onde TJ indica a unidade de medida em tera-joule. Para as conversões de *joule* por litro de combustível consumido, recomenda-se adotar como poder calorífico do diesel a relação de $10,100 \text{ kcal/kg}$ e para as características físico-químicas a densidade de 840 kg/m^3 (ANP, 2016). Por fim, para a conversão das unidades, adotou-se 1 *joule* igual a 0,239 caloria. Com estas informações, calcula-se o fator de emissão de CO₂ por litro de diesel consumido, conforme as equações 3.20, 3.21 e 3.22. Onde:

Pc : Poder calorífico do diesel em $kcal/l$

Lc : Litros consumidos de diesel

Fe : Fator emissão de CO₂ por litro de diesel consumido

$$Pc = \frac{840kg}{m^3} * \frac{10.100kcal}{kg} = \frac{8.484kcal}{l} \quad (3.20)$$

$$Lc = \frac{239.000.000kcal}{\frac{8.484kcal}{l}} = 28.170,64l \quad (3.21)$$

$$Fe = \frac{\frac{74.100kg*CO_2}{TJ}}{28.170,64l} = \frac{2.63kg * CO_2}{l} \quad (3.22)$$

Para as estimativas de consumo de diesel, as informações acerca do consumo médio por locomotiva nos corredores ferroviários envolvidos nas análises faz-se necessária. A Seção 4.2 resume essas informações que são utilizadas no estudo de caso e estão disponíveis ao público em ANTT (2022b).

Por fim, estas fórmulas são inseridas no modelo de otimização via simulação junto com todas as informações históricas acerca do consumo de diesel nos corredores ferroviários para elaborar um plano que minimiza as emissões de CO₂ no transporte.

3.5 O cálculo dos parâmetros financeiros

Determinar as tarifas ferroviárias envolve a definição de uma série de variáveis e fatores que afetam o custo do transporte, tais como: o tipo de carga transportada, as faixas das distâncias percorridas pelas composições z , as condições da via férrea, o consumo de combustíveis, a necessidade de manutenções do material rodante e da via permanente para proporcionar maior segurança e eficiência, a exigência por mão de obra especializada e as regulamentações governamentais como os impostos e as taxas são alguns exemplos.

As concessionárias ferroviárias brasileiras devem informar anualmente todos os custos dispendidos no transporte. De posse dessas informações, a ANTT determina o chamado “teto tarifário” que regulamenta os valores máximos a serem cobrados por estas empresas aos clientes dependentes do modo ferroviário. Esta estimativa é, portanto, essencial para garantir um preço justo e competitivo pelo transporte, assim como, permite que as concessionárias mantenham suas operações e ofereçam um serviço de qualidade.

Segundo a ANTT (2022c), para as estimativas das tarifas fixas e das tarifas variáveis que compõem o “teto tarifário” é necessário considerar o tipo e a quantidade de mercadoria transportada, o corredor ferroviário e as faixas de distância percorrida pela composição. Para este último, existem ferrovias cujos intervalos para a mudança de

faixa percorrida, no que tange a definição da tarifa variável, variam a cada 500 quilômetros ou variam a cada 400 quilômetros ou não variam independente da distância percorrida pela composição.

Os parâmetros utilizados para estas estimativas das tarifas fixas e das tarifas variáveis estão descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros para o cálculo do teto tarifário.

Parâmetro	Descrição	Unidade
Ct_t	Tarifa total em cada trecho ferroviário t	US\$/t
Cf	Tarifa fixa definida para cada ferrovia	US\$/t
Cv	Tarifa variável por ferrovia em cada faixa de distância percorrida	US\$/t*km
DP_t	Distância percorrida em cada trecho ferroviário t	km
TU_z	Carga total contida em cada composição ferroviária z	t

O Algoritmo 3 determina a partir do teto tarifário definido pela ANTT (2022c), do tipo de mercadoria transportada e das faixas de distâncias percorridas pelas composições, a tarifa total em cada trecho ferroviário.

Algorithm 3 Determinação da tarifa total por ferrovia e por faixa de distância

```

1:  If Ferrovia = Tipo 1
2:    then
3:      if  $DP_t > 0$  km and  $DP_t \leq 500$  km
4:        then  $Cv = Cv_1$  else
5:          if  $DP_t > 501$  km and  $DP_t \leq 1000$  km
6:            then  $Cv = Cv_2$  else
7:              if  $DP_t > 1001$  km and  $DP_t \leq 2000$  km
8:                then  $Cv = Cv_3$  else
9:                  if  $DP_t > 2000$  km
10:                 then  $Cv = Cv_4$ 
11:                end if
12:              end if
13:            end if
14:          end if
15:           $Ct_t = \sum_{z=1}^Z Cf + Cv * DP_t * TU_z$ 
16:        end if
17:
18:    Else if Ferrovia = Tipo 2
19:      then
20:        if  $DP_t > 0$  km and  $DP_t \leq 400$  km
21:          then  $Cv = Cv_1$  else
22:            if  $DP_t > 401$  km and  $DP_t \leq 800$  km
23:              then  $Cv = Cv_2$  else
24:                if  $DP_t > 801$  km and  $DP_t \leq 1600$  km
25:                  then  $Cv = Cv_3$  else
26:                    if  $DP_t > 1600$  km
27:                      then  $Cv = Cv_4$ 
28:                    end if
29:                  end if
30:                end if
31:              end if
32:             $Ct_t = \sum_{z=1}^Z Cf + Cv * DP_t * TU_z$ 
33:          end if
34:
35:      Else
36:         $Ct_t = \sum_{z=1}^Z Cf + Cv * DP_t * TU_z$ 
37:      end if
38:    end if

```

De posse das informações acima descritas e daquelas detalhadas na Seção 4.3, em conjunto com a utilização do pseudo-código estruturado no modelo de otimização via simulação (Algoritmo 3), é possível estimar a tarifa total (US\$/t) de cada ferrovia e cada mercadoria.

3.6 O cálculo das estimativas de tempos dos percursos

No Brasil, a velocidade média dos trens de carga ainda é bastante baixa em comparação a outros países. Isso se deve em parte à falta de investimentos em infraestrutura de malha ferroviária e em modernização dos equipamentos utilizados, tais como:

- Locomotivas modernas são mais eficientes em consumo de combustíveis, mais potentes e seguras;
- Vagões modernos são mais leves, seguros e resistentes e podem reduzir os tempos de viagem e os custos com manutenção;
- Sinalização moderna permitem velocidades de circulação mais altas e com maior segurança;
- Infraestrutura moderna melhoram a qualidade dos trilhos e, conseqüentemente, a velocidade média dos trens;
- Sistemas avançados de controle de tráfego garantem que os trens operem de forma mais eficiente, reduzindo os tempos de espera em estações e cruzamentos.

Além disso, a velocidade média dos trens pode variar bastante, dependendo de diversos fatores como o tipo de carga a ser transportada, a capacidade de tração da locomotiva, o perfil planialtimétrico da via e a qualidade da malha ferroviária.

Entende-se por *transit time* como o tempo necessário para que uma carga seja transportada de um ponto de origem a um ponto de destino na ferrovia, incluindo qualquer atraso que possa ocorrer durante este transporte.

Neste estudo, a composição ferroviária z ao se deslocar dos terminais de origem i aos terminais de destino j podem circular por diversos trechos com velocidades médias diferentes. Assim, para cada deslocamento no arco $i-j$ (trecho ferroviário), calcula-se qual é o *transit time* do percurso, seja no sentido importação como no sentido exportação. Os parâmetros utilizados para os cálculos estão descritos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros para o cálculo do *transit time* médio no trecho ferroviário t .

Parâmetro	Descrição	Unidade
TT_{ij}	<i>Transit time</i> médio da origem i ao destino j - exportação	h
TT_{ji}	<i>Transit time</i> médio da origem j ao destino i - importação	h
DP_{ijt}	Distância percorrida de i a j em cada trecho ferroviário t - exportação	km
DP_{jit}	Distância percorrida de j a i em cada trecho ferroviário t - importação	km
VE_t	Velocidade média de i a j para o sentido exportação no trecho t	km/h
VI_t	Velocidade média de j a i para o sentido importação no trecho t	km/h

Dessa forma, o *transit time* médio de percurso do deslocamento no arco i - j para o sentido exportação (Equação 3.23) e no arco j - i para o sentido importação (Equação 3.24) estão representadas a seguir.

$$TT_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^T DP_{ijt}}{\sum_{t=1}^T VE_{ijt}} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.23)$$

$$TT_{ji} = \frac{\sum_{t=1}^T DP_{jit}}{\sum_{t=1}^T VI_{jit}} \quad \forall j \in J, i \in I \quad (3.24)$$

A Seção 4.5 especifica as informações disponibilizadas em ANTT (2022b) para as estimativas de *transit time* médio de percurso utilizadas neste estudo, no sentido importação e no sentido exportação.

Capítulo 4

Estudo de Caso

“Luck is what happens when preparation meets opportunity.”

Seneca

No Brasil, 47% do escoamento de grãos ocorre por modo ferroviário (EMBRAPA, 2020). Apesar de ser o modo de transporte mais adequado para a distribuição dos grãos em um país de grande extensão territorial, este tipo de transporte carece de flexibilidade em suas rotas. Atrelado a isso, a falta de investimentos mais incisivos no histórico do setor ferroviário faz com que a matriz de transportes brasileira seja muito dependente do modo rodoviário.

O crescimento dos investimentos nas ferrovias brasileiras aumentou nos últimos anos e a maioria foi feita através das parcerias público-privadas com a finalidade de aumentar a capacidade e reduzir os gargalos existentes. Conforme citado na Seção 2.1.2, a malha ferroviária brasileira possui mais de 29 mil quilômetros de extensão (ANTT, 2022b), porém ainda com muitos trechos de baixa qualidade, limitando a velocidade dos trens.

Este capítulo apresenta um estudo de caso relacionado à aplicação de otimização via simulação em uma cadeia logística multimodal (terminais, ferrovias e portos) envolvendo toda a extensão territorial do Brasil e responsável por realizar a exportação dos grãos.

O resultado visa contribuir para um transporte ferroviário mais sustentável ao propor a minimização da emissão de CO₂, além de abordar as estimativas das receitas logísticas neste modo e atender aos requisitos da demanda dos clientes por essa *commodity*.

Trata-se de um processo complexo que envolve diversas etapas e atores distintos no planejamento estratégico da cadeia de suprimentos, desde a chegada da *commodity* via modo rodoviário aos terminais de origem até a entrega final ao terminal portuário para, posteriormente, ser exportada via modo marítimo.

O capítulo é dividido em seções que abordam a descrição do processo, as estratégias empregadas e as principais premissas adotadas com suas respectivas fontes de informações.

4.1 Descrição do sistema logístico

O sistema logístico em estudo compreende três tipos de composições ferroviárias para a exportação dos grãos (soja e milho). Além disso, engloba 21 terminais ferroviários responsáveis pelo carregamento dos trens com tais *commodities*, após o seu recebimento via modo rodoviário e até nove corredores ferroviários podem atender a esses terminais ferroviários.

Embora neste sistema logístico existam os fluxos de retorno dos grãos no sentido importação como os fertilizantes por exemplo e, em alguns períodos do ano, a *commodity* açúcar utilize os mesmos ativos ferroviários (locomotivas e vagões do tipo *hopper*) dos grãos, o sistema modelado é um “recorte” dessa realidade. Ou seja, o escopo deste estudo considera apenas a exportação do milho e da soja.

Outra característica importante e que traz mais complexidade a esta cadeia de suprimentos dos grãos é a elevada sazonalidade da *commodity*. A sazonalidade indica o período do ano em que há alta produção, geralmente concentrada em poucos meses, os chamados “meses pico”. Isso significa que não há regularidade na oferta dos grãos durante todo o ano e, por isso, a capacidade do sistema logístico deve ser compatível à demanda, de forma a evitar os gargalos, os problemas de abastecimento, os gastos com estoques reguladores e a alternância entre a ociosidade e a sobrecarga da infraestrutura de transporte.

A Figura 4.1 ilustra, a partir das posições geográficas de cada nó (as origens e os destinos) e seus respectivos arcos (corredores ferroviários com os tamanhos de bitolas específicos), o sistema logístico multimodal no Brasil representado pela ferramenta de otimização via simulação.

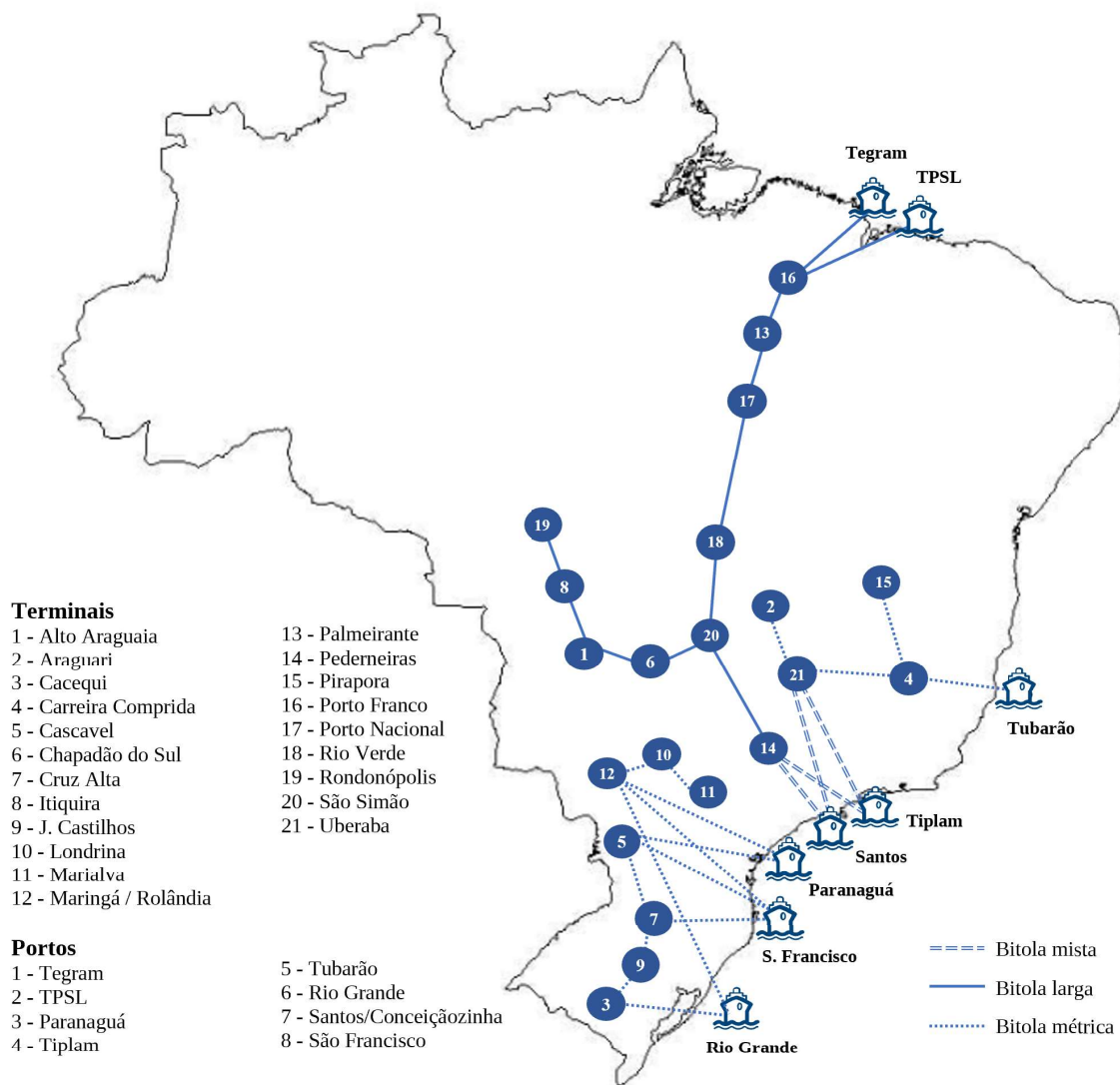


Figura 4.1: Posições geográficas do sistema logístico multimodal. Fonte: Autor.

Os corredores ferroviários que atendem ao transporte da soja e do milho são sistemas de distribuição multimodais, ou seja, podem incluir um sistema rodoviário e um sistema portuário. O primeiro permite o fluxo de cargas das zonas de plantio aos terminais de origem. Já o segundo, auxilia o escoamento de todo esse sistema ferroviário para até oito áreas portuárias distribuídas pelas regiões no Brasil. Esta rede de distribuição logística em todo o país inclui 76 caminhos de origem-destino ($i-j$), ilustrados de forma esquemática na Figura 4.2 e que complementa as informações contidas na Figura 4.1.

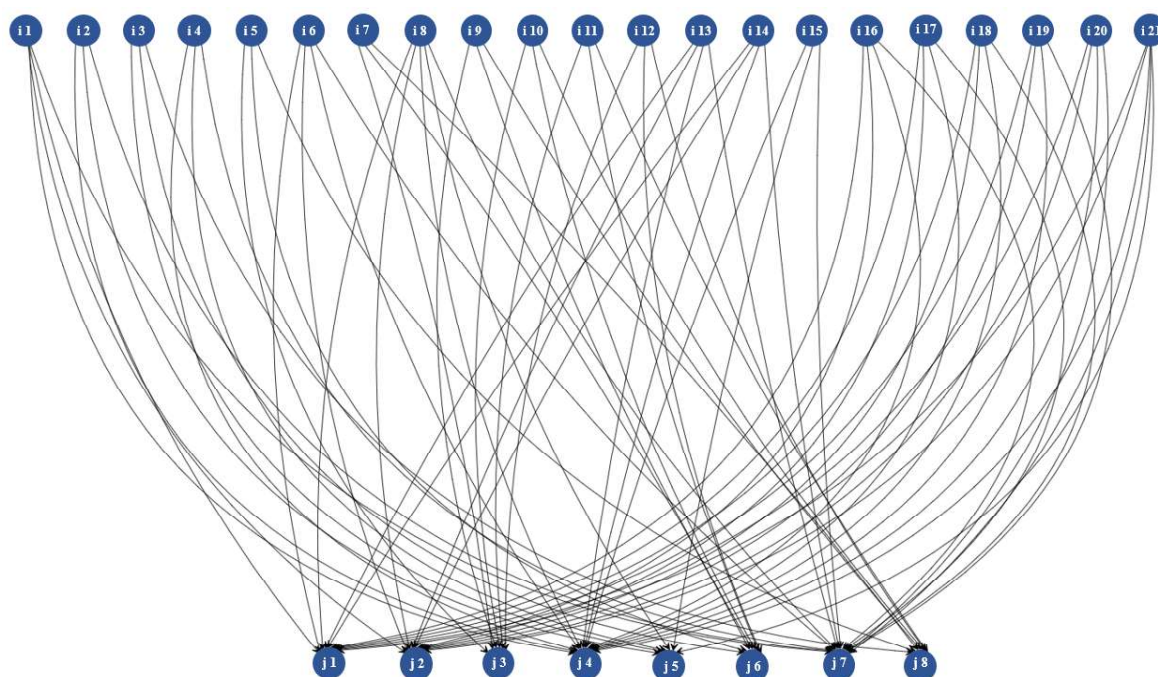


Figura 4.2: Conexões do modelo de otimização via simulação: origens i e destinos j . Fonte: Autor.

Em 2021, um levantamento baseado em dados publicados pela Revista Ferroviária (2021) apontou uma frota ferroviária composta por 35.759 vagões *hopper*, responsáveis por realizar o transporte de grãos e uma frota total de 2.171 locomotivas¹ presentes nas concessionárias ferroviárias em análise.

Com relação ao processo de comercialização dos grãos, este é semelhante a outras negociações de *commodities*. A demanda por grãos vem principalmente da Ásia e da Europa. É aportado por *traders* globais responsáveis pela compra dos grãos dos produtores locais e pela contratação dos operadores logísticos, terminais rodo-ferroviários, ferroviários, portos e navios, para proceder à entrega. Os terminais rodoferroviários estão localizados mais próximos aos produtores e distribuídos por todo o país. A carga segue por ferrovia até os portos no litoral.

No Brasil, os principais *traders* operadores de soja e de milho que realizam as negociações desses grãos são: a ADM, a Bunge, a Cargill, a Louis Dreyfus, conhecidas como as empresas ABCD e, mais recentemente nesse mercado, a empresa COFCO. Juntas são responsáveis por cerca de 82% das exportações de grãos brasileiras (Souza, 2018).

As políticas de escolha do terminal ao porto, transportando a *commodity* grãos definidas na simulação, levam em consideração os parâmetros essenciais para o planejamento estratégico, que se refere à capacidade dos terminais e dos portos e da

¹Frota total de locomotivas para realizar o transporte de todos os fluxos de mercadorias.

armazenagem destes dois sistemas, além dos tempos de trânsito entre os arcos e a quantidade de material rodante (locomotivas e vagões) disponíveis.

O modelo de simulação representa cada macrosistema (terminais, ferrovias e portos), suas capacidades operacionais e a infraestrutura como um sistema logístico multimodal em malha fechada (ver Figura 3.1). A abordagem de modelagem modular permite imitar o sistema real, evitando as filas excessivas em virtude das múltiplas interferências de entidades. Os parâmetros como as taxas operacionais e a duração das atividades indicam a capacidade dos recursos atuais (ver Tabela A.3). Já os parâmetros de controle, como armazenagem estática e dinâmica nos terminais, nos portos e na carga presentes nas composições ferroviárias, previnem os congestionamentos (ver Tabela A.4). A designação de destino dos trens em direção aos terminais (Algoritmo 1) e aos portos (Algoritmo 2) balanceia o sistema garantindo o atendimento ao volume da cadeia de suprimentos.

A partir disso, as heurísticas utilizadas avaliam as variáveis de emissão de CO_2 contidas na função objetivo (3.5) realizando alterações em variáveis como a demanda exportada, a quantidade de vagões e de locomotivas, os navios e os volumes a bordo dos navios com a finalidade de fornecer o nível mínimo de emissões atendendo aos requisitos apresentados nas restrições (3.6)-(3.12). A nova solução obtida retroalimenta a simulação até que seja atingido um critério de parada de acordo com a métrica proposta, numa abordagem de otimização via simulação.

A simulação é implementada no *software* Arena (Automation, 2004), e o problema de otimização é resolvido pelas heurísticas SS, BT e RN. Estas heurísticas são métodos evolucionários implementados e disponíveis no *optquest* utilizando uma CPU Intel(R) Core™ i7 2.80 GHz. O algoritmo cria novas soluções a partir de uma estratégia de diversificação e intensificação de busca e é aplicado com sucesso a problemas difíceis de otimização (Martí et al., 2006).

O método de otimização via simulação é definido como um processo que avalia diferentes combinações de valores para as variáveis que podem ser controladas. O objetivo é encontrar a combinação desses valores que forneça a mensuração do desempenho mais desejável para os resultados de saída em um modelo de simulação. Esta configuração é retornada à otimização que utiliza tais informações para definir novas direções de busca do algoritmo. Este processo se repete até que um critério de parada seja alcançado (Harrel et al., 2004), vide Figura 4.3.

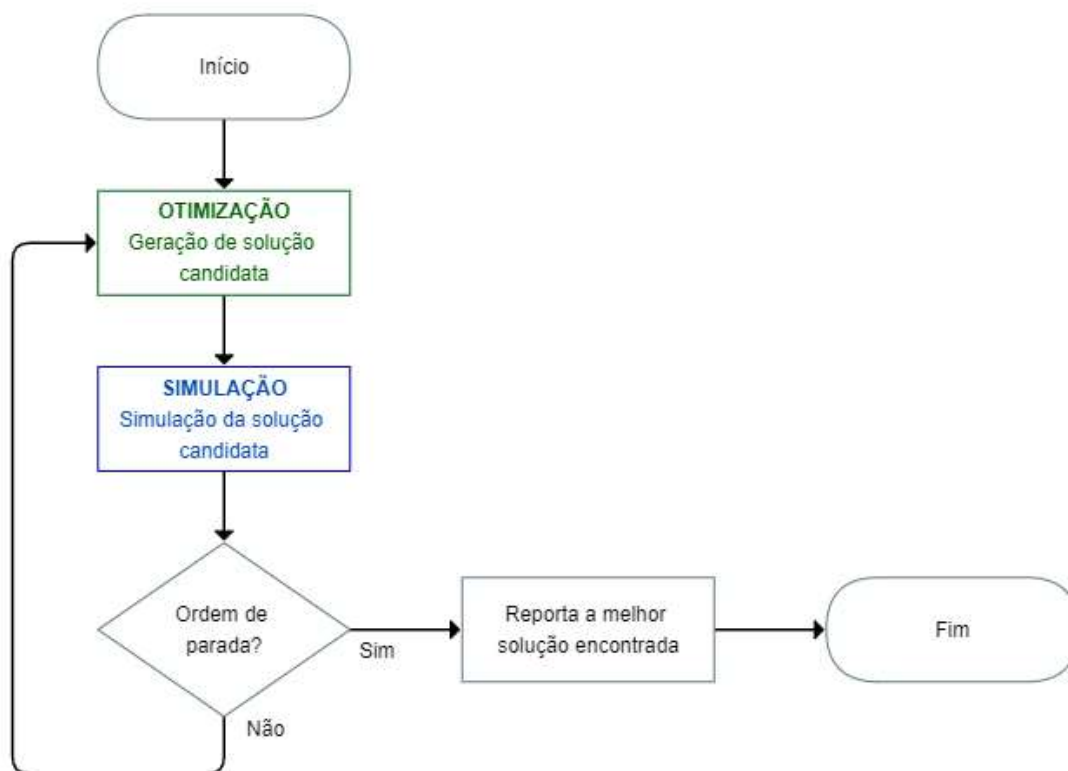


Figura 4.3: Interação entre os pacotes de otimização e simulação. Fonte: Oliveira (2019)

Basicamente, um modelo de simulação inclui n variáveis de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) e m variáveis de saída (y_1, y_2, \dots, y_m). A otimização desse modelo de simulação tem o objetivo de encontrar a configuração ótima das variáveis de entrada que otimizem as variáveis de saída.

Segundo Law (2007), o *optquest* utiliza três critérios de parada:

1. Execução do número máximo de configurações especificado pelo usuário.
2. Execução até que não haja melhora no valor da função objetivo por 100 configurações consecutivas.
3. Combinação das duas regras anteriores. Neste caso, a otimização é executada até que se atinja 5% do número máximo de configurações especificado pelo usuário sem que haja melhora no valor da função objetivo.

Assim, para este estudo, o critério de parada adotado é o terceiro critério especificado acima.

4.1.1 O sistema rodoviário

O sistema rodoviário é composto por entidades representadas por caminhões que realizam o transporte dos grãos (soja e milho), cuja tonelada útil adotada é igual a 30 toneladas. Estes caminhões chegam aos 21 terminais rodoferroviários respeitando as curvas de demanda das *commodities* e suas respectivas sazonalidades mensais.

Para este estudo de caso, o ano de 2022 é utilizado como referência para as origens das cargas, conforme o Gráfico 4.4 (ANTT, 2022a). O detalhamento do volume por tipo de mercadoria e por terminal de origem, encontram-se no Apêndice A.4 nas Tabelas A.14, A.15 e A.16.

No ano de 2022, a sazonalidade dos grãos para o mês de maior produção mensal, também denominado mês pico, é o mês de Março com 10,5% em relação ao volume total anual, ao considerar o somatório das cargas de grãos em todos os terminais de origem. Assim, no primeiro semestre, o sistema logístico está destinado majoritariamente à operação da soja. Enquanto no segundo semestre, o milho é o principal produto.

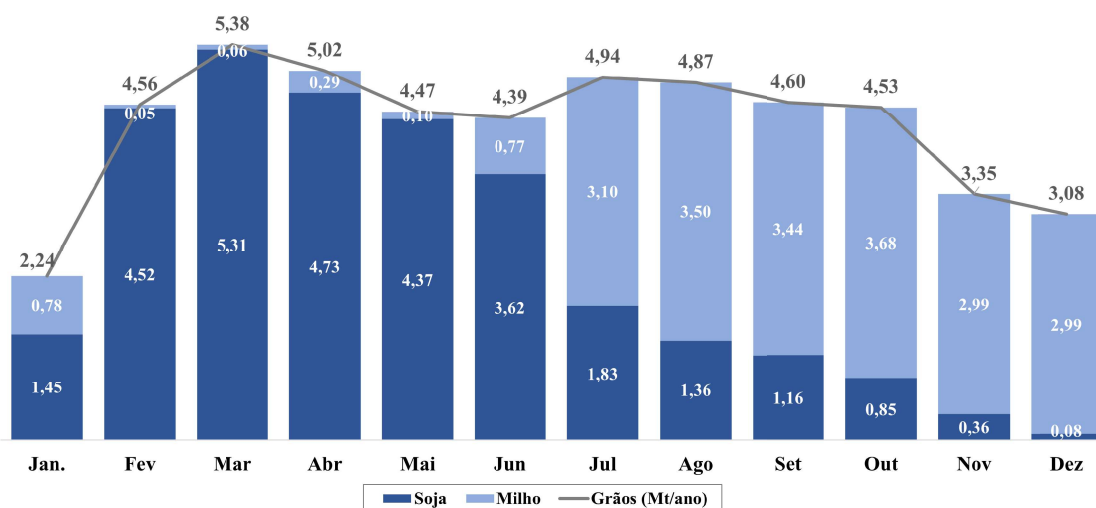


Figura 4.4: Volume de grãos nos terminais de origem no ano 2022 em Mt/ano. Fonte: Autor.

O intervalo entre chegada dos caminhões nos terminais de origem seguem uma função de distribuição exponencial negativa. A definição do cálculo da média dessa distribuição está descrito na Seção 3.2.2. Para todas as atividades que devem ser realizadas nestes terminais (vide 3.2), tais como, as chegadas dos caminhões, a recepção, a classificação, a pesagem e a descarga, são adotados um tempo padrão para os terminais. Isso se deve ao fato de não ser possível a obtenção dos dados de todos os terminais de origem nessa granularidade. Além disso, a definição desses tempos não influenciam diretamente na determinação da capacidade dos pontos de origem, mas foram utilizados por se tratar de um processo estocástico. Assim, os respectivos tem-

pos das atividades e suas variabilidades possuem a referência de um grande terminal intermodal localizado no estado do Tocantins por ser, dentre os terminais aos quais foi possível o acesso ao detalhamento das informações, aquele com melhor produtividade. Os valores utilizados para este estudo estão detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Atividades do processo rodoviário nos terminais de origem para cada caminhão.

Atividades	Tempo médio (min.)	Curvas de probabilidade	
		Função estatística	Desvio padrão (min.)
Pesagem na entrada	1,2	Normal	0,1
Recepção	1,9	Lognormal	0,7
Classificação	3,0	Triangular	0,8
Descarga	4,3	Lognormal	0,6
Pesagem na saída	1,2	Normal	0,1

Após finalizar todas as atividades no terminal de origem, a entidade caminhão é descartada do sistema logístico.

4.1.2 O sistema ferroviário

As composições ferroviárias compostas por um número definido de vagões e de locomotivas são entidades. Estas circulam em circuito fechado (terminais, ferrovias e portos). Suas respectivas origens e destinos se alteram de acordo com a necessidade dinâmica ao longo da simulação (vide Algoritmo 1 e Algoritmo 2). A Tabela 4.2 traz a atual frota de vagões *hopper* disponíveis para o transporte de grãos no Brasil, assim como, as ferrovias com seus respectivos tipos de bitolas e quantitativo de locomotivas (Revista Ferroviária, 2021; ANTT, 2022b).

Tabela 4.2: Informações das frotas de material rodante no Brasil: vagões e locomotivas.

Ferrovias	Tipo de bitola	Frota de vagões <i>hopper</i>	Frota de locomotivas ¹
RMP e RMN	Mista / Larga	10.406	425
RMS e RMO	Métrica	8.182	466
FCA e EFVM	Métrica	13.879	885
FNS e EFC	Larga	3.292	395

1: Frota total de locomotivas, não necessariamente utilizadas apenas ao transporte de grãos.

O modelo de otimização via simulação, agrega os vagões com características semelhantes (tipo de bitola) e os consideram em *pool* para serem utilizados no transporte ferroviário de grãos. Caso atendam às restrições e possam trafegar em outras ferrovias, essa migração entre corredores ocorrem normalmente ao longo do processo de simulação. Dessa forma, os tipos de composições ferroviárias inicialmente inseridas no modelo estão resumidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Informações dos tipos de composições ferroviárias no modelo de otimização via simulação.

Grupo	Tipo de bitola	Frota locomotivas		Vagões	Modelo de trens dos grãos			Composições estimadas	Ferrovias
		Total	Estimada	hopper	Vagões	Locomotivas	Peso médio (t)		
Tipo 1	Mista e larga	820	342	13698	80	2	92	171	RMN, RMP, FNS, EFC
Tipo 2	Métrica	466	294	8182	83	3	50	98	RMS e RMO
Tipo 3	Métrica	885	495	13879	84	3	75	165	FCA e EFVM

As colunas da Tabela 4.3 tratam da frota de locomotivas, o campo “frota total” indica o número total de locomotivas presentes nos corredores ferroviários para realizar o transporte de todos os fluxos daquele corredor. Já o campo “frota estimada” é um cálculo aproximado do número de locomotivas alocadas para realizar a movimentação específica dos grãos com base no modelo de trens (número de vagões e locomotivas). Por fim, o campo “composições estimadas” representa o número total de composições ferroviárias destinadas à realização do deslocamento ferroviário, dado o modelo de trens considerado.

4.1.3 O sistema dos terminais

Os terminais ferroviários estão presentes tanto nas origens conectando-se ao modo rodoviário como nos destinos interligando-se à interface portuária. Determinar a capacidade desses sistemas é fundamental para um correto dimensionamento da cadeia logística.

Dessa forma, a Tabela 4.4 resume as principais informações acerca dos 21 terminais de origem utilizados no estudo, incluindo suas respectivas capacidades estáticas e as produtividades máximas mensais.

Tabela 4.4: Principais informações da capacidade dos grãos nos terminais de origem. Fontes: Revista Ferroviária (2021); Conab (2023).

Terminal	Estado	Ferrovia	Operadora	Armazenagem (kTU)	Capacidade grãos (kTU/mês)
Alto Araguaia	MT	RMN	Rumo	175	1.296
Araguari	MG	FCA	VLI	110	700
Cacequi	RS	RMS	Camera	9	75
Carreira Comprida	MG	FCA	Fasal	60	50
Cascavel	PR	RMS	Diversas	102	508
Chapadão do Sul	MS	RMN	Chapadão	40	900
Cruz Alta	RS	RMS	Diversas	250	465
Itiquira	MT	RMN	Itiquira	47	600
Júlio de Castilhos	RS	RMS	C. Vale	96	120
Londrina	PR	RMS	Diversas	40	278
Marialva	PR	RMS	Seara LMA	89	238
Maringá / Rolândia	PR	RMS	Diversas	253	1.130
Palmeirante	TO	FNS	Diversas	90	790
Pederneiras	SP	RMP	Diversas	60	517
Pirapora	MG	FCA	VLI	44	336
Porto Franco	MA	FNS	Diversas	150	98
Porto Nacional	TO	FNS	Diversas	60	625
Rio Verde	GO	RMN	ADM	148	900
Rondonópolis	MT	RMN	Raizen	150	3.000
São Simão	GO	RMN	Rumo	42	500
Uberaba	MG	FCA	VLI	120	690

Da mesma forma, é necessário definir as informações de produtividade do modo ferroviário ao realizar as respectivas atividades nos terminais portuários. Assim, a Tabela 4.5 resume a capacidade estimada para o recebimento dos grãos em cada terminal portuário.

Tabela 4.5: Principais informações da capacidade dos grãos (soja e milho) nos terminais de destino. Fontes: ANTAQ (2018); Conab (2023); ANTT (2022a).

Portos	Terminal	Capacidade ferroportuária			Ferrovia	
		Vagões/dia	TU/vagão	kTU/mês	Acesso	Bitola
Porto Paranaguá	Bunge	360				
	Cargill	120				
	Cotriguaçu	30	50	915	RMS	Métrica
	Fospar	10				
	Interalli	50				
	Louis Dreyfus	40				
Porto Tiplam	Tiplam	320	75	720	RMP	Mista
Porto Tubarão	TPD3	330	75	742	EFVM	Métrica
Portos em Itaquí	Tegram	420	92	1150	EFC	Larga
	TPSL					
Porto Rio Grande	Tergrasa	120				
	Terbian	80	50	480	RMS	Métrica
	Termasa	60				
	Bunge	60				
	CIDASC	100				
Porto São Francisco do Sul	Bunge	100	50	660	RMS	Métrica
	Terlogs	240				
	ADM	160				
Portos em Santos	Elevações	360				
	T-12A	50				
	T-XXXIX	100	92	3.890	RMP	Mista
	TES	330				
	T-Grão	80				
	TEG/TEAG	80				
	TGG	250				

As capacidades citadas na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 são estimadas com base nas informações coletadas em ANTAQ (2018), Conab (2023), Revista Ferroviária (2021) e ANTT (2022a). Conforme citado na Seção 4.1.1, o fator sazonalidade da carga no mês pico (vide Figura 4.4) é importante para a definição da capacidade anual dos sistemas, tanto portuários como dos terminais.

4.1.4 O sistema portuário

O sistema portuário é composto por entidades representadas por navios que realizam o transporte dos grãos (soja e milho), cuja tonelada útil ou *DWT* variam em função de uma distribuição de probabilidade discreta: 10% com 50 kt, 55% com 60 kt e 35% com 70 kt, respeitando a frota média de navios (ANTAQ, 2018).

Estes navios chegam aos oito portos respeitando as curvas de demanda das *commodities* e suas respectivas sazonalidades mensais. Conforme citado anteriormente, o ano de 2022 é utilizado como referência, vide Figura 4.5 (ANTT, 2022a). O detalhamento do volume por tipo de mercadoria e por terminal de origem, encontram-se no Apêndice A.4 nas Tabelas A.17, A.18 e A.19.

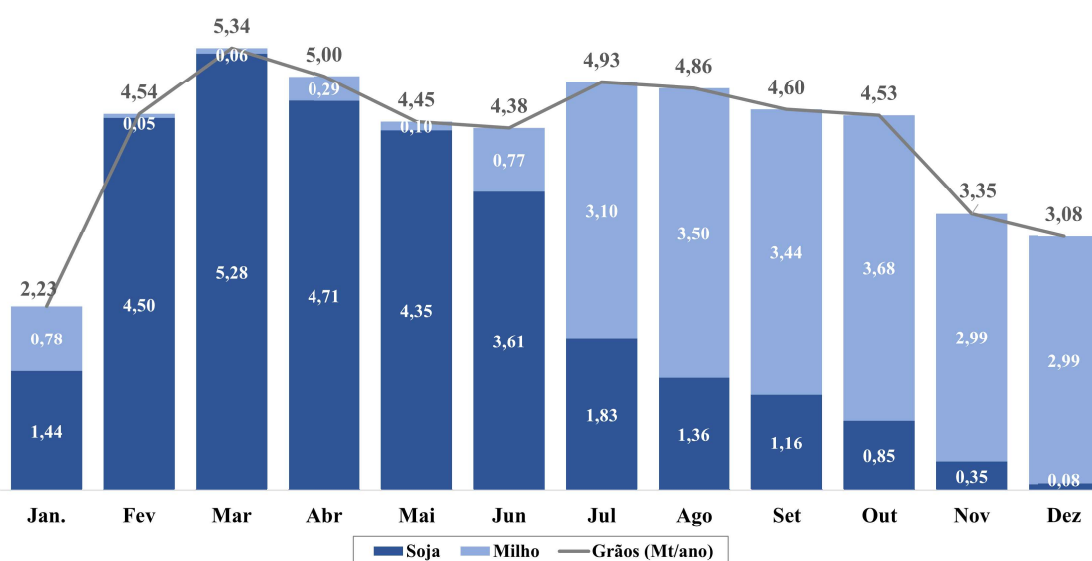


Figura 4.5: Volume de grãos nos terminais portuários no ano 2022. Fonte: Autor.

A chegada dos navios aos portos seguem uma função de probabilidade estatística exponencial, com o cálculo do parâmetro da média descrita na Seção 3.2.3. A Tabela 4.6 detalha os principais indicadores portuários utilizados para o dimensionamento da capacidade (ANTAQ, 2018). Com relação às premissas associadas aos tempos das atividades, estas variam segundo uma curva de distribuição de probabilidade triangular com o valor centrado na moda e os parâmetros mínimo e o máximo variando $\pm 5\%$. A adoção dessa premissa ocorre uma vez que os dados divulgados publicamente não informam as possíveis oscilações probabilísticas. Além disso, tais variações são utilizadas por especialistas portuários durante o desenvolvimento de projetos portuários nos quais não se tem acesso a dados históricos, por exemplo. Após finalizar todas as atividades nos portos, a entidade navio é descartada do sistema logístico.

Tabela 4.6: Principais informações portuárias. Fonte: ANTAQ (2018).

Porto	Tegram	TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	São Francisco	Portos Santos	
Estado	MA	MA	PR	SP	ES	RS	SC	SP	
Armazenagem (kt)	500	225	1.250	250	500	1.750	339	1.250	
Número de berços	1	1	5 ⁽¹⁾	1	1	4 ⁽²⁾	1	9 ⁽³⁾	
Dias operacionais	364	364	364	364	364	364	364	364	
Intervalo entre atracações (h)	1,7	1,6	2,3	4,0	2,8	3,0	1,0	3,0	
Soja	DWT navios (kt)	63,5	67,0	59,5	67,1	57,8	58,4	43,9	65,1
	Tempo operação (h)	88,8	57,1	60,4	32,0	45,1	74,1	56,3	65,8
	Tempo inoperante (h)	9,0	7,4	6,8	9,4	4,7	13,3	1,0	10,2
	Tempo atracação (h)	97,8	64,5	67,8	41,4	49,8	87,4	57,3	75,8
	Produtividade (t/h)	823	1.201	1.052	2.100	1.359	913	780	1.080
Milho	DWT Navios (kt)	45,8	61,3	53,0	67,0	56,7	44,2	42,2	62,1
	Tempo operação (h)	36,4	42,9	65,8	31,9	52,8	84,6	55,8	67,8
	Tempo inoperante (h)	8,6	8,8	13,6	10,4	4,3	8,4	1,0	9,7
	Tempo atracação (h)	45,0	51,8	79,5	42,3	57,2	93,0	56,8	77,7
	Produtividade (t/h)	1.268	1.444	842	2.100	1.207	523	742	1.025

1 - B201, B204, B212, B213, B214.

2 - TUP Bunge, Tergrasa, Terbian, TUP Termasa.

3 - Outeirinhos, TEG, TEAG, TGG, B19, B20/B21, B12A, TES, ADM.

Nota-se que os portos brasileiros apresentam variações relevantes com relação à

capacidade estática de armazenagem, ao número de berços e aos tempos operacionais. Tais diferenças são influenciadas por diversos fatores. Um deles é a localização geográfica, já que em regiões de grande produção agrícola ou industrial, por exemplo, há uma tendência maior acerca da concentração de armazenagem e de berços para acomodar a movimentação dessas cargas. Outros fatores importantes estão ligados à infraestrutura disponível, incluindo a presença de equipamentos modernos e eficientes, e à gestão portuária com a qualidade dos serviços prestados. Ambos afetam diretamente a eficiência e a competitividade de cada porto.

4.2 As emissões de CO₂ no transporte ferroviário

As estimativas para as emissões de CO₂ estão diretamente relacionadas ao fator de consumo de combustível por TKU de carga movimentada no transporte ferroviário.

Para estimar o consumo de diesel nos corredores ferroviários, as informações acerca deste indicador por locomotiva faz-se necessário. A Tabela 4.7 resume tais informações com base no histórico disponível (ANTT, 2022b):

Tabela 4.7: Consumo de combustível no transporte ferroviário por locomotiva (*l*/milhares *TKU*)

Corredor ferroviário	Consumo por locomotiva (<i>l</i> /milhares <i>TKU</i>)
EFC	1,7792
EFVM	2,2195
FCA	9,6510
FNS	3,2568
RMC	3,3100
RMN	1,3729
RMP	9,3308
RMS	4,2385

A Seção 3.4 detalha o método que relaciona o consumo de diesel com as emissões de CO₂ e direcionam o principal objetivo deste estudo, a sustentabilidade no transporte ferroviário.

4.3 As tarifas ferroviárias

Segundo a ANTT (2022c), para as estimativas das tarifas fixas e das tarifas variáveis que compõem o “teto tarifário” é necessário considerar o tipo e a quantidade de mercadoria transportada (soja ou milho), o corredor ferroviário e as faixas de distância percorrida pela composição. Para este último, existem ferrovias cujos intervalos para a mudança de faixa percorrida, no que tange a definição da tarifa variável, variam a cada

500 quilômetros (Tipo 1) ou variam a cada 400 quilômetros (Tipo 2) ou não variam independente da distância percorrida (Tipo 3).

A Tabela 4.8 (produto soja) resume as definições das tarifas fixas Cf e das tarifas variáveis Cv para cada ferrovia e para cada faixa de distâncias percorridas.

Tabela 4.8: Teto tarifário ferroviário - produto Soja

Classe	Corredor ferroviário	Tarifa fixa (US\$/t)	Tarifa variável (US\$/t*km)			
			Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4
Tipo 1	FCA	7,2780	0,0357	0,0313	0,0268	0,0178
	RMN	4,7420	0,0428	0,0385	0,0342	0,0257
Tipo 2	RMP	4,8060	0,0439	0,0395	0,0352	0,0263
	RMS	4,5000	0,0424	0,0382	0,0339	0,0254
Tipo 3	FNS	8,4860			0,1330	
	EFC	5,2680			0,0194	
	EFVM	5,7720			0,0331	
	RMC	6,3520			0,0199	

Já a Tabela 4.9 traz as mesmas informações das tarifas fixas e das tarifas variáveis para o produto milho.

Tabela 4.9: Teto tarifário ferroviário - produto Milho

Classe	Corredor ferroviário	Tarifa fixa (US\$/t)	Tarifa variável (US\$/t*km)			
			Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4
Tipo 1	FCA	7,0560	0,0364	0,0319	0,0273	0,0182
	RMN	4,7420	0,0446	0,0401	0,0357	0,0268
Tipo 2	RMP	4,8060	0,0439	0,0395	0,0352	0,0263
	RMS	4,5000	0,0407	0,0366	0,0326	0,0244
Tipo 3	FNS	8,4860			0,0266	
	EFC	5,2680			0,0194	
	EFVM	5,7720			0,0331	
	RMC	6,3520			0,0199	

Dessa forma, a partir dessas informações, é possível trazer estimativas financeiras ao resultado do plano de otimização via simulação a partir da estimativa de receitas ferroviárias em função do transporte de soja e de milho. Para todos os valores financeiros apresentados na Seção 5, adota-se a seguinte conversão da moeda: cinco reais brasileiro para cada um dólar americano.

4.4 As velocidades médias ferroviárias

É possível obter as velocidades médias de percurso das composições nos diversos corredores ferroviários (ANTT, 2022b), tanto no sentido exportação como no sentido importação (vide Tabela 4.10).

Tabela 4.10: Velocidade média (km/h) nos corredores ferroviários.

Corredor ferroviário	Velocidade média (km/h)	
	Exportação	Importação
EFC	27	25
EFVM	29	28
FCA	25	24
FNS	36	34
RMN	29	36
RMP	18	20
RMS	17	16

Essas premissas são necessárias para as projeções de *transit time* no sentido importação e de *transit time* no sentido exportação. Dessa forma, para estes tempos de percursos ferroviários utiliza-se uma função de distribuição estatística triangular com variação de $\pm 5\%$. Essas variabilidades, validadas por especialistas do setor ferroviário, são utilizadas de forma a modelar as incertezas no modelo de simulação e fazem referências às diferenças percentuais nos dados das declarações de rede (ANTT, 2022b) ao longo dos anos.

4.5 As distâncias ferroviárias

A definição das distâncias ferroviárias é uma premissa de entrada importante para as estimativas de outros indicadores utilizados neste estudo. Com as distâncias é possível estimar os tempos de percurso dos trens no sentido importação e no sentido exportação (Seção 3.6), calcular o TKU do transporte ferroviário que, posteriormente, é utilizado nas projeções das tarifas ferroviárias (Seção 3.5), do consumo de combustível (Seção 3.4) e, em seguida, estimar as emissões de CO₂. A Figura 4.6 esquematiza, a partir de um fluxograma, as relações entre as diversas métricas com as operações aritméticas básicas necessárias em cada caso.

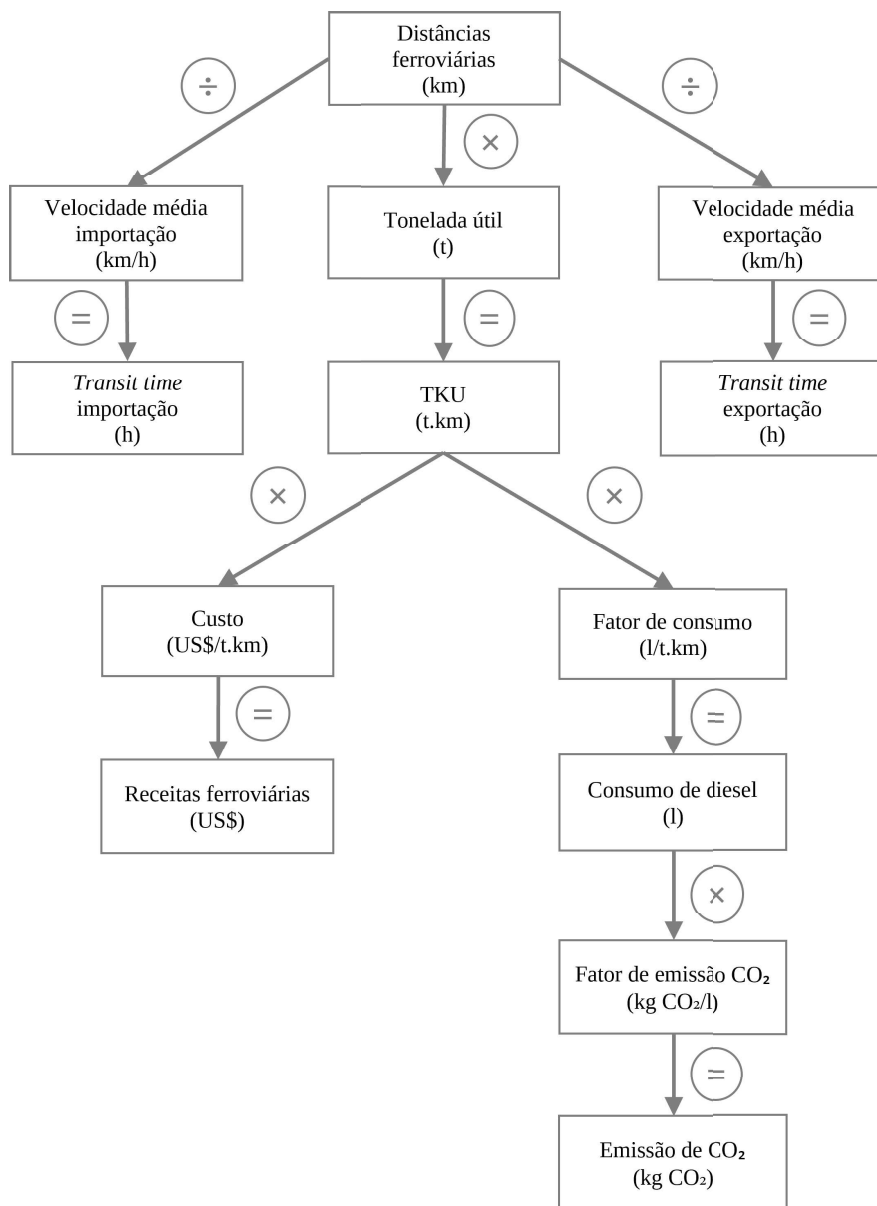


Figura 4.6: Árvore de indicadores ferroviários. Fonte: Autor.

Com base nas informações contidas em ANTT (2022b) é possível obter as distâncias aproximadas entre os diversos arcos contidos neste estudo, conforme Tabela 4.11.

Tabela 4.11: A distância (km) entre as origens e os destinos nos corredores ferroviários.

Origens / Destinos	Tegram	TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
Alto Araguaia	3.234	3.234	-	1.347	-	-	1.347	-
Araguari	-	-	-	897	1.700	-	897	-
Cacequi	-	-	-	-	1.609	482	-	1.591
Carreira Comprida	-	-	-	1.953	663	-	1.953	-
Cascavel	-	-	487	-	-	915	-	540
Chapadão do Sul	3.024	3.024	-	1.137	-	-	1.137	-
Cruz Alta	-	-	1.354	-	-	920	-	1.336
Itiquira	3.349	3.349	-	1.462	3.387	-	1.462	-
J. Castilhos	-	-	1.801	-	-	674	-	1.783
Londrina	-	-	411	-	-	874	-	498
Marialva	-	-	299	-	-	761	-	386
Maringá/Rolândia	-	-	267	-	-	729	-	354
Palmeirante	964	964	-	2.325	-	-	2.325	-
Pederneiras	4.056	4.056	-	527	-	-	527	-
Pirapora	-	-	-	2.367	1.058	-	2.367	-
Porto Franco	713	713	-	2.576	-	-	2.576	-
Porto Nacional	1.236	1.236	-	2.054	-	-	2.054	-
Rio Verde	3.013	3.013	-	1.008	-	-	1.008	-
Rondonópolis	3.489	3.489	-	1.602	-	-	1.602	-
São Simão	3.013	3.013	-	1.008	-	-	1.008	-
Uberaba	2.568	2.568	-	721	1.876	-	721	-

A Seção 5 evidencia os resultados obtidos no estudo utilizando o modelo de otimização via simulação e as discussões sobre o modo de operação atual comparado ao planejamento de uma estratégia sustentável para a exportação dos grãos no Brasil.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

“In the great battles of life, the first step to victory is the desire to win.”

Mahatma Gandhi

Este estudo visa elaborar um plano integrado capaz de reduzir as emissões de CO₂ nas operações ferroviárias de exportação dos grãos no Brasil. O resultado do plano otimizado mostra uma melhor utilização do material rodante (as locomotivas e os vagões) disponível em todo o território nacional para atingir a máxima exportação de grãos e minimizar as emissões de CO₂, respeitando as capacidades dos arcos i - j contidos no sistema modelado (terminais, ferrovias e portos), além de trazer uma estimativa da receita logística no transporte ferroviário.

O problema de otimização é definido separadamente do modelo de simulação, representando com precisão o sistema real. O procedimento de otimização implementado pelas heurísticas de *Scatter Search*, Busca Tabu e Redes Neurais utiliza as saídas do modelo de simulação para avaliar e selecionar um novo conjunto de entrada para iniciar a otimização, ou seja, minimizar as emissões de CO₂ sujeitas às restrições de volume exportado, material rodante disponível e capacidade de armazenamento nos terminais e nos portos. O algoritmo realiza uma busca não-monotônica, onde entradas geradas sucessivamente produzem avaliações, fornecendo as melhores soluções ao longo do tempo.

A rede de distribuição é composta por 21 terminais de origem ferroviária, três tipos de composições de trens, dois tipos de *commodities* de grãos (soja e milho), um único tipo de caminhão no modo rodoviário, três tipos de navios representando o *mix* médio da frota graneleira e oito áreas portuárias de destino distribuídas por toda a extensão territorial do país.

O problema de otimização via simulação representa a operação aproximada de 1,7 milhão de caminhões com tonelada útil igual a 30 toneladas e composições ferroviárias distribuídas em três possíveis configurações distintas: 7.360 kt, 6.300 kt e 4.150 kt.

Para o modo de transporte marítimo estima-se cerca de 820 embarcações distribuídas em três tipos: 10% 50kt, 55% 60kt e 35% 70kt.

Além disso, o modelo equilibra um total de 116 filas (vide a Tabela A.7 do Apêndice A.1) contidas no sistema da cadeia de suprimentos em todo o país englobando 76 arcos, atendendo às restrições de demanda com a emissão mínima de CO₂ e estimando a receita tarifária do transporte ferroviário, um desafio enfrentado por muitos departamentos de planejamento nas organizações e por praticantes da pesquisa operacional.

Após a coleta dos dados de entrada e do tratamento estatístico (Korzenowski e Werner, 2012), este estudo estabelece um período de aquecimento igual a trinta dias. Esse intervalo de tempo é importante e, suficientemente longo, para que as composições ferroviárias em particular, possam circular e espalhar-se ao longo do sistema, assim como, os estoques dos terminais e dos portos já estejam com cargas disponíveis para suas respectivas operações. Ou seja, com este intervalo de tempo adotado, a simulação transpõe o regime transitório ou fase inicial, onde o desempenho do sistema está fortemente relacionado às condições iniciais e ingressa no regime permanente. Neste último, tais condições passam a não afetar o comportamento do sistema.

O modelo de simulação de eventos discretos representa o sistema real e os dados observacionais obtidos. Os tempos das atividades de cada processo foram tratados e definidos com base em funções de distribuição de probabilidade e seus respectivos parâmetros para traduzir o desempenho real de cada sub-sistema.

Os resultados são apresentados por dois cenários, ou seja, a simulação da operação atual e o cenário sustentável proposto utilizando a ferramenta de otimização via simulação. O modelo utiliza como dados de entrada as informações fornecidas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2022b), pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2022), pela Associação Nacional dos Transportes Ferroviários (ANTF, 2022), pela Revista Ferroviária (Revista Ferroviária, 2021) e pelo Plano Mestre dos Portos Brasileiros (ANTAQ, 2018), que estão disponíveis para o público em geral.

5.1 Verificação e validação

A etapa de verificação testa a adequação do modelo computacional de simulação ao modelo conceitual idealizado. Esta etapa garante que o modelo computacional esteja funcionando de acordo com os fluxos lógicos do modelo conceitual. Por outro lado, a etapa de validação verifica se o modelo conceitual apresenta as condições reais. O modelo é então medido a partir da precisão dos dados de saída da simulação em relação aos dados observacionais. Assim, o modelo é válido se a relação entre essas variáveis for semelhante à realidade do ponto de vista estatístico. Os dados de saída devem ter um nível de significância menor que 0,05 ($\alpha = 0,05$).

A confiança estatística refere-se ao intervalo de confiança IC (Equação 5.1) ou intervalo de valores que contém a média da população com certa probabilidade, sendo este um componente fundamental no processo de análises dos resultados. Dessa forma, quanto maior a probabilidade, maior a confiança estatística de que a média da população esteja entre o intervalo definido. Por fim, a precisão h refere-se ao tamanho desse intervalo (vide 5.2) (Chwif e Medina, 2007). Ainda segundo estes autores, ao admitir que os valores para uma determinada variável aleatória x são normalmente distribuídas, o intervalo h permite o cálculo do IC a $(1 - \alpha)$ para o verdadeiro valor da média, que estará centrada em x .

Assim, o IC e sua respectiva largura é definido por fatores como o número de replicações n em uma rodada de simulação, o nível de confiança $(1 - \alpha)$ determinado e pela variância da medida de desempenho analisada, visto nas equações 5.1, 5.2 e 5.3:

$$IC = \bar{x} \pm h \quad (5.1)$$

$$h = t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.3)$$

Onde:

\bar{x}	: média da amostra
h	: precisão
$t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \frac{S}{\sqrt{n}}$: percentil distribuição <i>t Student</i> com $(n - 1)$ graus de liberdade
s	: desvio padrão da amostra
n	: número de dados da amostra

Cada execução do modelo de simulação inclui 50 replicações para um ano de operações. Para um intervalo de confiança de 95%, a adoção desse número de replicações possibilita atingir uma precisão satisfatória, considerando a variável quantidade exportada de grãos, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros para a definição do número de replicações.

n	\bar{x}	s	Confiança (1 - α)	α	Precisão $h = t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \frac{s}{\sqrt{n}}$	IC da média
50	51.185.000	271.980	95%	0,05	77.296	$51.107.704 \leq \bar{x} \leq 51.262.296$

Computacionalmente, o modelo de simulação finaliza este número total de replicações em, aproximadamente, 47 minutos. Já o tempo necessário para concluir a otimização é próximo a 290 minutos.

Para a verificação do modelo de simulação, a medida de desempenho utilizada é a soma da quantidade de volume exportado em todos os portos, o principal indicador de desempenho da ferramenta. A partir daí, compara-se o valor médio e o IC 95% dos resultados das 50 replicações obtidas via modelo de simulação ao volume executado de grãos no ano de 2022 nos principais terminais portuários do Brasil (vide Tabela A.8 no Apêndice A.2). Ao longo das próximas seções este cenário é referenciado como o “cenário base”.

O volume dos grãos exportados nos terminais portuários brasileiros no ano de 2022 foi igual a 51,252 Mt/ano (ANTT, 2022a). Segundo os resultados obtidos via modelo de simulação, para este mesmo indicador, com um intervalo de confiança da média adotado (IC 95%), tem-se o valor igual a 51,108 Mt/ano para o limite inferior e de 51,263 Mt/ano para o limite superior. Além disso, o desvio percentual entre o valor real e a média do valor simulado desse indicador ficaram muito próximos (aproximadamente 0,13%),

Adicionalmente, ao realizar a mesma análise para outros *outputs* importantes, a emissão total de CO₂ e a receita total ferroviária, verifica-se que o número de replicações adotado é adequado para se obter a precisão desejada com um intervalo de confiança de 95% (vide a Tabela A.9 e a Tabela A.10 no Apêndice A.2).

Portanto, o modelo apresenta aplicabilidade satisfatória para o planejamento da cadeia de suprimentos para a exportação dos grãos em larga escala considerando as 50 replicações.

5.2 Resultados da simulação - cenário base

Conforme descrito na Seção 5.1, a partir dos parâmetros adotados, o modelo de simulação representa de forma adequada o sistema real. Os gráficos de *box-plot* e os histogramas a seguir detalham os resultados dos principais indicadores (o volume exportado, as emissões de CO₂ e as receitas ferroviárias) obtidos via simulação, cujas aberturas por replicação encontram-se no Apêndice A.5.

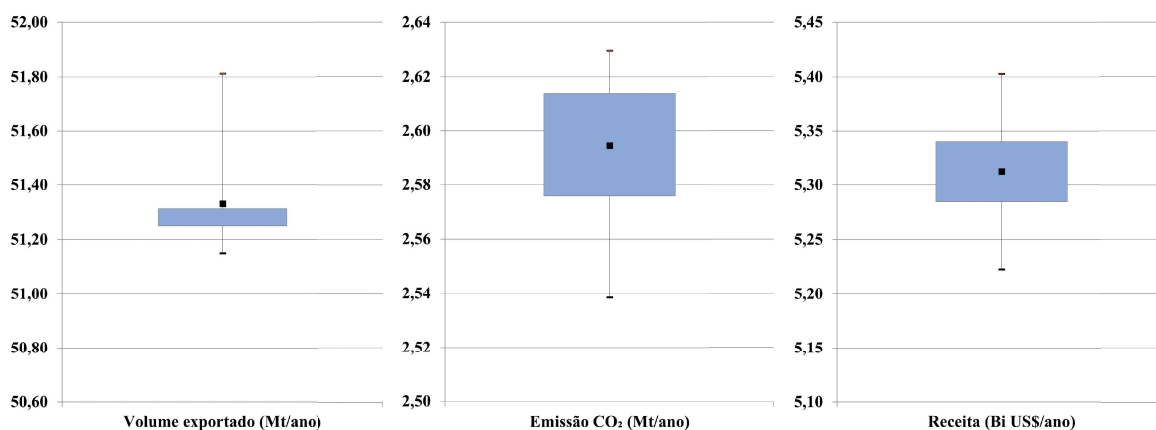


Figura 5.1: Volume exportado planejado.

Figura 5.2: Plano de emissões de CO₂ na ferrovia.

Figura 5.3: Receita ferroviária planejada.

A Tabela 5.2 detalha os volumes realizados no ano de 2022 (ANTT, 2022a) e a média dos volumes exportados em todos os portos obtidos via simulação dinâmica.

Tabela 5.2: Comparativo do volume real (ano 2022) versus cenário simulado nos portos.

Portos	Real 2022 (t)	Simulado (t)	Variação (%)
Portos Itaquí (Tegram e TPSL)	10.286.435	10.235.000	- 0,50
Porto Paranaguá	3.918.498	3.907.500	- 0,28
Porto Rio Grande	588.420	592.500	+ 0,69
Porto São Francisco do Sul	2.744.202	2.906.250	+ 0,91
Porto Tiplam	3.714.213	3.725.000	+ 0,29
Porto Tubarão	4.044.114	4.038.750	- 0,13
Portos em Santos	25.956.630	25.780.000	- 0,68
Total	51.252.512	51.185.000	- 0,13

Dessa forma, com base em todas essas informações apresentadas e detalhadas ao longo da Seção 5.1 e partindo do comparativo de aderência entre o histórico do ano

de 2022 com os resultados simulados neste cenário base, pode-se afirmar que o modelo representa de forma adequada o sistema real.

5.3 Resultados da otimização via simulação - cenário otimizado

A metodologia de otimização via simulação é eficiente na busca por soluções. Esse estudo tem o objetivo de minimizar a emissão de CO₂ no transporte ferroviário, mantendo o nível de serviço de atendimento (o volume exportado).

O modelo de simulação é capaz de gerar novos conjuntos de soluções de forma a atender à função objetivo em um processo cíclico de avaliações dos resultados até satisfazer a um critério de parada. Conforme citado na Seção 2.2, o modelo de otimização armazena o melhor conjunto de variáveis ao longo de todo processo sendo este, portanto, considerado o “ótimo” para o problema.

Assim, baseado nas restrições e nas variáveis controle (vide Tabela A.5) consideradas no modelo de otimização, é possível chegar à melhor configuração do quantitativo dos tipos de composições ferroviárias e sua respectiva distribuição nos corredores ferroviários de forma a minimizar as emissões de CO₂ e manter o nível de atendimento ao volume exportado nos terminais portuários.

Com relação à quantidade de material rodante (os vagões e as locomotivas), a Tabela 5.3 detalha a configuração do sistema atual (vide Seção 4.1.2) comparada aos resultados obtidos no modelo de otimização via simulação.

Tabela 5.3: Comparativo da distribuição das composições ferroviárias: cenário real (ano 2022) versus cenário otimizado.

Grupo	Tipo de bitola - MR	Ferrovias possíveis	Número de composições ferroviárias	
			Cenário atual	Cenário otimizado
Tipo 1	Larga	RMN, RMP, FNS, EFC	171	143
Tipo 2	Métrica	RMS, RMP	98	64
Tipo 3	Métrica	FCA, EFVM, RMP	165	101

O campo “ferrovias possíveis” descreve quais são os possíveis corredores ferroviários que determinado tipo de conjunto (composto por vagões e pelas locomotivas) pode trafegar considerando as respectivas interligações de circulação e as diferenciações de bitolas existentes na malha. Nota-se que, ao se considerar a frota de material rodante comum a todas ferrovias semelhantes, é possível executar o volume com menor quantidade de ativos. Assim, a possibilidade de menos composições ferroviárias circulando na ferrovia é benéfica ao sistema, uma vez que reduz os tempos parados por cruzamento dos trens e os gastos com manutenções dos ativos, por exemplo.

A partir das restrições representadas pela Equação 3.6 e pela Equação 3.10, o modelo de otimização via simulação apresenta um rebalanceamento das cargas destinadas aos terminais portuários. No primeiro momento, observa-se a migração das cargas ferroviárias das *commodities* dos portos da região Sudeste para os portos da região Nordeste do Brasil.

Considerando as soluções citadas, atualiza-se o modelo de simulação com as novas premissas dos parâmetros, de forma a se obter probabilisticamente os novos resultados e compará-los ao cenário base posteriormente. O gráfico a seguir apresenta o comparativo entre o cenário base e o cenário otimizado do indicador de volume total exportado nos terminais portuários, via simulação.

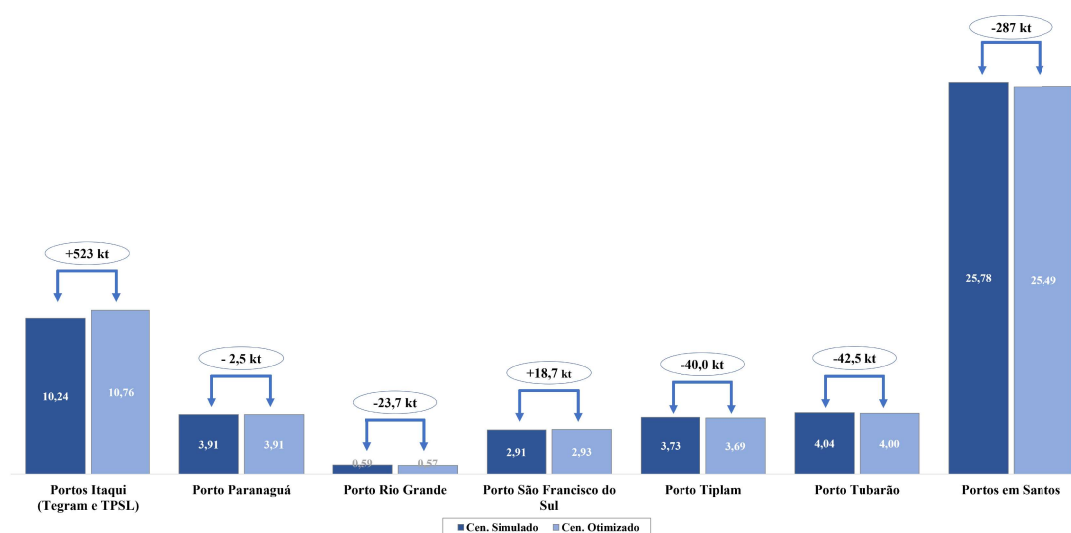


Figura 5.4: Comparativo do volume no cenário simulado versus cenário otimizado.

O comparativo entre a média dos volumes exportados nos cenários simulado e cenário otimizado revela que o segundo envia um volume maior de grãos da Região Sudeste (Porto Tiplam, Porto Tubarão e, principalmente, Portos em Santos), para os portos da região Nordeste (Portos em Itaqui - Tegram e TPSL). Já nos portos da região Sul, há um direcionamento de cargas para o Porto São Francisco do Sul em detrimento do Porto Rio Grande, embora em proporções de toneladas menores, aproximadamente 18,7 kt/ano, conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Comparativo do volume no cenário simulado versus cenário otimizado nos portos.

Portos	Simulado versus Otimizado			Real 2022 versus Otimizado		
	Cen. simulado (t)	Cen. otimizado (t)	Variação (%)	Real 2022 (t)	Cen. otimizado (t)	Variação (%)
Portos Itaqui (Tegram e TPSL)	10.235.000	10.758.750	+ 5,11	10.286.435	10.758.750	+ 4,59
Porto Paranaguá	3.907.500	3.905.000	- 0,06	3.918.498	3.905.000	- 0,34
Porto Rio Grande	592.500	568.750	- 4,00	588.420	568.750	- 3,34
Porto São Francisco do Sul	2.906.250	2.925.000	+ 0,64	2.744.202	2.925.000	+ 6,58
Porto Tiplam	3.725.000	3.685.000	- 1,07	3.714.213	3.685.000	- 0,78
Porto Tubarão	4.038.750	3.996.250	- 1,05	4.044.114	3.996.250	- 1,18
Portos em Santos	25.780.000	25.492.500	- 1,11	25.956.630	25.492.500	- 1,78
Total	51.185.000	51.331.250	+ 0,28	51.252.512	51.331.250	+ 0,15

Na Figura 5.5, a cor verde indica os estados brasileiros (terminais portuários) onde há um aumento de volume do cenário simulado para o cenário otimizado superiores a 40 kt/ano. Por outro lado, a cor vermelha destaca os estados onde há uma redução inferior a 40 kt/ano, e a cor cinza mostra os estados onde as variações de volume entre os cenários são menos relevantes e ficam na faixa entre -40 kt/ano e +40 kt/ano.

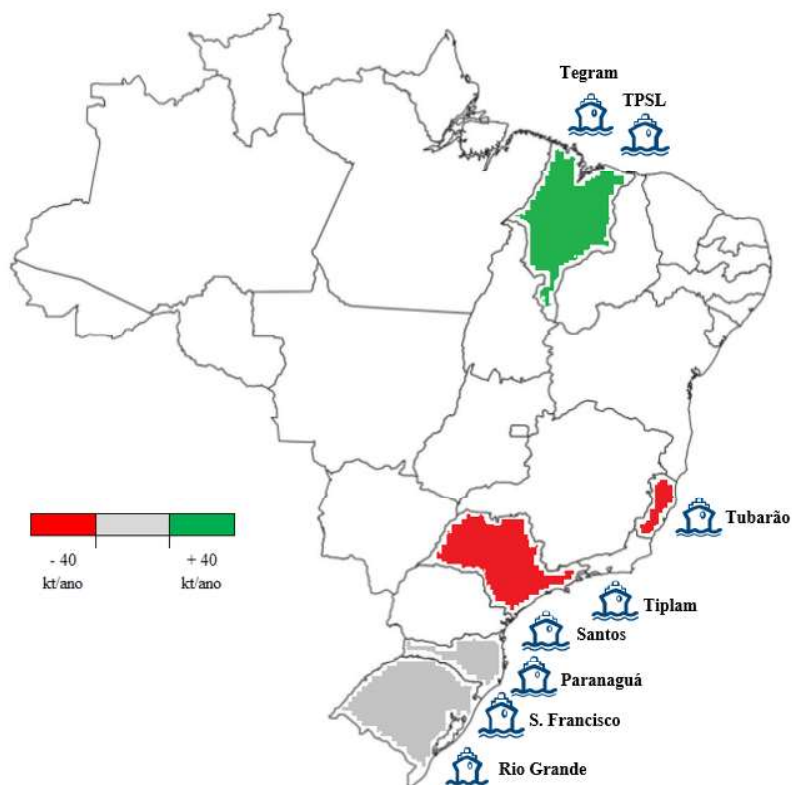


Figura 5.5: Variação do volume exportado: cenário simulado e o cenário otimizado.

Nota-se que há uma evolução considerável na exportação dos grãos direcionados aos terminais portuários em Itaqui nos últimos anos, conforme Figura 5.6 (ANTT, 2022a). Adicionalmente, a linha tracejada indica o volume dos grãos (soja e milho) exportados nestes dois sistemas de acordo com este estudo de otimização via simulação. Caso esse crescimento percentual se perpetue para os próximos anos, estes portos estarão com limitação de capacidade.

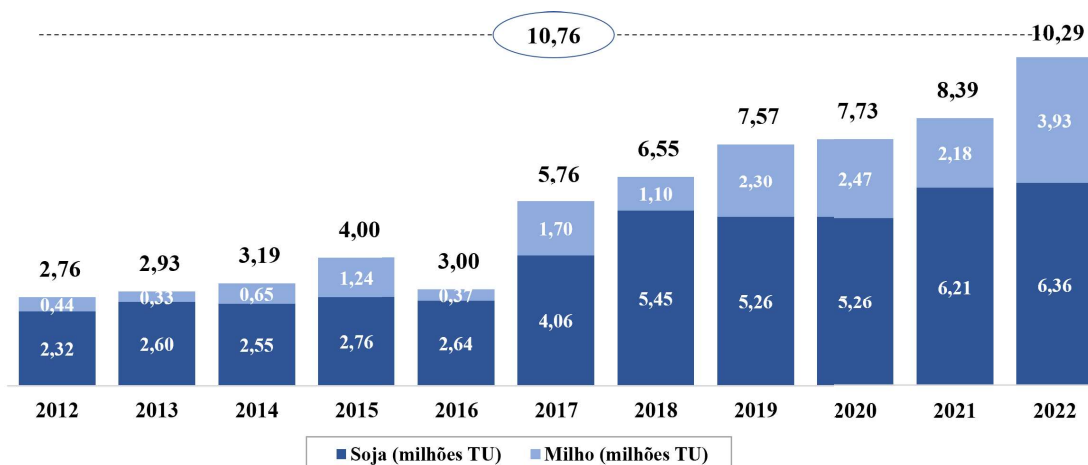


Figura 5.6: Evolução do volume ferroviário destinados aos Portos em Itaquí.

Ao longo das 50 replicações, o indicador dos volumes exportados nestes *sites*, considerando IC 95%, variou em ± 375 kt/ano em torno da média igual a 10,76 Mt/ano, com o mínimo e o máximo das amostras variando entre 10,56 Mt/ano e 10,94 Mt/ano, respectivamente. Esses resultados estão em linha com os limites das capacidades máximas de descarga ferroviária apontadas para estes terminais portuários citados na Tabela 4.5. Ou seja, aproximadamente 11,0 Mt/ano para os Portos Tegram e TPSL.

As variações no direcionamento do volume dos grãos exportados, conforme Tabela 5.4, deve-se aos corredores ferroviários por onde estas cargas circulam (EFC, FNS e RMN) possuírem uma melhor eficiência energética (l/milhares TKU) em detrimento do transporte ferroviário no sistema real, via malha RMP e FCA (vide Tabela 4.7). A melhor eficiência no consumo de diesel compensa a maior distância entre as origens e os destinos (Tabela 4.10). Com isso, as emissões de CO₂ são reduzidas (vide Tabela 5.5).

Tabela 5.5: Comparativo das emissões de CO₂ no cenário simulado versus cenário otimizado.

Portos	Cen. simulado (kg)	Cen. otimizado (kg)	Variação (%)
Portos Itaquí (Tegram e TPSL)	399.951.266	410.049.473	+ 2,52
Porto Paranaguá	42.338.316	40.136.462	- 5,20
Porto São Francisco do Sul	40.621.954	39.041.882	- 3,89
Porto Tiplam	316.868.202	284.927.029	- 10,08
Porto Tubarão	407.906.233	395.824.104	- 2,96
Portos em Santos	1.436.498.741	1.407.759.142	- 2,00
Total	2.661.425.184	2.594.612.931	- 2,51

A Figura 5.7 ilustra as estimativas das emissões de CO₂ no transporte ferroviário desde os terminais de origem até a chegada aos portos, tanto no cenário base simulado quanto no cenário otimizado.

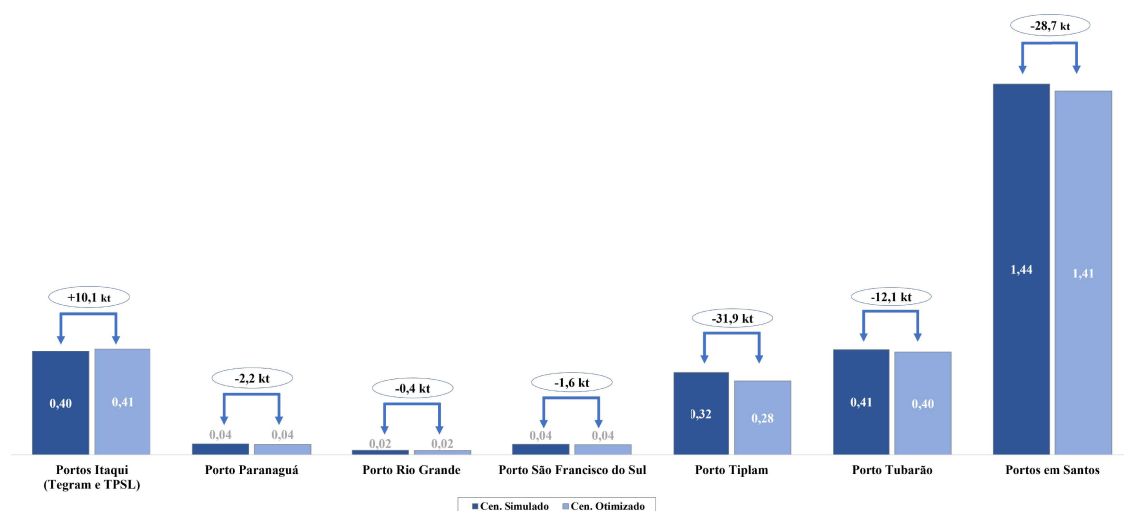


Figura 5.7: Comparativo da emissão de CO₂ no cenário simulado versus cenário otimizado.

A migração das cargas entre os terminais portuários com o objetivo de possibilitar um plano logístico mais sustentável, impacta em 1,39% da receita do sistema de transporte ferroviário no curto prazo, conforme Tabela 5.6. Por outro lado, mesmo que não explorado neste estudo, há oportunidades de ganhos financeiros relacionados, por exemplo, à redução do consumo de diesel, aos ganhos de receita com a venda de crédito carbono e com o transporte das cargas de retorno no sentido importação ou à diminuição da necessidade de manutenção do material rodante, uma vez que é possível realizar um maior volume mesmo com menos vagões e menos locomotivas distribuídos nos corredores ferroviários.

Tabela 5.6: Comparativo das receitas no cenário simulado versus cenário otimizado.

Portos	Cen. simulado (US\$)	Cen. otimizado (US\$)	Variação (%)
Portos Itaqui (Tegram e TPSL)	1.253.415.596	1.287.860.925	+ 2,75
Porto Paranaguá	262.844.632	253.706.648	- 3,48
Porto Rio Grande	46.179.646	45.200.273	- 2,12
Porto São Francisco do Sul	209.177.988	201.563.276	- 3,64
Porto Tiplam	351.332.806	329.854.442	- 6,11
Porto Tubarão	451.287.824	433.820.999	- 3,87
Portos em Santos	2.814.027.670	2.761.099.201	- 1,88
Total	5.388.266.162	5.313.105.764	- 1,39

A Figura 5.8 detalha as reduções das receitas no transporte ferroviário em ambos cenários simulados.

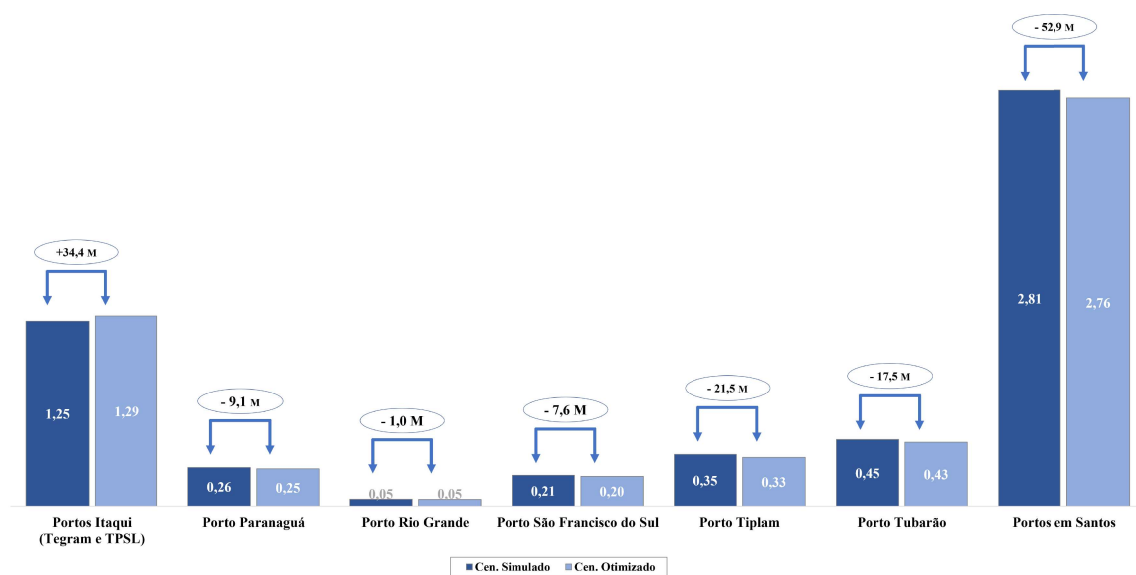


Figura 5.8: Comparativo da receita no cenário simulado versus cenário otimizado.

A Tabela 5.7 resume os principais resultados (IC 95%) dos dois cenários analisados, a partir das replicações. O detalhamento desses resultados encontra-se no Apêndice A.5 e no Apêndice A.6.

Tabela 5.7: Parâmetros estatísticos dos indicadores no cenário simulado e no cenário otimizado.

Parâmetro estatístico	Volume (t)		Emissão de CO ₂ (kg)		Receita (US\$)	
	Cen. simulado	Cen. otimizado	Cen. simulado	Cen. otimizado	Cen. simulado	Cen. otimizado
Limite inferior	51.107.704	51.294.260	2.653.643.903	2.587.923.483	5.377.104.080	5.300.946.776
Média	51.185.000	51.331.250	2.661.425.184	2.594.612.930	5.388.266.162	5.313.105.764
Limite superior	51.262.296	51.368.240	2.669.206.466	2.601.302.377	5.399.428.243	5.325.264.752
Desvio padrão	271.980	130.155	27.379.899	23.538.075	39.275.879	42.783.682

Todos as estatísticas descritivas dos resultados apresentados acerca do cenário otimizado estão especificadas no Apêndice A.3.

5.4 Análises dos resultados e discussões

De acordo com os resultados, é possível obter um plano capaz de reduzir aproximadamente 66,8 kt de CO₂/ano (ou cerca de - 2,51%) e, ainda assim, realizar um maior volume exportado de grãos nos terminais portuários brasileiros em 146,2 kt/ano (aproximadamente + 0,28%). Dessa forma, evidencia-se que a ferramenta de otimização via simulação alcançou o seu objetivo inicial.

Além disso, as análises indicam que a redução mais significativa nas emissões de CO₂ ocorreu com o direcionamento das cargas aos portos em Itaqui (o porto Tegram e o porto TPSL) localizados na região Nordeste ao utilizar os corredores ferroviários operados pelas concessionárias EFC, FNS e RMN (cenário proposto), em detrimento dos portos situados na região Sudeste do Brasil: os portos em Santos, o porto Tiplam

e o porto Tubarão ao utilizar as ferrovias FCA e RMP (cenário atual). Isso se deve em função da pior eficiência energética das composições ao trafegarem nestes últimos corredores ferroviários citados (vide Tabela 4.7). Dessa forma, no direcionamento das cargas proposto pela ferramenta, mesmo que as distâncias entre os terminais de origem dos grãos aos portos nas regiões Nordeste sejam maiores comparadas às distâncias do cenário base, o menor consumo de diesel impacta positivamente as emissões de CO₂.

Este estudo traz contribuições teóricas para a modelagem de sistemas complexos de filas guiados por aspectos sustentáveis. Os atuais trabalhos “estado da arte” de Mogale et al. (2018), Maiyar e Thakkar (2019), Mogale et al. (2020) e Maiyar e Thakkar (2020) fornecem uma contribuição valiosa para os sistemas da cadeia de suprimentos dos grãos. No entanto, o problema é explorado por métodos de otimização, além de não ser apresentada a situação atual em âmbito nacional.

A nova abordagem de modelagem proposta é capaz de representar a realidade atual com grande precisão por meio da simulação de eventos discretos e propõem mudanças na realidade através da otimização via simulação que contribui para a redução do impacto ambiental, além de abordar os aspectos financeiros do transporte ferroviário. Como implicações práticas, o plano resultante obtido pela ferramenta de otimização via simulação sugere um direcionamento distinto das locomotivas e dos vagões aos terminais, às ferrovias e aos portos para as empresas multimodais brasileiras.

Além disso, com o crescimento no médio e no longo prazo da produção dos grãos e um possível direcionamento dessa carga para os portos da região Nordeste, os resultados podem indicar uma antecipação para os potenciais novos investimentos que sejam sustentáveis e capazes de proporcionar a redução nas emissões de CO₂ no transporte ferroviário, mantendo o nível de serviço com relação ao volume exportado.

Adicionalmente, o modelo de planejamento tático proposto também pode ser utilizado como uma ferramenta complementar à realização das avaliações relacionadas à remoção dos gargalos, através do aumento da capacidade de cada sistema que compõe a cadeia logística integrada.

Tais práticas de planejamento mais sustentáveis permitem o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, a responsabilidade social e a preservação ambiental (Elkington, 2013). Além de melhorarem a eficiência energética com a integração dos modos de transporte de maneira mais produtiva e reduzirem os impactos ambientais em suas operações, as empresas que adotam as práticas ecologicamente responsáveis são vistas de forma mais positiva pela sociedade, o que pode gerar a lealdade e fidelização à marca. Conseqüentemente, ao conseguirem equilibrar a sustentabilidade com as novas oportunidades de negócios e a atração de investimentos advindos dessas práticas ambientalmente corretas, as empresas conseguem se tornar mais competitivas e lucrativas.

Finalmente, o modelo proposto é flexível o suficiente para incorporar informações

adicionais em diferentes contextos. Por exemplo, as aplicações voltadas para o lucro podem incluir preços de *commodities* e os parâmetros de custeio das operações, como o frete e os custos de manutenção. O modelo também pode ser utilizado para avaliar cenários de investimento ou de desinvestimento com a expansão ou com a desativação dos corredores ferroviários.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos futuros

“Joy lies in the fight, in the attempt, in the suffering involved, not in the victory itself.”

Mahatma Gandhi

Esta tese propõe uma estratégia a partir do método de otimização via simulação para o planejamento tático de uma cadeia logística multimodal (terminais, ferrovias e portos) responsável pela exportação dos grãos, envolvendo toda a extensão territorial de um país com proporções continentais. O objetivo é elaborar uma análise integrada e sustentável ainda inexplorada na literatura e, que atenda aos requisitos dessa demanda, reduzindo as emissões de CO₂ no transporte ferroviário, além de considerar estimativas para a receita logística neste modo. Por fim, a aplicabilidade do modelo é testada em um estudo de caso.

A modelagem unificada dos terminais, das ferrovias e dos portos com a definição de suas respectivas capacidades é capaz de capturar várias sinergias e *trade-offs* oriundos de objetivos por vezes conflitantes e desafiadores no planejamento logístico: o atendimento ao volume exportado, a agilidade no transporte das cargas e a possibilidade de redução das emissões de CO₂.

Para resolver esse problema logístico de grande porte utiliza-se o método de otimização via simulação. É elaborado um modelo de simulação que representa o sistema real, seguindo a estratégia de manter o nível de serviço de atendimento ao volume dos grãos exportados e, ao mesmo tempo, definir um plano integrado mais sustentável do ponto de vista ambiental.

Embora neste sistema logístico existam os fluxos de retorno dos grãos no sentido importação como os fertilizantes por exemplo e, em alguns períodos do ano, a *commodity* açúcar utilize os mesmos ativos ferroviários (locomotivas e vagões do tipo *hopper*) dos grãos, o sistema modelado é um “recorte” dessa realidade. Ou seja, o escopo deste estudo considera apenas a exportação do milho e da soja.

Este trabalho preenche as lacunas da literatura, pois aborda decisões da cadeia logística e de sustentabilidade a nível nacional, abordando o planejamento do transporte ferroviário na presença das incertezas associadas à demanda e à oferta dos grãos. Além disso, o método é testado em um estudo de caso e traz estimativas relacionadas às emissões de CO₂ e às questões financeiras do ponto de vista das receitas ferroviárias.

Esta aplicação ilustra como esta metodologia de otimização via simulação pode fornecer uma análise mais profunda em comparação com a aplicação desses dois métodos individualmente. Todos esses assuntos são tratados em vários trabalhos, mas não de forma integrada em um mesmo estudo e com uma aplicação real prática.

Além de avaliar o cenário original referente ao realizado no ano de 2022, investiga-se qual seria a melhor configuração das composições (os vagões e as locomotivas) nos corredores ferroviários e realiza-se um melhor balanceamento das cargas a serem exportadas via terminais portuários de forma a reduzir as emissões de CO₂ no transporte via ferrovia.

As análises constatam que a simulação realizada se mostra válida e eficaz. Além disso, a heurística utilizada também atende ao objetivo principal do estudo: encontrar um plano integrado e mais sustentável ambientalmente, capaz de satisfazer as exigências do nível de serviço logístico e reduzir as emissões de CO₂ no transporte dos grãos.

O resultado comparado ao cenário base (histórico do ano de 2022) é um valor próximo a 66,8 kt/ano emitidos de CO₂ a menos e com uma maior execução de volume exportado dos grãos em 146,2 kt/ano. Entretanto, esse plano logístico integrado e mais sustentável ambientalmente, com a migração das cargas entre os terminais portuários, torna o sistema de transporte ferroviário menos rentável do ponto de vista econômico (-1,39%). Por outro lado, mesmo que não explorado neste estudo, há oportunidades de ganhos financeiros relacionados, por exemplo, à redução do consumo de diesel ou à diminuição da necessidade de manutenção do material rodante, uma vez que é possível executar um maior volume mesmo com menos vagões e menos locomotivas distribuídos nos corredores ferroviários.

O modelo de planejamento tático da cadeia logística proposto pode ser utilizado por tomadores de decisão ao viabilizar a antecipação de cenários. Além disso, também pode ser utilizado como ferramenta complementar à realização de: (i) análises de investimentos no médio e no longo prazo mais responsáveis ambientalmente ou (ii) avaliações relacionadas à remoção dos gargalos, por meio de aumento da capacidade de cada sistema que compõe a cadeia logística integrada.

Em conclusão, este estudo apresenta melhores configurações que possibilitam a execução de um maior volume nos fluxos para a exportação dos grãos através dos arcos (terminais de origem aos terminais de destino) disponíveis no sistema logístico nos cenários atuais. Entretanto, também é aplicável a cenários futuros. Com o crescimento

na produção de grãos do Brasil no longo prazo, esta tese contribui para o direcionando das cargas aos terminais portuários de maneira sustentável, antecipando novos investimentos capazes de proporcionar a redução nas emissões de CO₂ no transporte ferroviário.

O estudo, no entanto, apresenta algumas limitações. Foram abordados apenas o planejamento tático da cadeia de suprimentos de exportação dos grãos. O detalhamento das premissas operacionais e a modelagem minuciosa dos terminais, das ferrovias ou dos portos não foram explorados. Além disso, esse sistema logístico também é atendido via modo hidroviário. Essa característica não foi considerada nas análises. Já as estimativas das receitas e das emissões de CO₂ contemplaram apenas o sistema de transporte ferroviário, o que sugere que no futuro, possa haver um maior detalhamento da operação rodoviária e portuária com relação a estas projeções.

Uma possibilidade de estudo consiste em análises de sustentabilidade mais abrangentes incluindo elementos de custo nos valores financeiros e possibilidades de investimentos sustentáveis em todos os elos da cadeia logística, i.e., aos sistemas de terminais e aos sistemas portuários. Segundo, o transporte de carga geral representa apenas 26,2% da matriz ferroviária atual (ANTF, 2022). Logo, para uma melhor representatividade, implementar outros fluxos nas análises como o minério de ferro, por exemplo, é desejável. Terceiro, implementar heurísticas mais elaboradas que permitam soluções melhores e, quando aplicadas a este problema logístico de grande porte, tragam a redução de tempo computacional. Quarto, considerar os possíveis impactos ambientais com a adoção da utilização do biodiesel, das locomotivas elétricas ou das locomotivas diesel-elétricas no transporte ferroviário. E, por fim, aumentar a abrangência das estimativas das emissões de CO₂ aos sistemas de terminais e de portos.

Referências Bibliográficas

- Abadi, A.; Ioannou, P. e Dessouky, M. (2015). Multi-modal dynamic freight load balancing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2):356–366.
- Almeder, C. e Preusser, M. (2007). A hybrid simulation optimization approach for supply chains. In *The 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, pp. 1–6.
- Amaran, S.; Sahinidis, N.; Sharda, B. e Bury, S. (2016). Simulation-optimisation: A review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research*, 240:351–380.
- ANP (2016). Agência nacional de petróleo, gás natural e biocombustíveis. Disponível em: http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/Anuario_Estatistico_ANP_2016.pdf. Data: Junho, 2018.
- ANTAQ (2018). Agência nacional dos transportes aquaviários. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/planejamento-e-gestao/planos-mestres-portos>. Data: Agosto, 2022.
- ANTAQ (2022). Agência nacional dos transportes aquaviários. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br>. Data: Agosto, 2022.
- ANTF (2022). Associação nacional dos transportadores ferroviários. Disponível em: <https://www.antf.org.br/>. Data: Agosto, 2022.
- ANTT (2022a). Agência nacional de transportes terrestres. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br>. Data: Agosto, 2022.
- ANTT (2022b). Agência nacional de transportes terrestres. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede-2022>. Data: Agosto, 2022.
- ANTT (2022c). Agência nacional de transportes terrestres. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/concessoes-ferroviarias>. Data: Agosto, 2022.

- April, J.; Glover, F.; Kelly, J. e Laguna, M. (2003). Practical introduction to simulation optimization. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 1:71–78.
- Automation, R. (2004). Arena user's guide.
- Bahramian, Z. e Bagheri, M. (2015). A simulation-based optimisation approach for passenger train timetabling with periodic track maintenance and stops for praying. *Journal of Modern Transportation*, 23(2):148–157.
- Bandaly, D.; Satir, A.; Kahyaoglu, Y. e Shanker, L. (2012). Supply chain risk management: conceptualisation, framework and planning process. *Risk Management*, 14(4):249–271.
- Banks, J.; Carson, J.; Nelson, B. e Nicol, M. (2005). *Discrete-Event System Simulation*, volume 4. Prentice hall Englewood Cliffs.
- Barton, R. (2009). Simulation optimization using metamodels. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 230–238.
- Baykasoglu, A. e Subulan, K. (2016). A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95:207–247.
- Bishop, C. (1994). Neural networks and their applications. *Review of scientific instruments*, 65(6):1803–1832.
- Bowersox, D.; Closs, D. e Cooper, M. (1996). *Logistical management*. McGraw-Hill.
- Caris, A.; Macharis, C. e Janssens, G. (2013). Decision support in intermodal transport: A new research agenda. *Computers in Industry*, 64(2):105–112.
- Carson, Y. e Maria, A. (1997). Simulation optimization: Methods and applications. In *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation*, pp. 118–126.
- Christopher, M. (1992). *Logistics: the strategic issues*. Chapman & Hall.
- Chwif, L. e Medina, A. (2007). *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos - Teoria & Aplicações*. Editora dos Autores São Paulo.
- Chávez, H.; Castillo-Villar, K.; Herrera, L. e Bustos, A. (2015). Simulation-based optimisation framework for multi-echelon inventory systems under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 73:1–16.

- Chávez, H.; Castillo-Villar, K.; Herrera, L. e Bustos, A. (2017). Simulation-based multiobjective model for supply chains with disruptions in transportation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43:39–49.
- Conab (2023). Companhia nacional de abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Data: Abril, 2023.
- Crainic, T.; Gobbato, L.; Perboli, G. e Rei, W. (2016). Logistics capacity planning: A stochastic bin packing formulation and a progressive hedging metaheuristic. *European Journal of Operational Research*, 253(2):404–417.
- Crainic, T.; Perboli, G. e Rosano, M. (2018). Simulation of intermodal freight transportation systems: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 270(2):401–418.
- De La Torre, R.; Corlu, C.; Faulin, J.; Onggo, B. e Juan, A. (2021). Simulation, optimization, and machine learning in sustainable transportation systems: models and applications. *Sustainability*, 13(3):1551.
- Duan, Q. e Liao, T. (2014). Optimisation of blood supply chain with shortened shelf lives and abo compatibility. *International Journal of Production Economics*, 153:113–129.
- EcoTransIT (2023). Ecotransit world methodology. Disponível em: <https://www.ecotransit.org/en/methodology/>. Data: Abril, 2023.
- Elbert, R.; Müller, J. e Rentschler, J. (2020). Tactical network planning and design in multimodal transportation - a systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management*, 35:100462.
- Elkington, J. (2013). Enter the triple bottom line. in the triple bottom line: Does it all add up? *Routledge*, pp. 1–16.
- EMBRAPA (2020). Sistema de inteligência territorial estratégica da macrologística agropecuária brasileira. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/caminhos-da-safra>. Data: Março, 2023.
- Eskandari, H.; Mahmoodi, E.; Fallah, H. e Geiger, C. (2011). Performance analysis of comercial simulation-based optimization packages: Optquest and witness optimizer. In *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 2358–2368.
- Eskandarpour, M.; Dejax, P.; Miemczyk, J. e Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: an optimisation-oriented review. *Omega*, 54:11–32.

- Fahimnia, B.; Farahani, R.; Marian, R. e Luong, L. (2012). A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1):1–19.
- Farahani, N.; Noble, J.; Klein, C. e Enayati, M. (2018). A decision support tool for energy efficient synchromodal supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 186:682–702.
- Farhad, A. (1992). A tutorial on simulation optimization. In *Proceedings of the 24th Conference on Winter Simulation*, pp. 198–204.
- Faria, C. (2016). Análise do planejamento ferroviário: uma abordagem utilizando simulação de eventos discretos. Master’s thesis, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.
- Faria, C. e Cruz, M. (2015). Simulation modelling of vitoria-minas closed loop rail network. *Transport Problems*, 10:125–139.
- Felberbauer, T.; Altendorfer, K. e A.J., P. (2020). A decision support tool for energy efficient synchromodal supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 186:682–702.
- FGV (2022). Fundação getúlio vargas transportes. Disponível em: <https://transportes.fgv.br/noticias/custo-brasil-do-setor-logistico-deve-consumir-133-do-pib-em-2022>. Data: Maio, 2023.
- Fioroni, M. (2008). *Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições*. PhD thesis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.
- Fu, M. (2002). Optimisation for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 14(3):192–215.
- Furian, N.; O’Sullivan, M.; Walker, C.; S., V. e D., N. (2015). A conceptual modeling framework for discrete event simulation using hierarchical control structures. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 56:82–96.
- Ghasemi, P. e Khalili-Damghani, K. (2020). A robust simulation–optimization approach for pre-disaster multi-period location–allocation–inventory planning. *Mathematics and Computers in Simulation*, 179:69–95.
- GLEC (2022). Global logistics emissions concil framework for logistics emissions accounting and reporting. Disponível em: <https://www.feport.eu/images/downloads/glec-framework-20.pdf>. Data: Agosto, 2022.

- Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8(1):156–166.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operational Research*, 13(5):533–549.
- Glover, F.; Hao, J.; Lutton, E.; Ronald, E.; Schoenauer, M. e Snyers, D. (1998). A template for scatter search and path relinking. *Artificial Evolution*, 1363:13–54.
- Hansen, P. (1986). The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. In *Congress on numerical methods in combinatorial optimization, Capri, Italy*, pp. 70–145.
- Harrel, C.; B.K., G. e Bowden, R. (2004). *Simulation Using ProModel*. 2ed. New York: McGraw-Hil.
- Haykin, S. (2001). *Redes neurais: princípios e prática*. Bookman Editora.
- Hrušovský, M.; Demir, E.; Jammerneegg, W. e Van Woensel, T. (2017). Hybrid simulation and optimization approach for green intermodal transportation problem with travel time uncertainty. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30:1–31.
- Huerta-Barrientos, A.; Elizondo-Cortés, M. e De La Mota, I. (2014). Analysis of scientific collaboration patterns in the co-authorship network of simulation-optimisation of supply chains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46:135–148.
- IPCC (2016). International panel on climate change: Task force on national greenhouse gas inventories. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>. Data: Dezembro, 2016.
- Joborn, M.; Crainic, T.; Gendreau, M.; Holmberg, K. e Lundgren, J. (2004). Economies of scale in empty freight car distribution in scheduled railways. *Transportation Science*, 38(2):121–255.
- Koberg, E. e Longoni, A. (2019). A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 207:1084–1098.
- Korzenowski, A. e Werner, L. (2012). Probabilidade do erro do tipo i nas cartas x e s de shewhart sob não normalidade. *Production*, 22(4):807–816.
- Law, A. (2007). *Simulation Modeling and Analysis*, volume 4rd Edition. McGraw-Hill, New York.

- Layeb, S.; Jaoua, A.; Jbira, A. e Makhlouf, Y. (2018). A simulation-optimisation approach for scheduling in stochastic freight transportation. *Computers & Industrial Engineering*, 126:99–110.
- Li, Y.; NG, S.; Xie, M. e Goh, T. (2010). A systematic comparison of metamodeling techniques for simulation optimization in decision support systems. *Applied Soft Computing*, 10(4):1257–1273.
- Liotta, G.; Kaihara, T. e Stecca, G. (2016). Optimization and simulation of collaborative networks for sustainable production and transportation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1):417–424.
- Listes, O. e Dekker, R. (2005). A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1):268–287.
- Liu, J.; Yu, Y.; Zhang, L. e Nie, C. (2011). An overview of conceptual model for simulation and its validation. *Procedia Engineering*, 24:152–158.
- Macharis, C. e Bontekoning, Y. (2004). Opportunities for or in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of Operational Research*, 153(2):400–416.
- Maiyar, L. M. e Thakkar, J. J. (2019). Environmentally conscious logistics planning for food grain industry considering wastages employing multi objective hybrid particle swarm optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 127:220–248.
- Maiyar, L. M. e Thakkar, J. J. (2020). Robust optimisation of sustainable food grain transportation with uncertain supply and intentional disruptions. *International Journal of Production Research*, 58(18):5651–5675.
- Marinov, M.; Şahin, I.; Ricci, S. e Vasic-Franklin, G. (2013). Railway operations, time-tabling and control. *Research in Transportation Economics*, 41(1):59–75.
- Martí, R.; Laguna, M. e Glover, F. (2006). Principles of scatter search. *European Journal of Operational Research*, 169(2):359–372.
- McCulloch, W. e Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115–133.
- Mesabbah, M.; Rahoui, S.; Ragab, M.; Mahfouz, A. e Arisha, A. (2017). Seasonal recruiting policies for table grape packing operations: A hybrid simulation modelling

- study. In *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, pp. 1680–1691. IEEE.
- M.Gendreau e J.Potvin (2009). *Handbook of Metaheuristics*. Springer New York, NY.
- Moallemi, E.; Elsayah, S.; Turan, H. e Ryan, M. (2018). Multi-objective decision making in multi-period acquisition planning under deep uncertainty. In *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, pp. 1334–1345. IEEE.
- Mogale, D.; Cheikhrouhou, N. e Tiwari, M. K. (2020). Modelling of sustainable food grain supply chain distribution system: a bi-objective approach. *International Journal of Production Research*, 58(18):5521–5544.
- Mogale, D.; Kumar, M.; Kumar, S. K. e Tiwari, M. K. (2018). Grain silo location-allocation problem with dwell time for optimization of food grain supply chain network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111:40–69.
- Mokhtari, H. e Hasani, A. (2017). A multi-objective model for cleaner production-transportation planning in manufacturing plants via fuzzy goal programming. *Journal of Manufacturing Systems*, 44:230–242.
- Mommens, K.; Van Lier, T. e Macharis, C. (2020). Multimodal choice possibilities for different cargo types: Application to belgium. *Research in Transportation Business & Management*, 37(100528).
- Nikolopoulou, A. e Ierapetritou, M. (2012). Hybrid simulation-based optimisation approach for supply chain management. *Computers & Chemical Engineering*, 47:183–193.
- Oliveira, B. (2019). *Alocação de leitos de internação com o uso da abordagem de Otimização via Simulação*. PhD thesis, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- Oliveira, J.; Jin, M.; Lima, R.; Kobza, J. e Montevechi, J. (2019). The role of simulation and optimisation methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 92:17–44.
- Park, K. (2020). A heuristic simulation-optimization approach to information sharing in supply chains. *Symmetry*, 12(8):1319.
- Park, Y. e Kim, H. (2016). Simulation-based evolutionary algorithm approach for deriving the operational planning of global supply chains from the systematic risk management. *Computers in Industry*, 83:68–77.

- Pidd, M. (2004). *Computer Simulation in Management Science*. John Wiley & Sons, Inc.
- Pinto, L.; Silva, P. e Young, T. (2015). A generic method to develop simulation models for ambulance systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 51:170–183.
- Rachih, H.; Mhada, F. e Chiheb, R. (2022). Simulation optimization of an inventory control model for a reverse logistics system. *Decision Science Letters*, 11(1):43–54.
- Rebsa, T.; Brandenburgab, M. e Seuringa, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, 208:1265–1280.
- Remiel, F.; Cauvin, A. e Ferrarini, A. (2014). Conceptual design and simulation of an automotive body shop assembly line. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):760–765.
- Revista Ferroviária (2021). Anuário da revista ferroviária 2020/2021. Disponível em: <https://revistaferroviaria.com.br/anuario-rf/>. Data: Abril, 2023.
- Rezaee, A.; Dehghanian, F. e Fahimnia, B. (2017). Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price. *Annals of Operations Research volume*, 250:463–485.
- Robinson, S. (2008). Conceptual modelling for simulation part i: definition and requirements. *Journal of the Operational Research Society*, 59(3):278–290.
- Rondinell, D. e Berry, M. (2000). Multimodal transportation, logistics, and the environment: managing interactions in a global economy. *European Management Journal*, 18(4):398–410.
- Sahay, N. e Ierapetritou, M. (2015). Flexibility assessment and risk management in supply chains. *AIChE Journal*, 61(12):4166–4178.
- Schwartz, J.; Wang, W. e Rivera, D. (2006). Simulation-based optimisation of process control policies for inventory management in supply chains. *Automatica*, 42(8):1311–1320.
- Shahabi, A.; Raissi, S.; Khalili-Damghani, K. e Rafei, M. (2021). An event-driven simulation-optimisation approach to improve the resiliency of operation in a double-track urban rail line. *Journal of Simulation*, 16(5):526–545.
- Sharifnia, S.; Amrollahi Biyouki, S.; Sawhney, R. e Hwangbo, H. (2021). Robust simulation optimization for supply chain problem under uncertainty via neural network metamodeling. *Computers and Industrial Engineering*, 162(107693).

- Silveira, I. (2017). Metodologia de otimização via simulação para dimensionamento da infraestrutura de sistemas logísticos intermodais para o escoamento de commodities. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- Solomon, S.; Pannirselvam, G. e Li, H. (2022). Using integrated simulation-optimisation to optimise staffing decisions in a service supply chain. *International Journal of Integrated Supply Management*, 15(1):1–26.
- Souza, M. (2018). *Determinantes da disponibilidade interna, do processamento doméstico e da oferta de exportação brasileira de soja em grãos*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.
- Srivastav, R.; Srinivasan, K. e Sudheer, K. (2011). Simulation-optimisation framework for multi-season hybrid stochastic models. *Journal of Hydrology*, 404(3-4):209–225.
- Sun, Y.; Lang, M. e Wang, D. (2015). Optimization models and solution algorithms for freight routing planning problem in the multi-modal transportation networks: A review of the state-of-the-art. *The Open Civil Engineering Journal*, 9:714–723.
- Swain, J. (2005). “gaming” reality: biennial survey of discrete-event simulation software tools. *OR/MS Today*, 32(6).
- Tekin, E. e Sabuncuoglu, I. (2004). Simulation-optimisation: A comprehensive review on theory and applications. *IIE Transactions*, 36(11):1067–1081.
- Tran, N. K. e Lam, J. S. L. (2021). Effects of container ship speed on co2 emission, cargo lead time and supply chain costs. *Research In Transportation Business and Management*, 43(100723).
- Tsai, S. e Zheng, Y. (2013). A simulation-optimisation approach for a two-echelon inventory system with service level constraints. *European Journal of Operational Research*, 229(2):364–374.
- Wan, X.; Penny, J. e Reklaitis, G. (2005). Simulation-based optimization with surrogate models - application to supply chain management. *Computers & Chemical Engineering*, 29(6):1317–1328.
- Wang, H.; Zhang, Y. e Chen, J. (2021). An evolutionary multi-objective simulation optimization algorithm for supply chain with uncertain demands. *Journal of System Simulation*, 33(12):2761–2770.
- Wang, L. e Shi, L. (2013). Simulation optimization: a review on theory and applications. *Acta Automatica Sinica*, 39(11):1957–1968.

- Wang, Q.; Chen, J.; Tseng, M.; Luan, H. e Ali, M. (2020). Modelling green multimodal transport route performance with witness simulation software. *Journal of Cleaner Production*, 248(119245).
- Ye, W. e You, F. (2016). A computationally efficient simulation-based optimisation method with region-wise surrogate modeling for stochastic inventory management of supply chains with general network structures. *Computers and Chemical Engineering*, 87(1):164–179.
- Yegul, M.; Erenay, F.; Striepe, S. e Yavuz, M. (2017). Improving configuration of complex production lines via simulation-based optimisation. *Computers & Industrial Engineering*, 109:295–312.
- You, F.; Wassick, J. e Grossmann, I. (2009). Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: models and algorithms. *AIChE Journal*, 55(4):931–946.
- Zhang, X.; Li, L. e Zhang, J. (2019). An optimal service model for rail freight transportation: Pricing, planning, and emission reducing. *Journal of Cleaner Production*, 218:565–574.
- Zhao, Y.; Ioannou, P. e Dessouky, M. (2019). Dynamic multi-modal freight routing using a co-simulation optimisation approach. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 20(7):2657–2667.

Apêndice A

A.1 Parâmetros do modelo de simulação via otimização

Tabela A.1: Atributos do modelo de simulação via otimização.

Atributos	Unidade
Terminal de origem i , porto de destino j , composição ferroviária z e mercadoria k	
Tamanho de: caminhão y , composição ferroviária z e navio s	t
Horário de chegada de: embarcação s no porto j , caminhão y no terminal i , composição ferroviária z no porto j e composição ferroviária z no terminal i	tempo
Indicação da operação da composição ferroviária z no porto j	binário

Tabela A.2: Parâmetros de *inputs* gerais do modelo de simulação via otimização.

Parâmetros gerais	Unidade
Matriz de carregamento da <i>commodity</i> k na origem i	t
Sazonalidade da <i>commodity</i> k no mês m	%
Capacidade do caminhão y para transportar a <i>commodity</i> k	t
Capacidade de armazenamento da <i>commodity</i> k no terminal i e no porto j	t
Distância da origem i ao destino j	km
Emissão de CO ₂ por composição ferroviária z para a rota da origem i ao destino j	kg
Indicação de quais portos j podem operar a <i>commodity</i> k e quais terminais i podem operar a <i>commodity</i> k	binário
Número de vagões e locomotivas nas composições ferroviárias z	quantidade
Peso médio dos vagões nas composições ferroviárias z	t
Indicação se a composição ferroviária z tem permissão para transportar a <i>commodity</i> k	binário
Número total de vagões e locomotivas no sistema	quantidade

Tabela A.3: Parâmetros de produtividade do modelo de simulação via otimização.

Parâmetros de tempo e taxas de produtividade	Unidade
Tempo pré-atracação e pós-atracação dos navios s transportando <i>commodity</i> k no porto j	minutos
Taxa operacional: embarcações s transportando <i>commodity</i> k no porto j e composições ferroviárias z transportando <i>commodity</i> k no terminal j	t/h
Tempo para tombamento de carga do caminhão y transportando mercadoria k no terminal i	minutos
Tempo de pré-carregamento ou descarregamento da composição ferroviária z transportando a <i>commodity</i> k no terminal i e porto j	minutos
Tempo de pós-carregamento ou descarregamento da composição ferroviária z transportando a <i>commodity</i> k no terminal i e porto j	minutos
Custo de transporte para a composição ferroviária transportar a <i>commodity</i> k do terminal i ao porto j	US\$/t
Tempo de viagem do porto j ao terminal i e/ou do terminal i ao porto j	h

Tabela A.4: Variáveis controle do modelo de simulação.

Variáveis controle do modelo de simulação.	Unidade
Controle de demanda da <i>commodity</i> k : no porto j e no terminal i	t
Em trânsito: controle de estoque da <i>commodity</i> até o porto j e controle de estoque até o terminal i	t
Controle da necessidade da <i>commodity</i> k : no porto j e no terminal i	t
Estoque instantâneo e em trânsito: controle de estoque da <i>commodity</i> k no porto j e controle de estoque da <i>commodity</i> k no terminal i	t

Tabela A.5: Variáveis controle do modelo de otimização.

Controle das variáveis na otimização	Unidade
Matriz de embarque da <i>commodity</i> k para cada destino j	t
Número total de vagões e locomotivas utilizadas	quantidade
Número de composições ferroviárias z	quantidade
Controle anual total do produto exportado da <i>commodity</i> k no destino j	tons

Tabela A.6: Variáveis de *outputs* do modelo simulação via otimização.

Variáveis <i>outputs</i>	Unidade
Número total de caminhões y atendidos transportando a <i>commodity</i> k no terminal i e porto j	quantidade
Número total de navios s atendidos transportando a <i>commodity</i> k no porto j	quantidade
Número total de composições ferroviárias z transportando a <i>commodity</i> k no terminal i e porto j	quantidade
Controle da emissão de CO ₂ na rota da origem i ao destino j	t
Controle anual total do produto carregado ou desembarcado da <i>commodity</i> k no terminal i e porto j	t

Tabela A.7: Principais atividades do modelo de simulação via otimização.

Número de filas	Actividade
36	Descarregar caminhões y e carregar composições ferroviárias z no terminal i
16	Chegada e partida das composições ferroviárias z no porto j
8	Descarregar as composições ferroviárias z no porto j
8	Navegar para entrada das embarcações s transportando <i>commodity</i> k no porto j
8	Atracar navios s transportando <i>commodity</i> k no porto j
8	Pré-atracação dos navios s transportando <i>commodity</i> k para o porto j
8	Carregar navios s transportando <i>commodity</i> k no porto j
8	Pós-carregamento dos navios s transportando <i>commodity</i> k no porto j
8	Desembarcar embarcações s transportando <i>commodity</i> k do porto j
8	Navegar para saída das embarcações s transportando <i>commodity</i> k do porto j

A.2 Parâmetros estatísticos da simulação - cenário base

Tabela A.8: Estatística descritiva do cenário base (volume total exportado).

Parâmetro	Valor (t)
Média	51.185.000
Erro padrão	38.464
Mediana	51.156.250
Quartil 1	50.953.125
Quartil 3	51.359.375
Moda	51.062.500
Desvio padrão	271.980
Nível de confiança (95,0%)	77.296
Limite inferior	51.107.704
Limite superior	51.262.296

Tabela A.9: Estatística descritiva do cenário base (emissão total de CO₂).

Parâmetro	Valor (kg)
Média	2.661.425.184
Erro padrão	3.872.102
Mediana	2.653.233.381
Quartil 1	2.639.519.334
Quartil 3	2.682.883.442
Moda	-
Desvio padrão	27.379.899
Nível de confiança (95,0%)	7.781.281
Limite inferior	2.653.643.903
Limite superior	2.669.206.466

Tabela A.10: Estatística descritiva do cenário base (receita ferroviária).

Parâmetro	Valor (US\$)
Média	5.388.266.162
Erro padrão	5.554.448
Mediana	5.387.075.204
Quartil 1	5.353.909.825
Quartil 3	5.406.820.225
Moda	-
Desvio padrão	39.275.879
Nível de confiança (95,0%)	11.162.081
Limite inferior	5.377.104.080
Limite superior	5.399.428.243

A.3 Parâmetros estatísticos da simulação - cenário otimizado

Tabela A.11: Estatística descritiva do cenário otimizado (volume total exportado).

Parâmetro	Valor (t)
Média	51.331.250
Erro padrão	18.407
Mediana	51.312.500
Quartil 1	51.250.000
Quartil 3	51.312.500
Moda	51.250.000
Desvio padrão	130.155
Nível de confiança (95,0%)	36.990
Limite inferior	51.294.260
Limite superior	51.368.240

Tabela A.12: Estatística descritiva do cenário otimizado (emissão total de CO₂).

Parâmetro	Valor (kg)
Média	2.594.612.931
Erro padrão	3.328.787
Mediana	2.597.196.022
Quartil 1	2.575.842.449
Quartil 3	2.613.841.010
Moda	-
Desvio padrão	23.538.076
Nível de confiança (95,0%)	6.689.447
Limite inferior	2.587.923.484
Limite superior	2.601.302.378

Tabela A.13: Estatística descritiva do cenário otimizado (receita ferroviária).

Parâmetro	Valor (US\$)
Média	5.313.105.764
Erro padrão	6.050.526
Mediana	5.317.166.875
Quartil 1	5.284.628.731
Quartil 3	5.340.170.021
Moda	-
Desvio padrão	42.783.682
Nível de confiança (95,0%)	12.158.988
Limite inferior	5.300.946.776
Limite superior	5.325.264.752

A.4 Dados históricos dos volumes de grãos

Tabela A.14: Volume de soja nos terminais de origem - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)

TERMINAL	Jan.	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
A.Araguaia	-	41,3	77,0	59,6	55,1	17,2	-	-	-	-	-	-	250,3
Araguari	3,1	133,3	233,7	334,0	330,0	281,7	331,9	269,2	203,0	203,2	82,8	66,8	2.472,8
Cacequi	1,0	-	1,0	1,7	2,5	1,0	5,9	4,9	2,9	3,0	1,0	-	25,1
C.Comprida	-	16,4	39,6	45,4	36,1	41,6	40,6	28,8	40,4	22,5	0,1	-	311,6
Cascavel	24,6	55,2	68,4	30,2	30,1	28,6	15,0	1,5	5,3	23,0	3,5	1,9	287,4
Chapadão Sul	15,6	117,0	141,8	141,3	102,9	89,5	51,4	-	-	-	-	-	659,4
Cruz Alta	49,1	21,7	18,6	15,7	3,0	33,8	49,5	60,4	59,5	79,0	23,2	6,9	420,5
Itiquira	21,8	7,2	20,2	-	-	-	89,3	49,3	-	-	-	-	187,8
J.Castilhos	6,1	-	4,9	5,4	1,9	3,0	9,6	7,2	2,7	7,4	-	-	48,0
Londrina	2,2	52,7	112,1	74,5	31,2	63,3	38,2	6,4	-	1,1	-	-	381,8
Marialva	7,0	180,7	229,7	98,4	46,9	127,6	68,5	1,2	-	-	-	-	760,0
Maringá	203,5	276,5	370,1	155,6	96,8	264,6	141,4	1,2	20,0	56,0	14,7	4,2	1.604,6
Palmeirante	117,6	573,9	389,1	430,0	379,5	265,5	76,2	35,3	30,0	6,5	-	-	2.303,4
Pederneiras	-	-	12,8	64,8	60,9	25,3	64,0	4,6	-	-	-	-	232,3
Pirapora	-	51,9	110,1	123,2	101,4	122,3	107,2	102,0	84,6	1,6	3,6	-	807,8
P.Franco	7,6	84,2	167,1	202,8	210,5	180,5	51,2	54,6	73,2	70,1	7,2	-	1.109,1
P.Nacional	7,4	304,6	378,1	516,4	514,8	393,7	247,2	262,1	178,6	111,8	28,2	-	2.942,8
Rio Verde	81,6	481,7	561,4	430,2	446,0	374,1	28,7	0,3	-	-	-	-	2.403,9
Rolandia	2,8	21,7	90,9	11,5	14,3	21,9	32,8	-	-	-	-	-	196,0
Rondonópolis	738,5	1.437,1	1.390,9	1.250,8	1.397,9	870,5	59,2	197,5	221,1	-	-	-	7.563,4
São Simão	2,8	123,6	160,4	144,3	118,6	85,9	87,0	57,5	14,9	21,6	-	-	816,6
Uberaba	158,7	537,9	735,2	595,7	389,8	328,8	239,8	219,4	221,7	240,6	191,0	3,4	3.862,1
TOTAL	1.451,1	4.518,6	5.312,9	4.731,4	4.370,1	3.620,3	1.834,5	1.363,3	1.158,1	847,6	355,4	83,3	29.646,6

Tabela A.15: Volume de milho nos terminais de origem - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)

TERMINAL	Jan.	Fev.	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
A. Araguaia	6,0	-	-	-	-	-	47,1	63,8	36,8	44,5	39,1	32,2	269,6
Araguari	-	-	-	-	-	-	14,6	41,4	78,3	98,6	129,5	116,4	478,9
Cacequi	-	-	8,3	8,4	-	-	-	-	-	-	-	-	16,7
C. Comprida	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cascavel	-	-	7,5	8,0	-	7,9	28,4	25,2	29,4	34,7	24,1	-	165,3
Chapadão Sul	1,4	-	-	-	-	-	113,5	108,2	117,1	45,4	36,1	40,5	462,3
Cruz Alta	-	-	46,1	33,9	-	-	-	-	-	-	-	-	80,0
Itiquira	101,3	36,9	-	140,7	49,0	86,1	30,8	-	-	-	-	-	444,9
J.Castilhos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Londrina	13,9	-	-	2,4	9,7	0,1	4,0	60,2	64,2	40,0	53,9	37,0	285,2
Marialva	30,5	-	-	-	10,0	-	139,1	192,2	178,1	118,8	202,1	166,6	1.037,3
Maringá	25,5	-	2,9	99,0	33,3	30,4	204,8	353,7	355,1	368,8	292,2	193,4	1.959,2
Palmeirante	-	-	-	-	-	129,3	358,0	394,9	356,2	388,2	259,5	152,9	2.038,9
Pederneiras	-	-	-	-	-	-	13,4	108,1	84,1	73,5	92,1	57,6	428,8
Pirapora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P.Franco	-	-	-	-	-	-	109,3	129,1	142,5	163,1	148,8	144,8	837,6
P.Nacional	-	-	-	-	-	45,5	167,7	153,6	231,0	232,3	93,9	130,6	1.054,5
Rio Verde	82,7	0,5	-	-	-	-	397,6	513,7	471,4	359,6	288,1	215,7	2.329,2
Rolândia	19,1	-	-	-	-	-	2,4	60,1	21,0	28,9	13,6	9,1	154,2
Rondonópolis	444,8	5,5	-	-	-	419,3	1.227,4	1.046,1	1.079,9	1.562,9	1.180,0	1.327,6	8.293,5
São Simão	47,0	3,3	-	-	-	48,9	123,2	109,1	78,9	31,7	32,8	93,7	568,7
Uberaba	12,3	-	-	-	-	-	121,1	143,6	118,7	93,6	107,7	274,1	871,1
TOTAL	784,5	46,1	64,9	292,4	102,0	767,6	3.102,1	3.502,9	3.442,8	3.684,6	2.993,5	2.992,4	21.775,8

Tabela A.16: Volume de grãos (soja e milho) nos terminais de origem - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)

TERMINAL	Jan.	Fev.	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
A. Araguaia	6,0	41,3	77,0	59,6	55,1	17,2	47,1	63,8	36,8	44,5	39,1	32,2	519,8
Araguari	3,1	133,3	233,7	334,0	330,0	281,7	346,4	310,6	281,3	301,8	212,4	183,3	2.951,6
Cacequi	1,0	-	9,3	10,1	2,5	1,0	5,9	4,9	2,9	3,0	1,0	-	41,8
C. Comprida	-	16,4	39,6	45,4	36,1	41,6	40,6	28,8	40,4	22,5	0,1	-	311,6
Cascavel	24,6	55,2	75,9	38,2	30,1	36,6	43,4	26,8	34,7	57,7	27,5	1,9	452,6
Chapadão Sul	16,9	117,0	141,8	141,3	102,9	89,5	164,9	108,2	117,1	45,4	36,1	40,5	1.121,7
Cruz Alta	49,1	21,7	64,7	49,6	3,0	33,8	49,5	60,4	59,5	79,0	23,2	6,9	500,5
Itiquira	123,1	44,0	20,2	140,7	49,0	86,1	120,1	49,3	-	-	-	-	632,7
J.Castilhos	6,1	-	4,9	5,4	1,9	3,0	9,6	7,2	2,7	7,4	-	-	48,0
Londrina	16,1	52,7	112,1	76,9	40,9	63,4	42,2	66,5	64,2	41,1	53,9	37,0	666,9
Marialva	37,4	180,7	229,7	98,4	56,9	127,6	207,6	193,4	178,1	118,8	202,1	166,6	1.797,3
Maringá	228,9	276,5	373,0	254,6	130,1	295,0	346,2	354,9	375,1	424,8	306,9	197,6	3.563,8
Palmeirante	117,6	573,9	389,1	430,0	379,5	394,8	434,1	430,2	386,2	394,7	259,5	152,9	4.342,3
Pederneiras	-	-	12,8	64,8	60,9	25,3	77,4	112,6	84,1	73,5	92,1	57,6	661,1
Pirapora	-	51,9	110,1	123,2	101,4	122,3	107,2	102,0	84,6	1,6	3,6	-	807,8
P.Franco	7,6	84,2	167,1	202,8	210,5	180,5	160,5	183,7	215,7	233,2	156,0	144,8	1.946,7
P.Nacional	7,4	304,6	378,1	516,4	514,8	439,2	414,8	415,7	409,6	344,1	122,1	130,6	3.997,4
Rio Verde	164,3	482,1	561,4	430,2	446,0	374,1	426,3	514,0	471,4	359,6	288,1	215,7	4.733,1
Rolândia	21,9	21,7	90,9	11,5	14,3	21,9	35,2	60,1	21,0	28,9	13,6	9,1	350,2
Rondonópolis	1.183,3	1.442,5	1.390,9	1.250,8	1.397,9	1.289,8	1.286,6	1.243,5	1.301,0	1.562,9	1.180,0	1.327,6	15.856,9
São Simão	49,8	126,9	160,4	144,3	118,6	134,8	210,2	166,6	93,8	53,3	32,8	93,7	1.385,3
Uberaba	171,0	537,9	735,2	595,7	389,8	328,8	360,9	363,0	340,4	334,2	298,7	277,5	4.733,3
TOTAL	2.235,6	4.564,7	5.377,8	5.023,8	4.472,2	4.387,9	4.936,7	4.866,2	4.600,9	4.532,2	3.348,9	3.075,7	51.422,5

Tabela A.17: Volume de soja nos terminais de destino - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)

PORTO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	TOTAL
Paranaguá	94,0	382,7	462,8	195,9	149,6	267,8	144,7	5,3	17,3	48,8	14,7	5,0	1.788,5
Tiplam	120,9	401,2	568,5	425,9	271,0	301,9	273,0	219,4	282,0	236,8	191,0	-	3.291,7
Tegram e TPSL	132,6	962,7	934,3	1.149,1	1.104,7	839,7	374,6	352,0	281,9	188,4	35,4	-	6.355,4
Rio Grande	56,3	21,7	24,4	22,8	5,5	37,7	65,0	72,5	65,2	89,5	24,2	6,9	491,7
Portos Santos	901,1	2.364,4	2.531,2	2.260,8	2.300,3	1.489,2	346,3	309,2	175,8	21,6	-	-	12.699,9
São Francisco	139,6	183,8	370,5	139,4	36,6	221,2	149,6	3,5	8,1	29,8	0,0	1,1	1.283,2
Tubarão	-	181,7	383,3	502,7	467,5	445,6	479,6	400,0	328,0	231,1	86,6	70,2	3.576,3
TOTAL	1.444,5	4.498,3	5.275,0	4.696,6	4.335,2	3.603,2	1.832,7	1.361,7	1.158,1	846,0	351,9	83,3	29.486,6

Tabela A.18: Volume de milho nos terminais de destino - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)

PORTO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	TOTAL
Paranaguá	42,0	-	10,4	47,6	53,0	38,5	271,4	397,9	373,0	340,9	332,5	222,8	2.130,0
Tiplam	24,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49,5	348,9	422,5
Tegram e TPSL	-	-	-	-	-	174,8	634,9	677,5	729,7	783,6	502,2	428,4	3.931,1
Rio Grande	-	-	54,4	42,3	-	-	-	-	-	-	-	-	96,7
Portos Santos	671,5	46,1	-	140,7	49,0	554,3	2.074,1	2.092,6	1.987,0	2.211,2	1.726,5	1.703,7	13.256,7
São Francisco	46,9	-	-	61,8	-	-	102,9	287,7	274,8	250,2	253,4	183,2	1.461,0
Tubarão	-	-	-	-	-	-	14,6	41,4	78,3	98,6	129,5	105,3	467,8
TOTAL	784,5	46,1	64,9	292,4	102,0	767,6	3.097,9	3.497,2	3.442,8	3.684,6	2.993,5	2.992,4	21.765,9

Tabela A.19: Volume de grãos (soja e milho) nos terminais de destino - ano 2022. Fonte: ANTT (2022a)

PORTO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	TOTAL
Paranaguá	136,0	382,7	473,2	243,5	202,6	306,2	416,1	403,2	390,3	389,7	347,2	227,8	3.918,5
Tiplam	145,1	401,2	568,5	425,9	271,0	301,9	273,0	219,4	282,0	236,8	240,5	348,9	3.714,2
Tegram e TPSL	132,6	962,7	934,3	1.149,1	1.104,7	1.014,5	1.009,5	1.029,5	1.011,5	972,0	537,6	428,4	10.286,4
Rio Grande	56,3	21,7	78,9	65,0	5,5	37,7	65,0	72,5	65,2	89,5	24,2	6,9	588,4
Portos Santos	1.572,6	2.410,6	2.531,2	2.401,6	2.349,3	2.043,6	2.420,4	2.401,7	2.162,8	2.232,8	1.726,5	1.703,7	25.956,6
São Francisco	186,5	183,8	370,5	201,2	36,6	221,2	252,5	291,2	282,9	280,0	253,4	184,3	2.744,2
Tubarão	-	181,7	383,3	502,7	467,5	445,6	494,2	441,4	406,3	329,8	216,1	175,6	4.044,1
TOTAL	2.229,1	4.544,4	5.339,8	4.989,0	4.437,3	4.370,8	4.930,6	4.858,9	4.600,9	4.530,6	3.345,4	3.075,7	51.252,5

A.5 Dados simulados: cenário base

Tabela A.20: Volume exportado (toneladas) de soja e de milho nos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	10.062.500	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.812.500	2.812.500
2	10.187.500	3.875.000	3.750.000	3.937.500	500.000	25.687.500	3.125.000
3	10.125.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	625.000	25.687.500	3.375.000
4	10.312.500	3.875.000	3.812.500	4.000.000	562.500	25.812.500	2.812.500
5	10.187.500	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.687.500	2.750.000
6	10.125.000	3.937.500	3.750.000	3.937.500	562.500	25.625.000	3.000.000
7	10.312.500	3.937.500	3.812.500	4.062.500	562.500	25.812.500	2.750.000
8	10.250.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.687.500	2.812.500
9	10.187.500	3.937.500	3.625.000	4.062.500	625.000	25.937.500	2.875.000
10	10.375.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.812.500	2.750.000
11	10.312.500	3.875.000	3.687.500	4.000.000	625.000	25.750.000	2.750.000
12	10.125.000	3.875.000	3.625.000	4.000.000	625.000	25.937.500	2.937.500
13	10.312.500	3.937.500	3.687.500	4.125.000	562.500	25.937.500	3.250.000
14	10.375.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.875.000	2.750.000
15	10.187.500	4.000.000	3.687.500	4.062.500	625.000	25.625.000	3.187.500
16	10.375.000	3.875.000	3.750.000	4.062.500	625.000	25.562.500	2.625.000
17	10.375.000	4.000.000	3.812.500	4.062.500	562.500	25.937.500	2.937.500
18	10.250.000	3.875.000	3.687.500	4.000.000	562.500	25.875.000	2.812.500
19	10.250.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.937.500	2.750.000
20	10.312.500	3.812.500	3.750.000	4.062.500	625.000	25.937.500	2.500.000
21	10.250.000	4.000.000	3.625.000	4.062.500	625.000	25.750.000	2.500.000
22	10.187.500	3.812.500	3.812.500	4.062.500	500.000	25.562.500	3.187.500
23	10.250.000	3.937.500	3.812.500	4.062.500	625.000	25.625.000	2.937.500
24	10.000.000	3.875.000	3.750.000	3.937.500	625.000	25.750.000	2.937.500
25	10.187.500	3.937.500	3.687.500	4.125.000	562.500	26.062.500	2.500.000
26	10.312.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.750.000	2.750.000
27	10.250.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	625.000	25.750.000	2.812.500
28	10.187.500	3.937.500	3.750.000	4.000.000	562.500	25.875.000	3.062.500
29	10.375.000	4.000.000	3.750.000	4.125.000	562.500	25.750.000	3.062.500
30	10.437.500	3.875.000	3.750.000	4.125.000	562.500	25.687.500	2.812.500
31	10.187.500	3.937.500	3.687.500	4.062.500	625.000	25.687.500	2.875.000
32	10.187.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.812.500	3.062.500
33	10.187.500	3.937.500	3.687.500	3.937.500	625.000	25.812.500	3.000.000
34	10.125.000	3.750.000	3.875.000	4.000.000	562.500	25.812.500	3.312.500
35	10.187.500	3.937.500	3.750.000	4.062.500	625.000	25.750.000	3.562.500
36	10.062.500	3.937.500	3.750.000	4.062.500	625.000	25.812.500	3.250.000
37	10.125.000	3.937.500	3.750.000	4.062.500	625.000	25.875.000	2.625.000
38	10.375.000	4.000.000	3.812.500	4.062.500	625.000	25.750.000	2.312.500
39	10.250.000	3.875.000	3.750.000	4.062.500	625.000	25.500.000	2.750.000
40	10.187.500	3.875.000	3.687.500	4.125.000	625.000	25.625.000	2.687.500
41	10.250.000	3.937.500	3.750.000	3.937.500	562.500	25.625.000	3.312.500
42	10.312.500	3.875.000	3.687.500	4.125.000	562.500	26.000.000	2.812.500
43	10.250.000	3.937.500	3.750.000	4.062.500	562.500	25.812.500	2.812.500
44	10.250.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	625.000	25.812.500	3.000.000
45	10.187.500	3.875.000	3.812.500	3.937.500	562.500	25.875.000	2.625.000
46	10.250.000	3.875.000	3.750.000	4.000.000	562.500	25.687.500	2.812.500
47	10.250.000	3.875.000	3.750.000	3.937.500	562.500	25.750.000	3.187.500
48	10.125.000	4.000.000	3.687.500	4.125.000	562.500	25.875.000	3.375.000
49	10.375.000	3.875.000	3.687.500	4.000.000	625.000	25.687.500	2.687.500
50	10.187.500	3.875.000	3.687.500	4.062.500	625.000	25.937.500	3.125.000

Tabela A.21: TKU nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	27.290.681	1.270.014	3.627.527	7.721.053	513.139	43.175.909	1.163.150
2	27.510.834	1.315.930	4.208.545	7.397.573	513.139	42.990.312	1.288.983
3	27.068.549	1.166.892	4.244.858	8.001.176	529.175	43.016.153	1.423.392
4	27.602.002	1.243.398	3.904.898	7.380.853	523.830	42.973.082	1.171.900
5	27.790.631	1.187.756	4.151.813	7.665.462	497.104	42.836.694	1.231.987
6	26.925.684	1.281.029	4.412.753	7.283.732	475.723	42.767.716	1.209.700
7	27.347.052	1.231.720	4.903.630	7.579.656	497.104	42.645.548	1.205.656
8	27.499.455	1.298.024	3.749.036	7.789.572	507.794	42.957.324	1.111.523
9	26.048.240	1.259.201	4.565.824	7.661.657	523.830	42.484.916	1.275.249
10	27.404.312	1.233.417	3.974.991	7.186.057	523.830	42.909.985	1.138.109
11	28.355.519	1.286.102	4.603.492	7.570.672	529.175	42.324.468	1.290.099
12	27.088.311	1.216.910	4.446.679	7.700.918	486.413	43.228.997	1.231.174
13	26.669.483	1.205.174	3.956.280	7.544.351	491.758	42.749.346	1.245.478
14	27.689.019	1.334.290	3.734.942	7.468.801	555.901	43.090.850	1.203.774
15	27.770.715	1.274.168	4.680.812	7.316.253	523.830	42.869.601	1.329.642
16	27.449.135	1.284.864	3.841.110	7.776.266	555.901	42.595.750	1.132.950
17	27.589.181	1.320.514	4.263.437	7.180.954	534.520	42.849.346	1.110.582
18	27.371.354	1.295.607	4.425.366	6.925.338	502.449	43.072.302	1.239.924
19	27.372.937	1.261.711	4.056.627	7.363.339	470.378	43.113.445	1.200.125
20	27.361.632	1.268.706	4.029.215	7.371.592	545.210	42.885.800	1.050.959
21	27.215.278	1.329.688	4.501.665	7.408.422	555.901	42.803.883	1.089.433
22	27.641.400	1.201.130	4.168.597	7.363.768	432.961	42.643.987	1.319.939
23	27.403.223	1.273.726	4.253.420	7.358.816	513.139	42.625.484	1.190.887
24	27.472.900	1.255.158	4.591.894	7.754.468	555.901	42.836.709	1.268.799
25	27.221.534	1.272.971	3.666.140	7.664.227	518.484	43.228.231	1.090.595
26	27.694.098	1.281.227	4.294.420	7.767.081	523.830	43.026.700	1.111.407
27	28.094.437	1.344.004	3.887.528	7.304.359	555.901	43.124.205	1.115.718
28	27.100.661	1.296.966	4.572.445	7.671.573	534.520	42.991.799	1.300.290
29	26.313.604	1.220.292	4.294.634	7.688.470	486.413	42.506.414	1.273.935
30	27.392.720	1.254.489	3.970.096	7.603.735	475.723	42.400.276	1.194.629
31	26.920.149	1.276.108	4.038.728	7.585.540	545.210	42.777.468	1.232.533
32	25.825.070	1.271.838	4.361.043	7.526.169	481.068	42.575.679	1.309.562
33	26.669.416	1.250.614	3.771.923	7.387.783	518.484	43.258.628	1.278.444
34	26.266.184	1.141.491	4.400.518	7.555.565	502.449	42.443.935	1.389.589
35	27.295.458	1.271.611	4.205.666	7.584.759	534.520	43.059.121	1.432.618
36	26.605.311	1.311.102	4.342.363	7.776.178	529.175	42.958.031	1.318.184
37	27.090.188	1.327.045	4.229.285	7.150.563	545.210	42.802.845	1.056.339
38	27.912.682	1.324.244	4.185.550	7.429.716	518.484	42.849.648	971.571
39	27.464.561	1.241.150	4.422.701	8.170.785	513.139	41.930.649	1.090.816
40	27.723.942	1.291.900	3.778.192	7.590.177	518.484	42.774.671	1.144.465
41	27.488.930	1.185.054	4.492.303	7.367.951	491.758	42.671.433	1.290.192
42	27.256.133	1.256.180	3.795.971	7.505.177	513.139	43.363.619	1.173.248
43	26.727.781	1.251.067	4.220.861	7.494.253	481.068	42.466.685	1.187.645
44	27.742.394	1.322.095	4.119.249	8.320.864	529.175	43.144.489	1.213.999
45	27.429.057	1.327.178	4.332.970	7.519.289	534.520	42.893.278	1.111.685
46	27.691.419	1.266.162	4.148.544	7.403.382	497.104	43.093.521	1.180.546
47	27.342.820	1.235.566	4.399.699	7.408.422	545.210	42.755.933	1.280.873
48	28.093.724	1.245.095	4.478.859	7.697.983	502.449	43.242.127	1.434.361
49	28.037.986	1.242.486	4.242.470	7.988.501	507.794	42.806.334	1.188.645
50	27.104.091	1.305.960	3.893.942	7.357.291	518.484	43.056.191	1.247.221

Tabela A.22: Consumo diesel (litros) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	151.203.757	16.146.954	104.077.156	157.790.164	6.524.052	550.216.376	14.788.294
2	152.476.456	16.730.736	120.853.580	150.414.383	6.524.052	547.515.476	16.388.134
3	150.462.833	14.835.865	121.834.552	164.363.565	6.727.928	547.165.536	18.097.005
4	154.964.241	15.808.563	112.072.000	153.096.875	6.659.970	549.223.638	14.899.540
5	152.364.563	15.101.126	119.194.359	158.352.238	6.320.175	547.851.459	15.663.486
6	149.618.891	16.287.009	126.722.711	149.198.986	6.048.340	543.198.830	15.380.127
7	151.978.186	15.660.088	140.819.203	155.505.513	6.320.175	543.575.700	15.328.715
8	152.509.382	16.503.074	107.547.490	158.054.993	6.456.093	547.040.258	14.131.900
9	144.618.045	16.009.485	131.128.208	156.341.764	6.659.970	540.353.088	16.213.510
10	155.065.738	15.681.658	114.113.487	147.546.959	6.659.970	548.284.537	14.469.921
11	156.473.836	16.351.496	132.156.035	155.607.290	6.727.928	539.450.861	16.402.317
12	150.583.030	15.471.798	127.718.628	157.569.207	6.184.257	550.892.406	15.653.144
13	148.855.989	15.322.584	113.550.390	155.116.672	6.252.216	542.696.598	15.835.008
14	153.230.794	16.964.160	107.186.874	154.014.825	7.067.723	549.862.423	15.304.781
15	160.506.143	16.199.770	134.414.360	149.869.187	6.659.970	547.387.748	16.905.065
16	151.936.961	16.335.762	110.199.342	161.198.428	7.067.723	542.296.329	14.404.326
17	155.854.863	16.789.018	122.462.590	146.946.491	6.795.887	545.860.304	14.119.933
18	151.246.960	16.472.344	127.063.393	141.354.708	6.388.134	549.634.516	15.764.390
19	152.414.137	16.041.396	116.449.352	152.318.255	5.980.381	549.004.624	15.258.392
20	152.223.401	16.130.334	115.684.823	151.290.546	6.931.805	546.217.987	13.361.896
21	151.776.279	16.905.656	129.237.139	151.542.609	7.067.723	545.009.536	13.851.052
22	152.294.661	15.271.171	119.707.756	150.521.048	5.504.669	543.990.343	16.781.705
23	150.952.499	16.194.156	122.157.315	151.373.086	6.524.052	544.158.109	15.140.941
24	151.941.934	15.958.073	131.834.016	159.210.473	7.067.723	546.421.090	16.131.516
25	151.319.762	16.184.553	105.199.599	158.768.792	6.592.011	550.449.727	13.865.826
26	153.191.296	16.289.520	123.316.783	159.394.693	6.659.970	548.577.193	14.130.422
27	156.827.405	17.087.668	111.598.200	150.700.978	7.067.723	548.655.094	14.185.233
28	149.513.532	16.489.630	131.257.230	157.171.987	6.795.887	548.774.961	16.531.882
29	146.171.433	15.514.789	123.289.352	158.113.416	6.184.257	538.793.917	16.196.815
30	151.907.081	15.949.578	113.936.609	157.650.341	6.048.340	540.696.994	15.188.513
31	148.174.506	16.224.442	115.868.516	156.580.666	6.931.805	544.485.859	15.670.430
32	143.813.879	16.170.149	125.204.263	154.952.109	6.116.299	540.709.023	16.649.776
33	150.697.379	15.900.308	108.257.490	152.664.138	6.592.011	549.127.311	16.254.137
34	144.812.544	14.512.913	126.344.052	154.989.017	6.388.134	540.962.339	17.667.239
35	154.603.860	16.167.268	120.704.500	156.558.108	6.795.887	550.587.667	18.214.308
36	148.447.727	16.669.351	124.713.929	159.386.468	6.727.928	548.212.296	16.759.397
37	149.883.470	16.872.046	121.444.818	148.057.162	6.931.805	545.340.106	13.430.298
38	153.998.480	16.836.441	120.193.976	152.973.606	6.592.011	546.708.120	12.352.559
39	153.330.644	15.779.976	126.969.427	168.188.682	6.524.052	533.018.389	13.868.633
40	156.529.412	16.425.216	108.422.153	156.172.070	6.592.011	550.147.287	14.550.733
41	153.157.444	15.066.778	128.950.827	150.099.436	6.252.216	544.130.659	16.403.499
42	153.746.304	15.971.074	108.930.737	154.796.936	6.524.052	554.378.344	14.916.677
43	148.629.128	15.906.070	121.113.845	154.661.305	6.116.299	540.495.673	15.099.723
44	154.577.481	16.809.110	118.250.062	171.720.110	6.727.928	549.488.825	15.434.790
45	152.103.779	16.873.745	124.385.431	154.481.472	6.795.887	547.443.080	14.133.968
46	154.217.576	16.097.980	119.033.970	153.116.129	6.320.175	548.883.064	15.009.456
47	152.643.335	15.708.989	126.357.028	151.542.609	6.931.805	544.677.683	16.285.014
48	158.659.139	15.830.133	128.604.411	157.484.186	6.388.134	553.928.938	18.236.468
49	156.136.481	15.796.966	121.766.951	165.081.863	6.456.093	545.989.628	15.112.428
50	150.989.587	16.603.978	111.811.386	150.966.800	6.592.011	547.892.041	15.857.169

Tabela A.23: Emissão CO₂ (kg) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	397.665.880	42.466.490	273.722.920	414.988.131	17.158.256	1.447.069.069	38.893.213
2	401.013.080	44.001.835	317.844.915	395.589.827	17.158.256	1.439.965.702	43.100.794
3	395.717.250	39.018.325	320.424.872	432.276.177	17.694.452	1.439.045.360	47.595.122
4	407.555.953	41.576.522	294.749.360	402.644.782	17.515.720	1.444.458.168	39.185.789
5	400.718.801	39.715.962	313.481.165	416.466.386	16.622.061	1.440.849.336	41.194.968
6	393.497.683	42.834.833	333.280.731	392.393.334	15.907.133	1.428.612.924	40.449.734
7	399.702.629	41.186.032	370.354.503	408.979.500	16.622.061	1.429.604.092	40.314.520
8	401.099.674	43.403.084	282.849.899	415.684.631	16.979.524	1.438.715.878	37.166.897
9	380.345.458	42.104.946	344.867.186	411.178.838	17.515.720	1.421.128.622	42.641.530
10	407.822.891	41.242.760	300.118.471	388.048.502	17.515.720	1.441.988.333	38.055.893
11	411.526.188	43.004.434	347.570.373	409.247.174	17.694.452	1.418.755.765	43.138.094
12	396.033.368	40.690.828	335.899.990	414.407.013	16.264.597	1.448.847.027	41.167.770
13	391.491.250	40.298.395	298.637.527	407.956.848	16.443.329	1.427.292.053	41.646.072
14	402.996.988	44.615.740	281.901.480	405.058.990	18.588.111	1.446.138.174	40.251.575
15	422.131.155	42.605.396	353.509.767	394.155.963	17.515.720	1.439.629.776	44.460.321
16	399.594.208	42.963.053	289.824.269	423.951.866	18.588.111	1.426.239.344	37.883.378
17	409.898.289	44.155.117	322.076.613	386.469.272	17.873.184	1.435.612.600	37.135.424
18	397.779.505	43.322.266	334.176.722	371.762.881	16.800.793	1.445.538.778	41.460.346
19	400.849.181	42.188.873	306.261.797	400.597.012	15.728.402	1.443.882.161	40.129.571
20	400.347.546	42.422.778	304.251.085	397.894.135	18.230.647	1.436.553.307	35.141.787
21	399.171.614	44.461.875	339.893.675	398.557.062	18.588.111	1.433.375.081	36.428.268
22	400.534.957	40.163.180	314.831.398	395.870.355	14.477.279	1.430.694.601	44.135.884
23	397.005.073	42.590.631	321.273.739	398.111.216	17.158.256	1.431.135.826	39.820.676
24	399.607.286	41.969.732	346.723.463	418.723.543	18.588.111	1.437.087.466	42.425.887
25	397.970.975	42.565.375	276.674.946	417.561.922	17.336.988	1.447.682.781	36.467.123
26	402.893.110	42.841.438	324.323.140	419.208.042	17.515.720	1.442.758.019	37.163.011
27	412.456.076	44.940.566	293.503.266	396.343.572	18.588.111	1.442.962.897	37.307.162
28	393.220.589	43.367.726	345.206.516	413.362.327	17.873.184	1.443.278.148	43.478.850
29	384.430.869	40.803.895	324.250.997	415.838.284	16.264.597	1.417.028.003	42.597.625
30	399.515.623	41.947.390	299.653.283	414.620.396	15.907.133	1.422.033.093	39.945.788
31	389.698.950	42.670.283	304.734.196	411.807.151	18.230.647	1.431.997.809	41.213.230
32	378.230.501	42.527.492	329.287.212	407.524.048	16.085.865	1.422.064.730	43.788.911
33	396.334.107	41.817.810	284.717.198	401.506.683	17.336.988	1.444.204.827	42.748.381
34	380.856.990	38.168.961	332.284.856	407.621.114	16.800.793	1.422.730.951	46.464.838
35	406.608.152	42.519.915	317.452.836	411.747.824	17.873.184	1.448.045.564	47.903.629
36	390.417.521	43.840.394	327.997.633	419.186.410	17.694.452	1.441.798.339	44.077.213
37	394.193.526	44.373.481	319.399.870	389.390.335	18.230.647	1.434.244.479	35.321.685
38	405.016.003	44.279.841	316.110.158	402.320.585	17.336.988	1.437.842.356	32.487.231
39	403.259.594	41.501.338	333.929.592	442.336.232	17.158.256	1.401.838.362	36.474.505
40	411.672.355	43.198.319	285.150.262	410.732.545	17.336.988	1.446.887.365	38.268.429
41	402.804.077	39.625.625	339.140.674	394.761.518	16.443.329	1.431.063.633	43.141.203
42	404.352.780	42.003.924	286.487.838	407.115.941	17.158.256	1.458.015.044	39.230.861
43	390.894.606	41.832.963	318.529.412	406.759.231	16.085.865	1.421.503.621	39.712.271
44	406.538.774	44.207.960	310.997.663	451.623.888	17.694.452	1.445.155.610	40.593.497
45	400.032.939	44.377.949	327.133.683	406.286.270	17.873.184	1.439.775.299	37.172.336
46	405.592.225	42.337.686	313.059.341	402.695.420	16.622.061	1.443.562.457	39.474.869
47	401.451.971	41.314.641	332.318.984	398.557.062	18.230.647	1.432.502.307	42.829.587
48	417.273.535	41.633.250	338.229.600	414.183.410	16.800.793	1.456.833.106	47.961.911
49	410.638.946	41.546.021	320.247.082	434.165.298	16.979.524	1.435.952.722	39.745.686
50	397.102.614	43.668.461	294.063.945	397.042.685	17.336.988	1.440.956.069	41.704.354

Tabela A.24: Receita (US\$) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos.

Rep.	Tegram-	TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	1.251.098.432	266.623.224	321.400.800	465.888.780	45.959.424	2.833.385.088	201.193.328	
2	1.262.134.016	273.516.208	341.520.480	449.604.540	45.959.424	2.826.643.328	222.778.640	
3	1.246.413.056	246.025.612	362.549.880	478.769.760	47.395.656	2.820.516.864	243.650.484	
4	1.265.727.168	261.219.924	335.371.680	435.229.200	46.916.912	2.823.232.704	199.963.932	
5	1.263.345.472	249.556.930	345.796.920	454.815.900	44.523.192	2.803.334.208	211.674.568	
6	1.235.654.208	261.960.118	356.587.560	437.838.660	42.608.216	2.803.799.360	209.387.752	
7	1.256.717.056	260.068.382	396.721.080	454.652.100	44.523.192	2.808.408.192	206.961.496	
8	1.260.473.600	264.695.466	336.866.040	475.123.320	45.480.680	2.815.404.608	195.039.376	
9	1.206.465.920	265.378.722	366.350.040	463.330.980	46.916.912	2.800.737.600	215.899.600	
10	1.257.821.056	260.092.784	332.201.520	430.416.000	46.916.912	2.818.952.128	194.938.282	
11	1.295.336.448	269.459.666	385.207.200	452.845.260	47.395.656	2.784.068.672	219.098.586	
12	1.238.256.704	254.891.672	353.054.520	463.734.180	43.565.704	2.832.838.976	213.541.902	
13	1.235.988.352	250.739.846	338.481.360	450.982.980	44.044.448	2.812.622.528	216.220.312	
14	1.268.070.592	280.388.276	322.733.880	444.461.220	49.789.376	2.822.456.960	202.638.856	
15	1.271.838.912	265.852.818	380.142.000	439.787.880	46.916.912	2.811.149.056	226.277.422	
16	1.263.120.256	269.733.898	341.719.560	439.115.020	49.789.376	2.803.769.920	195.677.314	
17	1.263.182.080	269.644.424	336.939.120	432.515.160	47.874.400	2.814.673.024	190.052.072	
18	1.260.557.504	267.210.034	364.089.600	418.612.320	45.001.936	2.831.162.368	215.377.862	
19	1.248.628.416	256.741.576	341.696.880	436.077.180	42.129.472	2.820.984.960	203.140.840	
20	1.255.947.200	258.214.992	332.902.080	441.879.480	48.831.888	2.815.754.944	182.148.148	
21	1.252.611.648	276.463.040	375.361.560	446.365.080	49.789.376	2.817.063.552	188.934.228	
22	1.259.678.720	249.325.692	337.921.920	444.155.040	38.778.264	2.793.716.160	225.023.624	
23	1.257.221.952	260.949.178	340.819.920	439.519.500	45.959.424	2.799.403.968	206.374.686	
24	1.265.591.744	259.036.526	380.978.640	464.398.200	49.789.376	2.821.012.928	221.766.538	
25	1.241.932.288	267.721.314	320.493.600	452.832.660	46.438.168	2.830.669.248	186.021.094	
26	1.268.837.504	266.395.472	349.405.560	465.504.480	46.916.912	2.815.063.104	194.774.440	
27	1.284.873.472	273.154.826	326.546.640	434.306.880	49.789.376	2.832.546.048	194.815.110	
28	1.244.534.784	266.577.906	384.572.160	460.997.460	47.874.400	2.824.472.128	223.708.240	
29	1.227.269.696	255.670.212	359.498.160	459.506.880	43.565.704	2.802.392.128	220.327.982	
30	1.256.636.096	257.341.168	342.755.280	448.786.800	42.608.216	2.785.483.264	207.693.556	
31	1.240.233.600	271.643.064	359.888.760	450.772.560	48.831.888	2.808.580.416	208.651.044	
32	1.195.361.152	264.845.364	362.585.160	448.973.280	43.086.960	2.802.088.896	223.626.900	
33	1.235.484.928	260.810.900	323.411.760	438.231.780	46.438.168	2.843.160.640	212.877.238	
34	1.210.970.240	238.933.926	363.895.560	453.227.040	45.001.936	2.794.006.144	238.428.456	
35	1.253.867.264	258.194.076	360.758.160	450.714.600	47.874.400	2.824.419.136	246.244.068	
36	1.227.263.808	270.591.454	347.306.400	467.047.980	47.395.656	2.823.853.888	226.549.330	
37	1.250.297.664	269.825.696	345.260.160	422.896.320	48.831.888	2.815.797.632	182.882.532	
38	1.274.888.896	276.604.804	339.494.400	443.154.600	46.438.168	2.810.312.960	168.474.894	
39	1.258.849.984	255.707.396	369.079.200	487.580.940	45.959.424	2.755.871.040	192.122.756	
40	1.267.325.760	267.671.348	328.348.440	453.279.960	46.438.168	2.802.574.656	201.624.430	
41	1.260.082.048	248.570.392	379.569.960	446.575.500	44.044.448	2.801.924.032	221.444.664	
42	1.252.461.504	261.620.814	330.424.920	446.323.500	45.959.424	2.850.064.320	201.882.394	
43	1.231.419.264	261.348.906	370.182.960	445.449.060	43.086.960	2.795.654.784	206.444.406	
44	1.271.177.984	269.459.666	346.089.240	494.500.860	47.395.656	2.831.877.760	209.853.714	
45	1.256.512.448	275.083.746	363.802.320	450.024.120	47.874.400	2.820.156.224	190.888.712	
46	1.266.376.320	266.220.010	365.105.160	438.376.680	44.523.192	2.821.235.200	202.973.512	
47	1.255.543.872	255.859.618	353.052.000	446.365.080	48.831.888	2.810.879.680	219.089.290	
48	1.275.972.288	254.999.738	366.833.880	463.676.220	45.001.936	2.831.617.216	246.209.208	
49	1.274.248.576	261.448.838	362.328.120	473.928.840	45.480.680	2.799.414.272	205.987.740	
50	1.246.477.824	268.141.958	318.538.080	441.239.400	46.438.168	2.832.176.576	217.543.830	

A.6 Dados simulados: cenário otimizado

Tabela A.25: Volume exportado (toneladas) de soja e de milho nos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	10.812.500	3.937.500	3.750.000	4.000.000	562.500	25.437.500	2.750.000
2	10.687.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.625.000	2.750.000
3	10.562.500	3.937.500	3.687.500	4.062.500	562.500	25.437.500	3.062.500
4	10.562.500	3.750.000	3.625.000	4.000.000	562.500	25.500.000	3.250.000
5	10.812.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.625.000	2.625.000
6	10.812.500	3.875.000	3.687.500	4.062.500	625.000	25.625.000	2.625.000
7	10.812.500	3.875.000	3.687.500	4.000.000	562.500	25.375.000	3.062.500
8	10.812.500	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.375.000	2.875.000
9	10.750.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.562.500	2.750.000
10	10.812.500	3.875.000	3.562.500	3.937.500	562.500	25.562.500	2.937.500
11	10.687.500	4.000.000	3.750.000	4.000.000	562.500	25.562.500	2.687.500
12	10.750.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.625.000	2.812.500
13	10.875.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.437.500	3.000.000
14	10.625.000	4.000.000	3.687.500	4.000.000	562.500	25.312.500	3.062.500
15	10.750.000	3.812.500	3.750.000	3.875.000	562.500	25.562.500	3.250.000
16	10.750.000	3.875.000	3.687.500	3.937.500	437.500	25.625.000	2.937.500
17	10.875.000	3.812.500	3.625.000	3.937.500	562.500	25.625.000	3.062.500
18	10.812.500	3.875.000	3.750.000	4.000.000	562.500	25.437.500	2.875.000
19	10.812.500	3.875.000	3.750.000	3.937.500	625.000	25.625.000	2.625.000
20	10.812.500	4.062.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.375.000	2.687.500
21	10.750.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.250.000	3.062.500
22	10.687.500	3.875.000	3.750.000	3.875.000	562.500	25.625.000	3.187.500
23	10.812.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	625.000	25.437.500	2.750.000
24	10.687.500	4.000.000	3.625.000	4.000.000	562.500	25.375.000	3.000.000
25	10.812.500	4.000.000	3.625.000	4.062.500	562.500	25.437.500	2.812.500
26	10.937.500	4.062.500	3.687.500	4.062.500	562.500	25.437.500	2.875.000
27	10.750.000	3.875.000	3.625.000	4.000.000	562.500	25.500.000	3.000.000
28	10.750.000	3.937.500	3.750.000	4.000.000	562.500	25.625.000	3.187.500
29	10.687.500	3.937.500	3.687.500	3.937.500	625.000	25.625.000	2.812.500
30	10.812.500	4.000.000	3.687.500	3.937.500	562.500	25.500.000	2.875.000
31	10.750.000	3.562.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.375.000	3.375.000
32	10.687.500	3.687.500	3.750.000	4.000.000	562.500	25.312.500	3.312.500
33	10.750.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.500.000	2.812.500
34	10.750.000	3.937.500	3.687.500	4.062.500	562.500	25.687.500	2.562.500
35	10.812.500	3.937.500	3.687.500	3.937.500	562.500	25.312.500	3.000.000
36	10.750.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.250.000	3.062.500
37	10.687.500	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.625.000	2.750.000
38	10.750.000	3.937.500	3.625.000	4.000.000	562.500	25.312.500	3.187.500
39	10.750.000	3.875.000	3.687.500	4.062.500	562.500	25.625.000	2.750.000
40	10.812.500	3.937.500	3.750.000	3.937.500	562.500	25.625.000	2.625.000
41	10.687.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.375.000	3.062.500
42	10.812.500	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.250.000	3.062.500
43	10.625.000	3.937.500	3.687.500	4.000.000	562.500	25.562.500	2.875.000
44	10.750.000	4.000.000	3.687.500	4.000.000	562.500	25.437.500	2.937.500
45	10.812.500	3.875.000	3.687.500	3.937.500	625.000	25.687.500	2.625.000
46	10.812.500	4.000.000	3.625.000	4.000.000	562.500	25.500.000	2.812.500
47	10.875.000	3.687.500	3.750.000	4.062.500	562.500	25.500.000	3.312.500
48	10.687.500	3.875.000	3.625.000	4.000.000	562.500	25.687.500	2.812.500
49	10.812.500	3.937.500	3.625.000	4.062.500	562.500	25.375.000	2.937.500
50	10.687.500	3.875.000	3.625.000	3.875.000	562.500	25.500.000	3.125.000

Tabela A.26: TKU nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	28.360.796	1.211.377	3.891.082	7.335.682	496.340	42.165.558	1.120.334
2	27.514.168	1.227.881	3.714.726	7.204.907	519.248	42.105.404	1.059.752
3	27.283.461	1.258.255	3.901.086	7.709.789	465.796	42.093.570	1.271.593
4	26.662.991	1.114.130	3.613.264	7.534.271	511.612	41.717.312	1.292.244
5	27.564.267	1.200.666	3.707.657	7.216.159	461.978	41.790.580	1.091.018
6	28.735.067	1.272.502	3.747.757	7.528.185	526.884	42.297.581	1.119.214
7	29.295.354	1.201.603	3.658.108	7.067.151	484.886	42.426.786	1.204.098
8	29.043.311	1.166.283	3.821.561	7.443.715	465.796	42.042.094	1.181.007
9	27.940.761	1.236.111	3.664.584	7.361.323	530.702	41.189.408	1.027.590
10	28.790.914	1.202.309	3.719.602	7.315.736	545.974	42.484.835	1.216.274
11	28.132.268	1.271.481	3.715.929	7.232.866	515.430	42.358.456	1.140.047
12	28.458.964	1.184.647	3.787.724	7.150.739	458.160	42.337.922	1.134.112
13	28.106.110	1.187.045	3.674.872	7.032.841	507.794	41.586.583	1.142.636
14	26.938.027	1.213.352	4.075.193	7.816.624	507.794	41.903.409	1.194.976
15	27.669.471	1.132.020	3.874.015	6.806.659	465.796	41.881.145	1.258.048
16	28.545.753	1.192.918	3.771.356	7.496.080	427.616	42.076.634	1.190.901
17	28.086.871	1.120.770	3.701.370	6.938.026	500.158	41.894.040	1.221.295
18	28.788.301	1.167.204	3.936.032	7.051.766	488.704	42.026.814	1.173.836
19	28.229.052	1.174.666	4.106.390	7.284.816	511.612	42.297.684	1.090.603
20	29.334.185	1.250.129	3.501.823	7.133.490	526.884	42.388.411	1.113.105
21	28.087.468	1.119.089	3.745.489	7.455.370	458.160	41.811.991	1.125.912
22	26.447.314	1.172.624	3.811.531	7.082.359	503.976	41.496.629	1.221.179
23	28.870.814	1.234.949	3.722.676	7.345.976	519.248	42.438.290	1.159.676
24	27.771.628	1.203.475	4.034.955	7.614.419	545.974	41.842.395	1.220.208
25	27.840.738	1.266.389	3.688.385	7.599.929	530.702	41.914.022	1.145.666
26	28.357.602	1.228.852	3.692.002	7.034.857	503.976	41.841.188	1.179.015
27	28.230.325	1.233.820	3.774.872	7.334.813	526.884	41.739.296	1.252.678
28	27.570.626	1.195.665	3.629.317	7.008.989	465.796	42.272.580	1.226.010
29	28.109.503	1.199.238	4.082.809	7.030.044	534.520	42.089.419	1.135.349
30	27.870.671	1.254.097	3.816.074	7.012.946	503.976	42.044.037	1.175.911
31	28.198.662	1.084.445	3.694.849	7.214.521	503.976	41.800.892	1.211.734
32	28.028.462	1.134.822	4.064.332	7.464.038	507.794	41.774.698	1.232.210
33	29.018.316	1.239.759	3.624.466	7.505.618	526.884	42.213.920	1.147.857
34	27.341.370	1.248.287	3.876.541	7.341.831	484.886	41.755.981	997.768
35	28.226.962	1.200.296	3.691.787	7.569.412	500.158	42.121.125	1.232.135
36	28.494.255	1.214.016	3.798.831	7.184.381	515.430	41.931.937	1.203.226
37	28.174.279	1.187.817	3.736.593	7.572.676	515.430	42.407.459	1.125.820
38	27.769.611	1.227.968	3.783.251	7.529.218	526.884	41.589.181	1.279.138
39	27.840.716	1.242.722	3.828.252	7.510.343	523.066	42.534.205	1.074.510
40	28.354.739	1.223.690	3.824.692	7.373.331	507.794	42.036.934	1.102.804
41	28.051.757	1.167.561	3.937.443	6.794.462	484.886	41.777.134	1.179.588
42	27.785.715	1.184.991	3.680.945	7.439.078	511.612	42.068.877	1.237.455
43	28.343.448	1.163.959	3.690.975	7.496.735	549.792	42.537.466	1.095.011
44	27.929.404	1.249.403	3.855.606	7.450.153	526.884	41.845.317	1.168.524
45	28.388.396	1.177.388	3.658.076	7.190.001	519.248	42.234.043	1.057.445
46	29.087.471	1.298.601	3.563.689	7.197.485	523.066	42.737.923	1.148.106
47	28.282.110	1.100.933	3.593.633	7.061.998	481.068	41.912.028	1.270.622
48	26.672.073	1.156.634	3.810.353	7.002.463	488.704	41.989.956	1.122.210
49	27.557.260	1.249.909	3.667.318	7.486.504	519.248	41.917.401	1.204.430
50	28.164.107	1.169.819	3.808.892	7.193.416	503.976	42.074.080	1.204.953

Tabela A.27: Consumo diesel (litros) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	157.743.252	15.401.443	111.633.813	151.517.498	6.310.467	536.163.809	14.243.926
2	152.915.059	15.611.282	106.575.605	148.092.655	6.601.719	535.731.623	13.473.691
3	151.165.847	15.997.455	111.981.529	160.359.447	5.922.130	534.756.861	16.167.036
4	147.815.803	14.165.046	103.661.171	155.096.272	6.504.635	530.333.593	16.429.585
5	152.347.804	15.265.262	106.395.424	148.689.955	5.873.588	531.555.764	13.871.208
6	158.525.715	16.178.591	107.542.566	155.553.303	6.698.803	540.444.752	14.229.680
7	162.967.148	15.277.186	104.953.296	146.003.924	6.164.841	540.255.999	15.308.897
8	162.345.376	14.828.120	109.677.715	153.559.781	5.922.130	536.525.137	15.015.323
9	156.284.860	15.715.911	105.137.734	151.717.061	6.747.345	524.918.929	13.064.777
10	160.971.745	15.286.156	106.750.400	151.301.752	6.941.513	541.353.653	15.463.704
11	156.045.819	16.165.611	106.621.142	149.626.173	6.553.177	539.596.711	14.494.551
12	156.850.195	15.061.596	108.711.865	146.705.133	5.825.046	540.533.750	14.419.100
13	156.731.372	15.092.093	105.443.218	146.005.758	6.456.093	528.603.503	14.527.475
14	150.726.173	15.426.559	116.963.927	160.557.669	6.456.093	532.375.571	15.192.924
15	154.298.424	14.392.507	111.193.224	140.632.774	5.922.130	532.137.542	15.994.817
16	157.322.339	15.166.753	108.186.048	155.257.288	5.436.710	535.867.737	15.141.110
17	156.310.799	14.249.467	106.207.286	142.988.839	6.359.009	533.785.109	15.527.547
18	160.300.055	14.839.833	112.979.479	145.467.923	6.213.383	535.551.098	14.924.148
19	157.533.414	14.934.701	117.894.626	150.949.495	6.504.635	538.155.655	13.865.932
20	162.373.792	15.894.145	100.457.836	146.929.509	6.698.803	540.894.229	14.152.013
21	155.975.748	14.228.098	107.495.249	154.078.281	5.825.046	532.070.411	14.314.840
22	146.883.352	14.908.742	109.353.729	145.901.573	6.407.551	526.214.158	15.526.070
23	160.325.113	15.701.138	106.744.636	150.910.826	6.601.719	540.553.021	14.744.121
24	153.291.478	15.300.982	115.824.994	157.054.947	6.941.513	532.653.008	15.513.723
25	154.168.416	16.100.871	105.848.194	157.721.182	6.747.345	533.918.840	14.565.992
26	155.995.376	15.623.629	105.937.603	145.611.762	6.407.551	533.277.465	14.989.997
27	157.031.354	15.686.786	108.309.224	150.135.107	6.698.803	531.822.144	15.926.542
28	152.792.279	15.201.682	104.135.065	144.591.097	5.922.130	538.025.481	15.587.486
29	156.540.734	15.247.111	117.192.074	144.838.943	6.795.887	536.037.320	14.434.823
30	154.633.195	15.944.587	109.505.094	144.886.636	6.407.551	534.470.774	14.950.530
31	157.041.894	13.787.631	105.992.528	149.185.308	6.407.551	532.299.676	15.405.981
32	154.239.428	14.428.122	116.655.597	153.333.821	6.456.093	533.089.952	15.666.314
33	160.388.074	15.762.290	103.967.117	154.900.029	6.698.803	540.350.571	14.593.851
34	150.914.934	15.870.718	111.243.431	152.057.393	6.164.841	531.490.820	12.685.621
35	156.007.383	15.260.566	105.934.457	156.747.063	6.359.009	536.418.245	15.665.364
36	159.828.698	15.435.001	109.004.373	147.317.356	6.553.177	533.583.140	15.297.817
37	155.523.297	15.101.907	107.231.602	156.841.625	6.553.177	540.907.961	14.313.679
38	154.179.167	15.612.390	108.588.483	155.673.744	6.698.803	529.672.146	16.262.959
39	155.561.447	15.799.963	109.865.298	155.308.205	6.650.261	540.004.651	13.661.316
40	157.026.585	15.557.991	109.742.377	151.521.885	6.456.093	536.208.981	14.021.055
41	156.733.610	14.844.371	113.044.791	139.736.614	6.164.841	533.648.674	14.997.278
42	156.024.329	15.065.976	105.628.211	153.516.249	6.504.635	532.307.444	15.733.007
43	156.899.550	14.798.572	105.900.229	154.733.309	6.990.055	542.239.587	13.921.966
44	154.516.067	15.884.912	110.611.370	152.389.072	6.698.803	532.161.950	14.856.612
45	156.731.141	14.969.314	104.941.687	147.932.576	6.601.719	539.726.752	13.444.354
46	160.705.993	16.510.418	102.242.773	148.782.610	6.650.261	544.326.529	14.597.017
47	155.808.660	13.997.259	103.092.849	145.854.704	6.116.299	534.995.169	16.154.689
48	149.172.371	14.705.445	109.336.429	143.406.782	6.213.383	532.234.794	14.267.775
49	152.514.611	15.891.349	105.238.291	154.346.528	6.601.719	532.899.529	15.313.118
50	156.588.081	14.873.074	109.288.001	148.845.646	6.407.551	536.331.563	15.319.766

Tabela A.28: Emissão CO₂ (kg) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	414.864.752	40.505.796	293.596.927	398.491.021	16.596.528	1.410.110.817	37.461.527
2	402.166.606	41.057.672	280.293.840	389.483.682	17.362.521	1.408.974.168	35.435.807
3	397.566.177	42.073.308	294.511.421	421.745.346	15.575.203	1.406.410.546	42.519.305
4	388.755.562	37.254.070	272.628.880	407.903.195	17.107.190	1.394.777.351	43.209.809
5	400.674.723	40.147.639	279.819.966	391.054.581	15.447.537	1.397.991.660	36.481.277
6	416.922.631	42.549.694	282.836.949	409.105.188	17.617.852	1.421.369.698	37.424.060
7	428.603.599	40.179.000	276.027.170	383.990.319	16.213.531	1.420.873.277	40.262.399
8	426.968.340	38.997.954	288.452.391	403.862.223	15.575.203	1.411.061.111	39.490.299
9	411.029.183	41.332.847	276.512.239	399.015.872	17.745.518	1.380.536.784	34.360.363
10	423.355.690	40.202.590	280.753.551	397.923.607	18.256.180	1.423.760.108	40.669.541
11	410.400.503	42.515.558	280.413.605	393.516.835	17.234.856	1.419.139.349	38.120.670
12	412.516.014	39.611.998	285.912.205	385.834.501	15.319.872	1.421.603.763	37.922.233
13	412.203.507	39.692.205	277.315.664	383.995.143	16.979.524	1.390.227.212	38.207.260
14	396.409.836	40.571.849	307.615.127	422.266.670	16.979.524	1.400.147.751	39.957.389
15	405.804.856	37.852.294	292.438.180	369.864.196	15.575.203	1.399.521.735	42.066.369
16	413.757.750	39.888.561	284.529.306	408.326.668	14.298.547	1.409.332.149	39.821.120
17	411.097.400	37.476.097	279.325.163	376.060.647	16.724.193	1.403.854.837	40.837.449
18	421.589.144	39.028.761	297.136.030	382.580.637	16.341.196	1.408.499.386	39.250.510
19	414.312.879	39.278.264	310.062.865	396.997.172	17.107.190	1.415.349.372	36.467.400
20	427.043.074	41.801.602	264.204.108	386.424.608	17.617.852	1.422.551.823	37.219.795
21	410.216.217	37.419.897	282.712.506	405.225.880	15.319.872	1.399.345.180	37.648.029
22	386.303.215	39.209.990	287.600.306	383.721.137	16.851.859	1.383.943.237	40.833.564
23	421.655.048	41.293.992	280.738.394	396.895.473	17.362.521	1.421.654.445	38.777.037
24	403.156.586	40.241.584	304.619.735	413.054.512	18.256.180	1.400.877.411	40.801.092
25	405.462.934	42.345.291	278.380.751	414.806.708	17.745.518	1.404.206.549	38.308.560
26	410.267.840	41.090.144	278.615.895	382.958.934	16.851.859	1.402.519.734	39.423.691
27	412.992.462	41.256.248	284.853.258	394.855.332	17.617.852	1.398.692.239	41.886.805
28	401.843.695	39.980.424	273.875.222	380.274.585	15.575.203	1.415.007.014	40.995.088
29	411.702.129	40.099.903	308.215.154	380.926.421	17.873.184	1.409.778.151	37.963.585
30	406.685.303	41.934.263	287.998.398	381.051.853	16.851.859	1.405.658.137	39.319.894
31	413.020.181	36.261.470	278.760.348	392.357.359	16.851.859	1.399.948.149	40.517.730
32	405.649.697	37.945.962	306.804.221	403.267.950	16.979.524	1.402.026.575	41.202.406
33	421.820.634	41.454.823	273.433.517	407.387.077	17.617.852	1.421.122.001	38.381.829
34	396.906.276	41.739.989	292.570.224	399.910.944	16.213.531	1.397.820.858	33.363.183
35	410.299.418	40.135.288	278.607.623	412.244.775	16.724.193	1.410.779.985	41.199.908
36	420.349.475	40.594.052	286.681.502	387.444.646	17.234.856	1.403.323.659	40.233.258
37	409.026.271	39.718.016	282.019.112	412.493.474	17.234.856	1.422.587.937	37.644.977
38	405.491.208	41.060.586	285.587.710	409.421.948	17.617.852	1.393.037.744	42.771.583
39	409.126.605	41.553.903	288.945.732	408.460.578	17.490.187	1.420.212.233	35.929.262
40	412.979.919	40.917.518	288.622.451	398.502.559	16.979.524	1.410.229.621	36.875.375
41	412.209.393	39.040.695	297.307.800	367.507.295	16.213.531	1.403.496.012	39.442.841
42	410.343.986	39.623.516	277.802.195	403.747.735	17.107.190	1.399.968.578	41.377.808
43	412.645.817	38.920.245	278.517.602	406.948.604	18.383.846	1.426.090.113	36.614.771
44	406.377.255	41.777.318	290.907.904	400.783.259	17.617.852	1.399.585.929	39.072.888
45	412.202.900	39.369.295	275.996.636	389.062.676	17.362.521	1.419.481.357	35.358.652
46	422.656.761	43.422.400	268.898.494	391.298.265	17.490.187	1.431.578.770	38.390.155
47	409.776.776	36.812.791	271.134.194	383.597.871	16.085.865	1.407.037.296	42.486.833
48	392.323.337	38.675.321	287.554.809	377.159.837	16.341.196	1.399.777.508	37.524.249
49	401.113.427	41.794.247	276.776.705	405.931.370	17.362.521	1.401.525.761	40.273.500
50	411.826.652	39.116.184	287.427.443	391.464.050	16.851.859	1.410.552.011	40.290.985

Tabela A.29: Receita (US\$) nas ferrovias para a soja e o milho até aos portos.

Rep.	Tegram-TPSL	Paranaguá	Tiplam	Tubarão	Rio Grande	Santos	São Francisco
1	1.302.534.528	260.865.680	346.167.360	435.410.640	44.454.800	2.767.647.040	190.103.200
2	1.271.794.752	260.234.880	330.130.080	430.908.660	46.506.560	2.772.718.080	182.514.510
3	1.243.461.696	259.640.600	329.353.920	452.680.200	41.719.120	2.761.095.168	219.688.550
4	1.228.217.664	237.226.450	322.161.840	449.526.420	45.822.640	2.740.974.400	220.733.520
5	1.265.231.104	254.443.970	322.741.440	429.915.780	41.377.160	2.743.176.512	186.394.760
6	1.310.275.776	268.890.950	327.395.880	446.639.760	47.190.480	2.773.445.248	193.089.540
7	1.336.898.368	251.270.880	324.477.720	419.350.680	43.428.920	2.784.280.640	210.033.990
8	1.327.230.272	248.121.030	328.764.240	442.743.840	41.719.120	2.759.311.104	203.310.160
9	1.280.806.336	258.012.970	325.505.880	438.410.700	47.532.440	2.710.078.592	179.265.060
10	1.317.351.680	251.739.830	320.455.800	433.429.920	48.900.280	2.786.281.088	210.114.500
11	1.291.310.528	269.297.650	326.901.960	428.251.320	46.164.600	2.779.187.520	196.941.570
12	1.296.758.400	253.921.070	324.316.440	428.904.000	41.035.200	2.770.947.264	194.904.750
13	1.284.018.240	249.956.990	323.280.720	414.135.540	45.480.680	2.728.790.656	198.892.900
14	1.236.447.616	256.410.240	348.362.280	467.917.380	45.480.680	2.751.248.960	206.723.950
15	1.277.706.304	237.164.200	330.183.000	403.785.900	41.719.120	2.758.092.288	216.451.550
16	1.310.539.264	251.255.110	339.444.000	442.941.660	38.299.520	2.760.647.680	206.810.270
17	1.291.774.208	240.197.020	324.482.760	413.244.720	44.796.760	2.756.733.632	209.302.760
18	1.310.321.408	246.848.640	333.824.400	419.440.140	43.770.880	2.756.019.712	201.178.720
19	1.295.018.496	254.748.580	340.782.120	430.198.020	45.822.640	2.775.653.248	186.184.770
20	1.333.677.632	262.539.790	313.989.480	425.290.320	47.190.480	2.776.403.968	192.671.220
21	1.286.045.184	237.631.490	321.975.360	442.159.200	41.035.200	2.742.419.904	195.861.740
22	1.225.690.240	244.727.990	338.254.560	422.002.980	45.138.720	2.736.197.760	210.722.060
23	1.322.986.496	264.346.700	348.127.920	439.637.940	46.506.560	2.783.000.000	198.184.080
24	1.279.683.200	257.002.030	340.515.000	453.043.080	48.900.280	2.752.410.368	209.321.020
25	1.283.741.504	266.185.980	319.644.360	447.854.400	47.532.440	2.757.976.000	198.997.480
26	1.302.103.232	262.524.850	323.961.120	416.176.740	45.138.720	2.750.807.360	202.297.560
27	1.291.693.248	259.779.210	333.010.440	441.447.300	47.190.480	2.746.404.608	213.902.620
28	1.267.293.376	250.843.430	319.803.120	416.937.780	41.719.120	2.778.074.688	213.959.890
29	1.281.470.208	251.657.660	346.396.680	418.947.480	47.874.400	2.763.094.144	195.904.070
30	1.284.318.528	264.475.350	332.957.520	416.208.240	45.138.720	2.763.887.552	203.121.750
31	1.287.561.344	229.301.610	332.080.560	427.524.300	45.138.720	2.744.801.600	212.568.810
32	1.277.670.976	236.551.660	346.820.040	446.910.660	45.480.680	2.739.268.352	214.945.930
33	1.322.820.160	261.064.880	327.529.440	446.031.180	47.190.480	2.776.701.312	199.311.220
34	1.253.400.640	263.370.620	337.070.160	433.980.540	43.428.920	2.746.777.024	173.697.420
35	1.297.266.240	255.542.890	323.139.600	447.567.120	44.796.760	2.769.029.248	211.759.560
36	1.303.707.712	254.621.590	332.934.840	431.261.460	46.164.600	2.753.088.960	209.302.760
37	1.292.850.240	254.908.770	323.741.880	447.596.100	46.164.600	2.784.208.512	192.382.380
38	1.269.900.288	257.285.060	322.512.120	446.231.520	47.190.480	2.743.139.712	222.897.330
39	1.277.266.176	263.444.490	330.613.920	444.980.340	46.848.520	2.787.027.392	185.470.140
40	1.299.689.152	263.278.490	336.402.360	441.091.980	45.480.680	2.764.196.672	187.731.890
41	1.276.531.648	250.006.790	326.687.760	406.003.500	43.428.920	2.739.907.200	203.226.330
42	1.288.594.688	251.447.670	320.717.880	442.074.780	45.822.640	2.763.735.936	211.694.820
43	1.286.909.248	247.163.210	326.297.160	445.420.080	49.242.240	2.779.630.592	190.506.580
44	1.282.970.176	261.363.680	344.373.120	448.896.420	47.190.480	2.745.176.960	203.159.930
45	1.307.933.824	251.206.140	327.494.160	429.307.200	46.506.560	2.784.301.248	181.503.570
46	1.332.271.872	267.718.160	316.575.000	426.681.360	46.848.520	2.802.163.968	200.184.380
47	1.295.648.512	232.307.870	321.917.400	419.234.760	43.086.960	2.751.472.704	219.626.300
48	1.239.878.848	244.445.790	333.736.200	421.254.540	43.770.880	2.767.374.720	194.311.300
49	1.270.235.904	263.691.000	319.213.440	445.625.460	46.506.560	2.757.703.680	207.469.290
50	1.293.539.136	244.650.800	335.497.680	425.835.900	45.138.720	2.768.249.088	208.831.320