

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Ingrid Machado Silveira

Metodologia de otimização via
simulação para dimensionamento da
infraestrutura de sistemas logísticos
intermodais para o escoamento de
commodities

Belo Horizonte

2017

Ingrid Machado Silveira

Metodologia de otimização via
simulação para dimensionamento da
infraestrutura de sistemas logísticos
intermodais para o escoamento de
commodities

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, na Linha de Pesquisa Otimização e Simulação de Sistemas Logísticos e de Grande Porte.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto

Belo Horizonte

2017

Machado Silveira, Ingrid.

Metodologia de otimização via simulação para dimensionamento da infraestrutura de sistemas logísticos intermodais para o escoamento de *commodities*

95 páginas

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Sistemas logísticos
2. Ferrovias
3. Portos
4. Intermodalidade
5. Dimensionamento de infraestrutura
6. Metodologia
7. Otimização via simulação
8. *Commodities*

I. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Produção.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr.

Carlos Andrey Maia

Prof. Dr.

Samuel Vieira Conceição

Profa. Dra.

Lásara Fabricia Rodrigues

Prof. Dr.

Luiz Ricardo Pinto

A Deus.

Aos meus pais Eliza e Paulo.

Ao meu marido Damerson.

"Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota".

Madre Teresa de Calcuta

Agradecimentos

À Deus, pelas grandes obras realizadas em minha vida. Por ser o meu porto seguro em todos os momentos difíceis ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Luiz Ricardo Pinto, pela valiosa orientação, amizade, por todo o conhecimento compartilhado e, principalmente, pela paciência, sem a qual este trabalho não se realizaria.

À minha família, especialmente meus pais, Eliza e Paulo, que me deram a vida e, com seu amor incondicional e paciência, me ensinaram a vivê-la com dignidade.

Ao meu amado marido, Damerson, pelo incentivo e compreensão diante de todos os momentos de ausência e dificuldades.

Aos amigos Márcia e Patrick, pela hospitalidade e amizade de sempre.

À Mônica do Amaral, ex-professora e grande incentivadora, por ser a primeira pessoa a acreditar em meu potencial rumo ao mestrado.

Às colegas do laboratório de simulação, pelo conhecimento compartilhado, pelas dúvidas esclarecidas e pelos momentos de distração, que tornaram essa batalha menos árdua.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

Diversas atividades produtivas como mineração e indústria agrícola possuem grande parte de sua produção voltadas para o comércio internacional. Dessa forma, torna-se necessário o escoamento de seus produtos por longas distâncias, desde seu ponto de produção até o ponto de consumo. Para isso, geralmente faz-se uso de um transporte intermodal, que compreende os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. Nesse sistema, o uso eficaz dos recursos logísticos é de suma importância para redução de custos e elevação do nível de serviço prestado. Este trabalho tem como objetivo a proposição de 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 de armazéns e das composições ferroviárias. A etapa de otimização foi realizada utilizando duas ferramentas distintas: um otimizador disponível em pacote de simulação comercial e uma heurística desenvolvida especificamente para este tipo de problema. Essas ferramentas foram analisadas, visando constatar a adequação das mesmas à resolução do problema em estudo. Por fim, realizou-se também uma análise de sensibilidade a fim de obter algumas considerações importantes acerca do sistema logístico estudado.

Palavras-chave: sistema logístico, ferrovias, portos, intermodalidade, dimensionamento, infraestrutura, metodologia, otimização via simulação, *commodities*.

Abstract

Various productive activities, such as mining and the agricultural industry, have a large part of their production destined for international trade. In this way, it is necessary to dispose of its products over long distances, from its point of production to the point of consumption. For this, it is generally used intermodal transport, which includes the modalities of road, rail and waterway. In this system, the efficient use of logistical resources is of paramount importance for reducing costs and raising the level of service provided. This work aims to propose an optimization methodology through simulation for the design of part of the infrastructure of an intermodal logistics system for the transportation of commodities, aiming at minimizing logistics costs and, consequently, maximizing the use of resources. It seeks to optimize logistics costs related to the design of warehouses and train compositions. The optimization step was performed using two distinct tools: an optimizer available in commercial simulation package and a heuristic developed specifically for this type of problem. These tools were analyzed, aiming to verify an adequacy to the same solution of the problem under study. Finally, a sensitivity analysis was carried out in order to obtain some important considerations about the logistic system studied.

Keywords: logistics system, railways, ports, intermodal, design, infrastructure, methodology, optimization and simulation, *commodities*.

Lista de Figuras

2.1	Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de cargas em 2011	8
2.2	Custos Logísticos em relação ao PIB Brasil x EUA em 2004	8
2.3	Representação simplificada de um terminal de transbordo em operação	12
2.4	Metodologia de Simulação	15
2.5	Representação da idéia base da Otimização Via Simulação	23
3.1	Sistema logístico estudado	30
4.1	Fluxograma do sistema a ser modelado - Entidade Caminhão	45
4.2	Fluxograma do sistema a ser modelado - Entidade Navio	46
4.3	Fluxograma do sistema a ser modelado - Entidade Composição	47
5.1	Histogramas de Capacidades dos Armazéns	51
5.2	Esquema da política de despacho de trens	52
5.3	Análise cruzada entre estoques 1	53
5.4	Análise cruzada entre estoques 2	54
5.5	Resultados de uma medida de desempenho após 150 replicações	56
5.6	Atividades principais do ciclo das composições	57
5.7	Regime permanente do sistema em estudo.	58
5.8	Histogramas dos estoques do cenário inicial	71
6.1	Resultados da Otimização via Simulação utilizando o pacote de simulação	79
6.2	Histograma de estoques da solução obtida utilizando o otimizador do pacote de simulação	79
6.3	Heurística desenvolvida para o problema	81
6.4	Histogramas de estoques da melhor solução obtida pela heurística proposta	84

7.1	Número de composições <i>versus</i> capacidade de exportação	87
7.2	Tamanho das composições <i>versus</i> velocidade de escoamento	89

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros de entrada do modelo de simulação	38
4.2	Controles do sistema em estudo.	40
4.3	Atividades presentes no sistema estudado.	41
5.1	Quantidade total exportada para cada replicação do modelo de simulação	59
5.2	Intervalo de Confiança para o sistema logístico em estudo	59
5.3	Definição de alguns parâmetros de entrada do modelo de simulação	60
5.4	Definição das expressões probabilísticas utilizadas como parâmetros de entrada do modelo de simulação 01	61
5.5	Cálculo de expressões probabilísticas utilizadas como parâmetros de entrada do modelo de simulação	62
5.6	Cálculo de alguns parâmetros de entrada do modelo de simulação utilizando a técnica de balanceamento do sistema	63
5.7	Análise do número de composições viáveis para o sistema	69
5.8	Resultados estatísticos do modelo de simulação para o cenário inicial	70
6.1	Custos relativos adotados para o problema em estudo	75
6.2	Opções de tipo e número de composições viáveis para o sistema	77
6.3	Estatísticas da melhor solução obtida pelo otimizador do pacote de simulação	80
6.4	Estatísticas da melhor solução obtida pela heurística proposta	84
6.5	Comparação dos resultados obtidos	85
7.1	Dados para a análise de sensibilidade: tipo e número de composições <i>versus</i> capacidade de exportação	87
7.2	Dados para a análise de sensibilidade: tipo e número de composições <i>versus</i> velocidade de escoamento	89

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo Geral	4
1.2.2	Objetivos Específicos	5
1.3	Organização do Texto	5
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Conceitos Logísticos	7
2.1.1	Custos Logísticos de Transporte	7
2.1.2	Transporte Rodoviário	9
2.1.3	Transporte Ferroviário	10
2.1.4	Transporte Intermodal	11
2.2	Simulação	13
2.2.1	Conceitos	13
2.2.2	Uso da simulação em ferrovias e portos	16
2.2.3	Uso da simulação para análise de sistemas logísticos integrados	19
2.3	Otimização via Simulação	21
2.3.1	Conceitos	21
2.3.2	Uso conjunto de otimização e simulação aplicados em sistemas logísticos	24
3	Definição do Problema	29
3.1	Sistema logístico multimodal para escoamento de <i>commodities</i>	29
3.2	Pontos de estudo no sistema logístico abordado	32

4	Modelo Conceitual	35
4.1	Objetivos da simulação	36
4.2	Especificações do sistema logístico	37
4.3	Representação do processo	40
4.3.1	Entidades	41
4.3.2	Recursos	41
4.3.3	Atividades	41
4.3.3.1	Descarga de Caminhões	42
4.3.3.2	Carregamento de vagões	42
4.3.3.3	Transporte ferroviário	43
4.3.3.4	Descarga das composições	43
4.3.3.5	Carregamento de navios	43
4.3.4	Filas	44
4.4	Fluxograma do sistema	44
5	Modelo Computacional de Simulação	48
5.1	Principais características do modelo computacional de simulação	48
5.1.1	Leitura de arquivos	49
5.1.2	Principais variáveis do modelo	49
5.1.3	Definição da política de despacho de trens	51
5.2	Verificação e validação do modelo computacional	54
5.3	Definição dos parâmetros de execução do modelo de simulação	56
5.4	Coleta e tratamento de dados	59
5.4.1	Tratamento de parâmetros de entrada do modelo de simulação	59
5.4.2	Tratamento de controles do sistema logístico	67
5.5	Definição de Cenário Inicial	69
6	Modelo de Otimização Via Simulação	73
6.1	Generalidades do modelo de otimização via simulação	74
6.2	Otimização via Simulação utilizando um otimizador disponível em pacote de simulação comercial	77
6.3	Otimização via Simulação utilizando o método heurístico proposto	80
6.4	Análise dos resultados obtidos	85

7	Análise de Sensibilidade	86
7.1	Análise do tipo e número de composições <i>versus</i> capacidade de exportação	86
7.2	Análise do tipo e número de composições <i>versus</i> velocidade de escoamento	88
8	Considerações Finais	90
	Referências Bibliográficas	92

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar a motivação que levou à realização deste trabalho, bem como os objetivos gerais e específicos que se pretende alcançar ao término deste. Por fim, é apresentada de maneira sucinta a descrição do conteúdo dos capítulos que compõem esta dissertação.

1.1 Motivação

A importância da logística como estratégia para obtenção de vantagem competitiva nas empresas é algo incontestável nos dias atuais. A adoção de um sistema de transporte eficiente é uma das principais formas para alcançar este objetivo, visto que esta atividade primária é uma das mais onerosas, responsável por cerca de um a dois terços dos custos logísticos (BALLOU, 2009).

Dentre as diversas decisões inerentes à gestão de transportes, uma das mais relevantes diz respeito à seleção do modal para a movimentação dos produtos de um local de origem até o local de destino. Segundo Bowersox e Closs (2001), a partir dos modais disponíveis, o usuário seleciona o serviço que proporciona o melhor atendimento à combinação de alguns fatores, tais como: minimização dos custos financeiros e temporais, minimização das perdas e danos e atendimento às expectativas dos clientes quanto ao desempenho da entrega e disponibilidade de informações quanto às cargas.

A seleção do modal pode ocorrer de forma exclusiva, ou seja, utilizando apenas um tipo de transporte para todo o percurso a ser realizado, ou pode haver combinação destes, selecionando o modal mais adequado para cada trecho do trajeto. O transporte intermodal é uma forma interessante para aproveitar ao máximo os benefícios dos modais disponíveis em cada segmento

do percurso e reduzir ainda mais os custos inerentes ao transporte.

Contudo, para se fazer uso do transporte intermodal há necessidade também da existência dos terminais de carga, que são as estruturas de apoio entre os modais. Os terminais são compostos por armazéns que estocam provisoriamente os produtos em trânsito, enquanto aguardam o carregamento para o próximo modal de transporte.

De acordo com Naves (2012), o processo de armazenagem é um aspecto muito importante da logística. É considerada uma função de apoio essencial para o serviço de transporte intermodal, visto que o sistema logístico dispõe de incertezas quanto ao fluxo de produção ao longo do transporte.

Segundo Pereira (2003), o principal desafio da intermodalidade é manter o fluxo contínuo de produtos através de todo o processo de transporte e de transferência de materiais. Isso se deve ao fato de haver a discretização das cargas em diferentes pontos do sistema, visto que cada modal possui diferentes capacidades em seus veículos de transporte e diferentes formas de carregamento e descarregamento. Dessa forma, os armazéns presentes nos terminais intermodais são utilizados para amortecer as flutuações de produtos ao longo do sistema, de forma a reduzir ao máximo os atrasos durante a transferência entre modais.

No caso específico dos terminais portuários, Naves (2012) destaca que a armazenagem é ainda mais importante, pois deve-se acumular um grande volume de carga até a chegada e embarque de grandes navios cargueiros. A inadequação da infraestrutura e conseqüente recusa de material por falta de capacidade pode acarretar na aplicação de altas multas por atraso no carregamento dos navios.

Além disso, Naves (2012) ressalta ainda que, em determinados setores, tal como o agronegócio, a produção sofre diversos picos ao longo do ano, devido aos períodos de safra e entressafra, enquanto a demanda de consumo possui um certo equilíbrio. Assim, a armazenagem possui também o papel de equilibrar o fluxo entre oferta e demanda. Para o caso do agronegócio, a armazenagem nos terminais possui também a função de amenizar os problemas de déficit de armazéns próximo às áreas produtoras, captando a produção daquela região.

Nota-se, portanto, que o terminal intermodal é um ponto crucial para o aumento do desempenho da cadeia logística, pois o mesmo apresenta elevados custos associados e demanda tempo para a sua operação, características que afetam diretamente todo o sistema de distribuição (SANTOS; SPROESSER, 2013).

O correto dimensionamento dos armazéns nos terminais é fundamental para que haja uma

minimização nos tempos de espera dos veículos de transporte. Tozi et al. (2010) acrescentam ainda que para se evitar a formação de filas excessivas, as taxas de armazenamento e de envio dos produtos devem ser elevadas. Permanecer longos períodos de tempo aguardando o carregamento/descarregamento pode prejudicar o sistema logístico ou até mesmo inviabilizar o sistema intermodal.

Assim, os terminais intermodais passam a ser um dos pontos chave para otimização logística. Konings (1996) ressalta que a qualidade dos sistemas de manuseio dos produtos nestes terminais é cada vez mais decisiva para a eficiência no transporte intermodal, principalmente quando têm-se grandes volumes de carga. O mesmo deve possuir uma estrutura física adequada, que busque a otimização dos recursos disponíveis no terminal, para que a transferência entre os modais seja feita da maneira mais eficiente possível (SOGABE, 2010).

Empresas que realizam o escoamento de *commodities* para exportação, tais como organizações dos setores da agroindústria, siderurgia e mineração, fazem uso do transporte intermodal. A disponibilidade e o desempenho dos terminais intermodais estão fortemente relacionados com a competitividade internacional no escoamento da produção (CALABREZI, 2005; LANDIVAR, 2012; LANDIVAR; SPROESSER; PEREIRA, 2014).

O transporte de *commodities* é realizado geralmente pelos modais ferroviário e hidroviário. Aliados a estes dois modais, Caixeta-Filho e Martins (2000) ressaltam a necessidade de outra modalidade para interligar os pontos de produção e consumo, devido à baixa flexibilidade dos modais já adotados no sistema. Para isso, faz-se uso tipicamente do modal rodoviário que, apesar de seu alto custo, permite o serviço porta a porta e é amplamente disponível no território brasileiro.

Fleury (2005) *apud* Pontes, Carmo e Porto (2009) ressalta que as condições insatisfatórias das rodovias, pouca disponibilidade de ferrovias e desestruturação dos portos ocasionam aumento nas filas de caminhões e trens nos portos e longas esperas de navios para atracação. Estes fatos aumentam os custos das *commodities* e reduzem a sua competitividade no mercado externo.

Desta forma, há um grande interesse das organizações pelo correto dimensionamento dos armazéns nos terminais e pelo uso eficiente dos veículos de transporte, que possuem um custo elevado de aquisição e/ou operação. Por meio de uma maior eficiência do transporte, o escoamento da produção para o mercado externo pode compreender menores custos logísticos, e conseqüentemente, maiores ganhos aos elos da cadeia produtiva (LANDIVAR; SPROESSER; PEREIRA, 2014).

Esta preocupação das organizações é justificada ainda pelos grandes volumes de produção que são exportados e pela parcela considerável dos custos logísticos no valor final dos produtos.

Um exemplo é a produção de minério de ferro, importante *commodity* nas exportações brasileiras. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, o Brasil é um dos principais produtores mundiais de minério de ferro, juntamente com a Austrália. Em 2014, o país produziu 400 milhões de toneladas do produto sendo que, destes, 344.384 milhões foram destinados à exportação, o que corresponde a 86.1% de sua produção total (Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2016).

Outro exemplo diz respeito à produção da soja. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, o Brasil é o segundo maior produtor mundial do grão, atrás apenas dos EUA. Em 2015, o Brasil exportou mais de 54 milhões de toneladas do produto, de acordo com dados fornecidos pela Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais - ABIOVE. Pontes, Carmo e Porto (2009) relatam que a logística é o grande gargalo da exportação de produtos agrícolas do país. Problemas logísticos como o transporte precário nos diversos modais de transporte utilizados e o uso improdutivo dos portos e armazéns fazem com que o produto saia do campo a preços baixos e cheguem até o seu destino final com custos altíssimos (OMETTO, 2006 *apud* PONTES; CARMO; PORTO, 2009).

Aliado à importância econômica do correto dimensionamento da infraestrutura logística, outra razão motivadora para o desenvolvimento deste trabalho é a disponibilidade de ferramentas computacionais que permitem analisar sistemas logísticos complexos e de difícil dimensionamento analítico, como o exposto. Dentre estas ferramentas, têm-se a otimização via simulação, que permite dimensionar o sistema de forma a minimizar os custos envolvidos no processo e, conseqüentemente, maximizar o uso dos recursos logísticos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral **o desenvolvimento de 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.**

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral, este trabalho busca desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa na literatura sobre as ferramentas de simulação e de otimização via simulação, destacando suas vantagens e aplicações em sistemas logísticos.
- Estudar o problema do dimensionamento de recursos em um sistema logístico intermodal, com enfoque na capacitação dos armazéns e no dimensionamento de composições ferroviárias.
- Propor uma metodologia de otimização via simulação para a resolução do problema de dimensionamento da infraestrutura logística, que possa ser aplicada à diversas empresas voltadas para a exportação de *commodities*, levando em consideração as restrições de capacidade dos recursos logísticos.
- Testar e validar a metodologia desenvolvida.
- Utilizar diferentes ferramentas de otimização para a resolução do problema e analisar os resultados obtidos.
- Realizar uma análise de sensibilidade que relaciona o dimensionamento dos recursos e a capacidade de exportação do sistema.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está organizado em capítulos. No capítulo 2 é realizada uma revisão de literatura, destacando alguns conceitos logísticos relevantes para a compreensão dos assuntos abordados e alguns trabalhos publicados relacionados ao escopo deste estudo. O capítulo 3 apresenta uma descrição genérica do tipo de problema a ser abordado nessa dissertação.

Os próximos capítulos apresentam o desenvolvimento da metodologia de otimização via simulação proposta neste trabalho. O capítulo 4 destina-se a apresentar um modelo conceitual genérico, desenvolvido para exemplificar o problema em estudo. No capítulo 5, desenvolve-se o modelo computacional de simulação, discutindo todas as etapas para a elaboração deste, bem como a etapa de validação do mesmo através de dados estimados, tendo como base dados reais. O capítulo 6 propõe o desenvolvimento do modelo de otimização para o problema, visando

minimizar os custos e, conseqüentemente, a maximização do uso dos recursos logísticos. Inicialmente, utiliza-se duas ferramentas de otimização diferentes: um otimizador que acompanha alguns *softwares* de simulação e uma heurística desenvolvida especificamente para este tipo de problema. Posteriormente, realiza-se uma análise do desempenho dessas ferramentas para o processo de otimização via simulação.

O capítulo 7 apresenta uma análise de sensibilidade que discute o reflexo de alguns parâmetros do dimensionamento dos recursos logísticos na capacidade de exportação do sistema em estudo.

Por fim, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões obtidas com o estudo realizado, bem como algumas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Esse capítulo tem como objetivo apresentar alguns conceitos logísticos relevantes para a compreensão do presente estudo e realizar uma revisão dos principais trabalhos publicados relacionados ao escopo desta dissertação, dando ênfase à utilização da ferramenta de simulação em sistemas de ferrovias e de portos e ao desenvolvimento de modelos híbridos de otimização via simulação para resolução de problemas relacionados a sistemas logísticos que envolvem o transporte intermodal.

2.1 Conceitos Logísticos

2.1.1 Custos Logísticos de Transporte

A logística possui atividades que são consideradas chaves ou primárias. Dentre elas, tem-se o transporte. Apesar de oneroso, o transporte é essencial para a coordenação e o cumprimento da logística em uma organização, visto que há a necessidade de movimentação tanto de matérias-primas como produtos finais ao longo do canal logístico.

Ainda segundo o autor, o sistema de transportes é formado por cinco modais básicos: hidroviário, ferroviário, rodoviário, aeroviário e dutoviário. Estes modais podem ser utilizados em combinação ou em caráter exclusivo. O usuário irá selecionar a opção ou o conjunto de opções que forneça a melhor combinação entre qualidade e custos, dentre os modais disponíveis.

A Figura 2.1 mostra que as ferrovias tem um papel importante na matriz de transportes de cargas brasileira. Contudo, o uso do modal rodoviário ainda é muito predominante, responsável por cerca de 52% do transporte regional, ou seja, dentro das fronteiras do país. O Ministério dos Transportes, em seu Plano Nacional de Logística e Transportes - PNLT (2011), afirma que tem-se buscado gradativamente dar maior equilíbrio à repartição dos modais, aumentando os

investimentos no modal ferroviário e nos demais modais, para que esta dependência do transporte rodoviário seja minimizada.

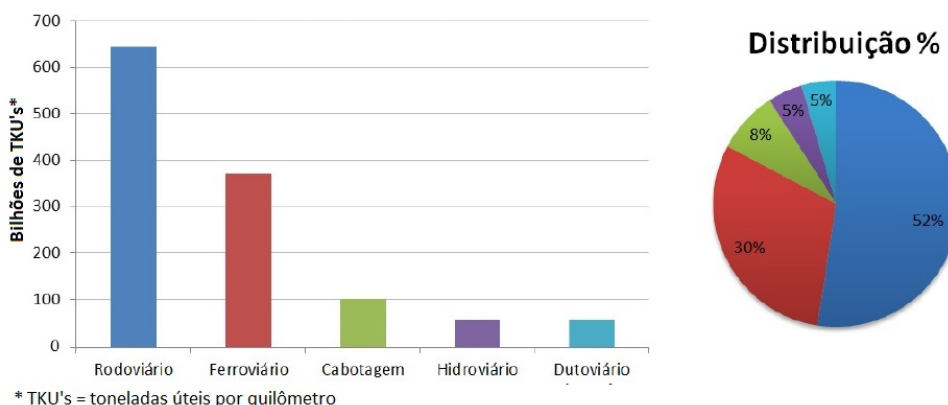


Figura 2.1: Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de cargas em 2011
Fonte: Plano Nacional de Logística e Transportes - PNL T (2011)

O desbalanceamento da matriz de transportes brasileira, com a dominância do modal rodoviário, ocasiona um quadro de desvantagens competitivas no mercado internacional, visto que os custos de transporte dos produtos voltados para a exportação tornam-se muito elevados.

Lima (2006) compara os custos logísticos domésticos do Brasil e dos EUA, em relação ao PIB (Produto Interno Bruto) de cada país, considerando os mesmos itens de custo e somente os custos do transporte doméstico, conforme mostra a Figura 2.2. De acordo com o estudo, em 2004, o Brasil obteve um custo logístico de R\$ 222 bilhões, o que equivale a 12,6% do PIB daquele ano. Em contrapartida, os custos logísticos dos EUA somaram 8,26% de seu PIB.

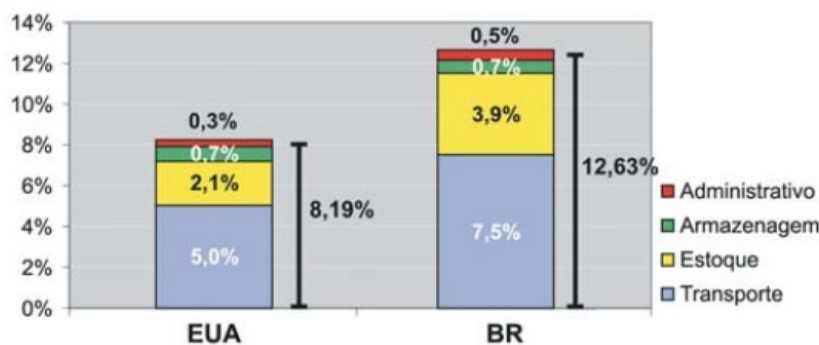


Figura 2.2: Custos Logísticos em relação ao PIB Brasil x EUA em 2004
Fonte: Lima (2006)

O estudo de Lima (2006) mostra também que a maior parte destes custos logísticos advém da atividade de transporte. No Brasil, os custos com transporte foram equivalentes a 7,5% do PIB em 2004, o que equivale a 59,38% dos custos logísticos totais. O estudo reforça ainda a

importância de um sistema de transporte eficaz para a redução dos custos logísticos.

Nas próximas subseções serão caracterizados os modais rodoviário e ferroviário, devido à típica utilização destes modais para o escoamento de *commodities* em territórios brasileiros. Segundo os autores Bowersox, Closs e Helferich (1996), estes modais serão caracterizados de acordo com cinco dimensões principais que regem a qualidade dos serviços prestados. São elas:

- *Disponibilidade*: capacidade de atender a qualquer origem e destino;
- *Capacidade*: condição de manipular qualquer carga e em qualquer quantidade;
- *Frequência*: capacidade de atender a qualquer momento;
- *Velocidade*: tempo gasto em trânsito; e
- *Confiabilidade*: variabilidade do tempo de entrega.

2.1.2 Transporte Rodoviário

Segundo Ballou (2009), uma das grandes vantagens do modal rodoviário é a sua flexibilidade, pois permite a prestação de um serviço porta-a-porta, sem a necessidade de uma infraestrutura complexa como em outros modais. Quando adotado de maneira exclusiva, não há a necessidade de carga e descarga entre origem e destino. O autor cita ainda como vantagens deste modal a frequência, ampla disponibilidade do serviço e a velocidade. Dentre as desvantagens deste modal, tem-se a restrição da capacidade de transporte, visto que o mesmo é limitado em função das dimensões máximas permitidas. Outra desvantagem diz respeito à variabilidade do tempo de entrega, devido à ocorrência de furtos e acidentes nas rodovias.

De acordo com Bowersox e Closs (2001), o modal rodoviário é destinado principalmente aos produtos acabados e semiacabados, que possuem alto valor agregado ou são perecíveis, e com deslocamentos a curtas e médias distâncias.

No Brasil, entretanto, nota-se a predominância deste modal também para cargas volumosas e pesadas, com baixo valor agregado, tais como os produtos agrícolas. Almeida et al. (2013) destacam que a adoção deste modal para o transporte destas mercadorias é inadequado devido à dois aspectos: as grandes distâncias percorridas dos pontos de produção até os portos; e as más condições das rodovias brasileiras, provenientes da falta de recursos destinados à infraestrutura entre as décadas de 1980 e 1990.

Lima (2006) reforça que os valores do frete rodoviário praticados no Brasil são baixos. Contudo, a infraestrutura inadequada das rodovias e a falta de disponibilidade de outros modais mais adequados à determinados produtos e às distâncias percorridas acabam onerando o transporte dos mesmos e, por consequência, gerando altos custos logísticos.

2.1.3 Transporte Ferroviário

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2016), o modal ferroviário possui como características a sua capacidade de transporte de grandes volumes de carga a médias e grandes distâncias, com alta eficiência energética. Possui ainda pouca variabilidade do tempo de entrega, devido à maior segurança e menor índice de acidentes, furtos e roubos que o modal rodoviário.

Em contrapartida, o modal apresenta algumas desvantagens que são destacadas por Fioroni (2008), tais como: altos custos de infraestrutura e de material rodante (locomotivas e vagões), baixa disponibilidade de rotas e elevado tempo de entrega (baixa velocidade). Entretanto, o mesmo autor afirma que, quando a economia de escala proveniente da capacidade de movimentação do transporte ferroviário é aproveitada, os altos custos do modal são compensados. Nestas condições, os custos são relativamente baixos, quando comparados ao modal rodoviário.

Fleury (2007) aponta que as características do modal justificam o destaque do mesmo na matriz de transportes de países com grandes extensões territoriais, onde uma parcela significativa das cargas movimentadas são *commodities*, tais como minério de ferro, produtos agrícolas e carvão.

Apesar das vantagens citadas e da extensão territorial do Brasil, nota-se que este modal ainda é pouco utilizado no país. O modal ferroviário é responsável por apenas 30% do transporte regional de cargas, como foi observado na matriz de transportes descrita na seção 2.1.1. Desta forma, Fioroni (2008) destaca que a adoção do modal ferroviário é uma alternativa valiosa que poderia ser aplicada em maior escala do que atualmente se faz.

Nos últimos anos, os investimentos têm aumentado devido à concessão das ferrovias nacionais às empresas privadas. Pontes, Do Carmo e Porto (2009) ressaltam que os investimentos são necessários para ampliar a disponibilidade do modal no país visto que, por meio deles, é possível expandir a malha ferroviária e minimizar os problemas de infraestrutura encontrados atualmente.

Segundo dados do Ministério dos Transportes (2016), o Brasil possui 28.190km de ferrovias, sendo que grande parte desta malha ferroviária concentra-se nas regiões sul e sudeste, com pre-

dominância para o transporte de cargas. As principais mercadorias transportadas até setembro de 2014 no país foram: minério de ferro, soja, açúcar, carvão mineral, grãos, milho, farelo de soja, óleo diesel, celulose, produtos siderúrgicos e ferro gusa (Ministério dos Transportes, 2016).

2.1.4 Transporte Intermodal

De acordo com Ghane-Ezabadi e Vergara (2016), nos últimos anos, a demanda pelo transporte de carga intermodal tem aumentado continuamente e esta tendência deverá manter-se a mesma no futuro. Ballou (2009) afirma que a motivação para o uso da intermodalidade advém de dois fatores: redução de custos e internacionalização de mercados.

Do ponto de vista da redução de custos, a intermodalidade é uma ferramenta bastante utilizada para aproveitar ao máximo os benefícios dos modais disponíveis em cada segmento do percurso e reduzir os custos inerentes ao transporte. Segundo Batalha (2008), os modais ferroviário e hidroviário são os mais econômicos para transportar grandes cargas. Entretanto, esses modais apresentam como desvantagens a disponibilidade e flexibilidade. Sendo assim, os mesmos devem ser combinados com outros modais de transporte, para a realização do escoamento da produção nos segmentos em que não estão disponíveis.

Do ponto de vista da internacionalização de mercados, o transporte internacional tem especial participação dos modais marítimo e aéreo, sendo o transporte marítimo dominante, responsável por mais de 99% do peso total transportado (BALLOU, 2009). Como dentro das fronteiras de um país o uso de outros modais de transporte pode ser mais interessante, tanto em termos de custos como de disponibilidade, a intermodalidade torna-se indispensável para o escoamento da produção com pontos de origem e destino em diferentes países.

Como consequência da intermodalidade, surge a necessidade de terminais de carga, que são as estruturas de apoio entre os modais. Segundo Marinov et al. (2013), estes terminais intermodais realizam as atividades de transferência de cargas, armazenagem provisória e podem também oferecer outros serviços complementares (por exemplo, comerciais) com valor acrescentado.

Para Martins et al. (2014), os terminais são posicionados de maneira estratégica para captar os produtos provenientes de diversos pontos de produção dispersos geograficamente, reunir grandes volumes e expedi-los para os pontos de destino. Os autores afirmam ainda que a operação eficiente e a baixos custos destes terminais é indispensável, pois podem agir como elemento catalisador na escolha do transporte intermodal. Caso contrário, os embarcadores irão optar pela operação unimodal que, apesar de eventualmente mais cara, é mais confiável.

A Figura 2.3 exemplifica a estrutura física de um terminal de carga intermodal de granéis sólidos entre os modais rodoviário e ferroviário, que permite uma operação de transferência rápida e com um baixo custo, sem perdas e avarias das cargas. Como pode ser observado, as instalações do terminal permitem diversas atividades como recepção e pesagem, descarga por gravidade, armazenagem e carregamento por gravidade. Esta estrutura é tipicamente utilizada para o transbordo de granéis sólidos (*commodities*), tais como produtos agrícolas, minérios e fertilizantes. De acordo com Almeida et al. (2013), o embarque e o transporte destas cargas são feitos a granel, ou seja, são embarcadas diretamente nos equipamentos de transporte, sem necessidade de embalagem no produto.

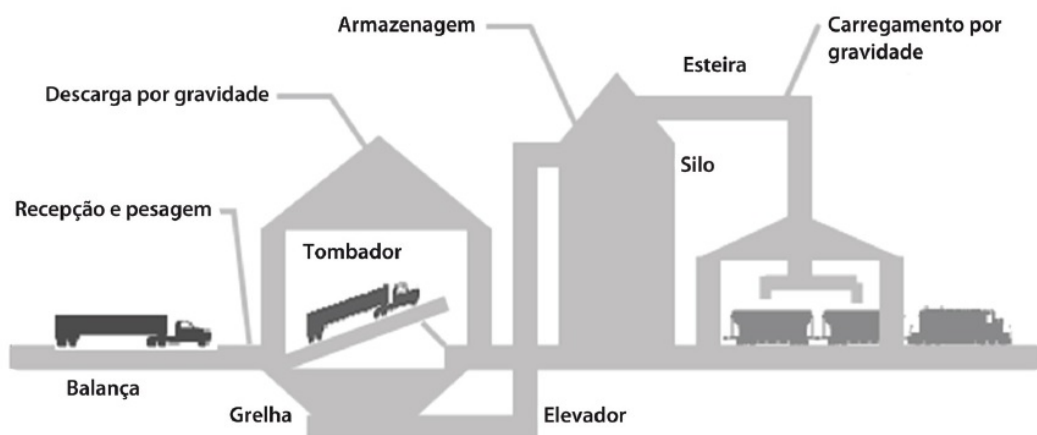


Figura 2.3: Representação simplificada de um terminal de transbordo em operação
Fonte: Calabrezi (2005)

Atualmente, existem diversas combinações de modais possíveis. Dentre elas, tem-se a combinação rodo-ferro-hidroviária, que une os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. De acordo com Martins et al. (2014), toda malha ferroviária possui um ou mais terminais de carga em pontos estratégicos, que serão responsáveis pela captação e consolidação das cargas oriundas do modal rodoviário, que é o principal integrador devido à sua grande flexibilidade. A operação ferroviária tem seu destino em um terminal de carga portuário, que também realiza as atividades de recepção e pesagem, descarga, armazenagem e o embarque dos produtos para os navios. Esta combinação é muito utilizada em operações que envolvem exportação de produtos, tais como as *commodities*.

Além dos diversos problemas logísticos de transporte do Brasil já citados, Almeida e Zinato (2011) destacam também outros gargalos existentes, com destaque para a perda de competitividade ocasionada pelo mal gerenciamento e pela ineficiência no sistema de armazenamento, o que acarreta a formação de filas nos armazéns portuários.

Ghane-Ezabadi e Vergara (2016) afirmam que o dimensionamento da infraestrutura de transporte intermodal utilizada afeta significativamente os custos de transporte e tempos de serviço. Logo, as deficiências no setor de transportes e armazenagem representam grande risco para a logística.

Segundo Ballou (2009), o desenvolvimento de um sistema logístico eficaz, do ponto de vista da qualidade e de custos, pode trazer inúmeros benefícios para o aumento da competitividade e desenvolvimento de mercados internacionais. Com ele, é possível fazer com que os produtos possam ser levados até um mercado consumidor distante a preços competitivos com os produtos regionais.

2.2 Simulação

2.2.1 Conceitos

Segundo Banks et al. (2005), a simulação é uma representação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo. De acordo com os autores, estes modelos tornaram-se mais difundidos e possuíram maior aceitabilidade devido à disponibilidade de linguagens computacionais específicas para os estudos de simulação, além do crescimento na capacidade computacional e dos avanços na metodologia de simulação.

Prado (2004) e Bodon et al. (2011), definem a simulação como uma técnica que permite imitar um sistema real com o uso dos modernos recursos oferecidos pelos computadores, permitindo a visualização em ambiente computacional dos resultados que serão obtidos em uma situação de interesse.

Já Law (2007) destaca que a simulação é o ato de imitar as operações de diferentes tipos de instalações ou processos do mundo real em menor tempo e com menor custo, permitindo um melhor estudo do que vai acontecer e de como consertar erros que gerariam grandes gastos.

A modelagem de simulação pode ser usada tanto como uma ferramenta de análise, para prever o efeito das mudanças nos sistemas em operação, como uma ferramenta de design, para prever o desempenho de novos sistemas, sob diferentes conjuntos de circunstâncias e regras de funcionamento (BANKS et al., 2005).

Azadeh, Ghaderi e Izadbakhsh (2008) reforça o uso da simulação computacional como uma ferramenta eficaz na resolução de problemas reais. Após a construção do modelo do sistema, os decisores são capazes de avaliar vários cenários distintos para então selecionar o cenário ideal.

Essa técnica fornece um processo racional e quantitativo para aumentar a compreensão das potenciais consequências das alternativas propostas, sendo uma ferramenta útil para a tomada de decisão estratégica de longo prazo e planejamento de curto prazo e também para as decisões operacionais (BODON et al., 2011).

Chwif e Medina (2007) propõe o desenvolvimento de um modelo de simulação conforme mostrado na Figura 2.4. Segundo os autores, a metodologia de simulação pode ser dividida em três grandes etapas:

- *Concepção ou formulação do modelo conceitual*: deve-se entender claramente o sistema a ser simulado e seus objetivos. O modelo abstrato (que está na mente do analista de simulação) deve ser representado de acordo com alguma técnica de representação, a fim de torná-lo um modelo conceitual, entendível a outras pessoas. Esse modelo, depois de concluído, deve ser devidamente validado por especialistas.
- *Implementação do modelo*: o modelo conceitual é convertido no modelo computacional, fazendo-se uso de algum *software* de simulação. O modelo computacional implementado deve ser comparado ao modelo conceitual, para que sua adequação àquele modelo possa ser verificada.
- *Análise dos resultados do modelo*: esta última etapa compreende as experimentações que serão realizadas para se obter um melhor entendimento do sistema real ou para encontrar soluções para os questionamentos existentes. São experimentados diversos cenários através da alteração das variáveis de entrada do modelo, e, após, analisam-se os resultados gerados e obtêm-se as conclusões. Caso necessário, o modelo pode ser modificado e o ciclo é novamente reiniciado.

De acordo com Law (2007), os modelos de simulação podem ser classificados mediante três dimensões:

- *Estáticos ou dinâmicos*: os modelos estáticos são aqueles que representam o estado de um sistema em um determinado momento ou não contemplam a variável tempo em suas formulações, ao passo que os modelos dinâmicos representam as variações de estado do sistema ao longo do tempo de simulação;
- *Determinísticos ou estocásticos*: os modelos determinísticos são aqueles que não utilizam nenhuma variável aleatória e geram saídas deterministas, ao passo que os modelos estocás-

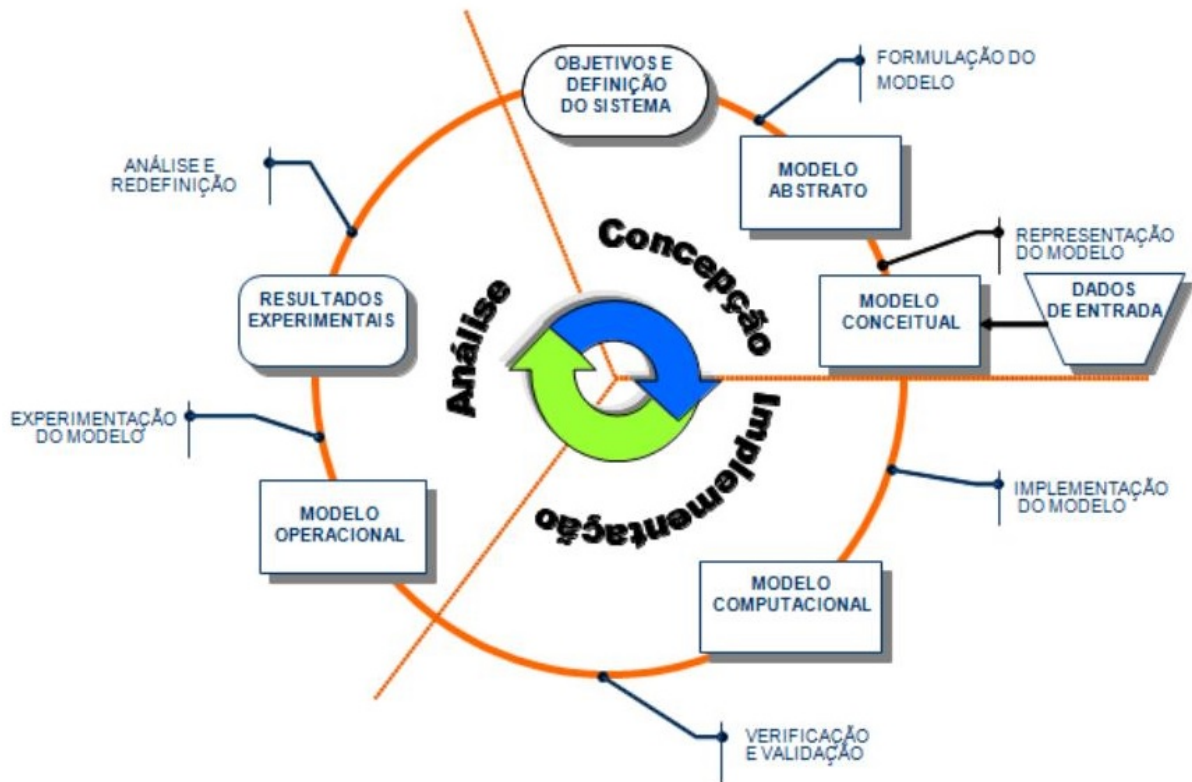


Figura 2.4: Metodologia de Simulação
 Fonte: Chwif e Medina (2007)

ticos fazem uso das distribuições de probabilidade e geram saídas que são estimativas do sistema real;

- *Discretos ou contínuos*: nos modelos discretos o avanço do tempo de simulação se dá mediante incremento de um delta específico de tempo ou baseado na ocorrência de um evento; já nos modelos contínuos o avanço do tempo de simulação é constante, o que permite determinar os valores das variáveis de estado do sistema a qualquer instante.

Para o entendimento e análise do modelo, Banks et al. (2005) definem alguns termos. São eles:

- *Entidade*: é um objeto de interesse no sistema.
- *Atributo*: é uma propriedade particular de uma entidade, ou seja, uma característica própria que o define.
- *Atividade (ou processo)*: operações executadas pelas entidades que consomem um período de tempo predeterminado.

Pode-se ainda acrescentar outros termos relevantes, tais como:

- *Recurso*: é um objeto que não se move dentro do sistema e é utilizado para realização de alguma atividade específica.
- *Evento*: é um acontecimento, programado ou não, que quando ocorre provoca uma mudança no estado do sistema.
- *Fila*: acúmulo de entidades gerado por alguma limitação na capacidade de um recurso do sistema.

Bodon et al. (2011) afirmam que o tempo de processamento de uma atividade pode ser de natureza aleatória. Neste caso, métodos estocásticos são utilizados para gerar durações induzidas aleatoriamente. Essa combinação de eventos lógicos e aleatórios é projetada para refletir o ambiente operacional mais provável.

2.2.2 Uso da simulação em ferrovias e portos

O caráter altamente dinâmico do ambiente de ferrovias e portos, com alterações frequentes no ambiente de decisão e a incerteza com relação aos horários de chegada e envio de produtos dificultam sua modelagem analítica. Além disso, o envolvimento de múltiplos agentes e a existência de diversos produtos, equipamentos, origens e destinos aumentam ainda mais sua complexidade. Desta forma, Fanti et al. (2015) destacam que a simulação é considerada o método padrão para avaliação do desempenho de sistemas logísticos devido à sua capacidade inerente de lidar com a complexidade e a aleatoriedade das operações de logística.

Chwif e Medina (2007) também destacam que o modelo de simulação consegue capturar com fidelidade as características dinâmicas (que muda o seu estado ao longo do tempo) e aleatórias (que é regida por variáveis aleatórias) dos sistemas reais, replicando em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às condições especificadas. Nesse sentido, a simulação aparece como uma ferramenta adequada para contornar as dificuldades e captar a variabilidade e incerteza intrínsecas no sistema real de ferrovias e portos.

De acordo com Fanti et al. (2015), os sistemas logísticos considerados podem ser modelados com sucesso como Sistemas de Eventos Discretos (SEDs), cuja dinâmica depende da interação de eventos discretos, tais como: demandas, partidas e chegadas de meios de transporte em terminais e aquisições e lançamentos de recursos por veículos. Ainda segundo os autores, a simulação é usada como uma espécie de observador, que permite determinar o desempenho dos sistemas e

avaliar como um conjunto de parâmetros selecionados pode melhorar os índices de desempenho considerados.

Do ponto de vista das ferrovias, a simulação ferroviária também provou ter benefícios significativos para os países e empresas, pois é uma maneira rápida e econômica para testar vários cenários e apoiar processos de tomada de decisão, sem ter que fazer grandes investimentos estruturais (FIORONI et al., 2013).

Ainda segundo o autor, muitos aspectos do transporte ferroviário tem utilizado a ferramenta da simulação, tais como operações de pátio e terminais ferroviários e a movimentação de trens de carga e de passageiros ao longo da rede. Em linhas singelas, muito utilizadas devido às grandes distâncias e alto custo das linhas férreas, o desafio da simulação é o mesmo do sistema real: evitar colisões, bloqueios e atrasos, respeitando as regras de trânsito.

Azadeh, Ghaderi e Izadbakhsh (2008) ressaltam que a abordagem da simulação é a única ferramenta ideal para resolver as prioridades do complicado problema de agendamento de trens de carga e de passageiros. A vantagem da metodologia de simulação computacional é que ela fornece soluções viáveis dentro de um curto período de tempo e que pode ser usada para preparar, corrigir e modificar a programação periódica para a circulação de comboios.

Na literatura, é possível encontrar diversos estudos que utilizam a ferramenta da simulação em ferrovias. A etapa inicial destes trabalhos consiste em desenvolver modelos que representem bem a realidade do sistema, contemplando suas características principais, para posteriormente realizar diversas análises de cenário para auxílio à tomada de decisão. A seguir, serão apresentados alguns estudos de simulação em ferrovias disponíveis na literatura.

Faria (2016) propôs em seu trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação a eventos discretos, que possui como objeto de estudo a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), uma cadeia logística de minério de ferro que opera em circuito fechado. O modelo de simulação desenvolvido tem o objetivo de realizar análises distintas nas três esferas de planejamento: no nível estratégico, permite definir a quantidade ideal de vagões na malha para realizar o volume projetado no longo prazo e o incremento da capacidade ferroviária com a inserção dos projetos de investimento em vias singelas e duplicadas; no nível tático, visa definir as capacidades ferroviárias trecho a trecho via simulação dinâmica; e, no nível operacional, permite definir as melhores estratégias de manutenção programada de via permanente que causam menor impacto em algumas variáveis como, o *transit time* e a capacidade ferroviária. O modelo de simulação desenvolvido é capaz de avaliar de forma integrada o transporte de minério de ferro, de carga

geral e de passageiros na cadeia logística. Os resultados obtidos pela ferramenta de simulação desenvolvida foram satisfatórios e se adequaram ao sistema real.

Fioroni et al. (2013) realizaram um estudo de simulação ferroviária em uma linha férrea simples. A ferrovia possui 150 km de extensão e realiza o transporte de carvão de Cerrejón, na Colômbia, da mina ao porto. O modelo visa simular o comportamento da ferrovia, que possui trens permanentes, movendo-se em um ciclo fechado e respeitando as regras de infraestrutura e de tráfego. Para a construção do modelo de simulação, utilizou-se uma abordagem orientada por sinal. Nesta abordagem, o trem só conhece o seu destino e o caminho a ser percorrido. Ao longo do trajeto, o mesmo deve respeitar os sinais: verde - avanço na velocidade máxima, amarelo - avanço em baixa velocidade (trem em movimento em frente) e vermelho - parada total (trem parado na próxima seção). Estes sinais são responsáveis por evitar conflitos e colisões na linha. O modelo de simulação foi validado utilizando-se dados históricos da empresa. De posse do modelo validado, a empresa utilizou o mesmo para determinar alguns gargalos do sistema e também os investimentos necessários para expandir sua capacidade de operação de 32 Mtpa para 40 Mtpa. Foram avaliados vários cenários, com diferentes números de vagões, número de composições e alternativas para aumentar a taxa de descarga de trem.

Em um trabalho semelhante, Fioroni et al. (2005) desenvolveram um estudo de simulação com o objetivo de avaliar o impacto das mudanças de infraestrutura das linhas ferroviárias ou dos terminais de carga/descarga em toda a rede ferroviária da MRS Logística no Brasil. A rede é formada por segmentos de linha individuais bidirecionais e pátios de cruzamento com pequenos segmentos de linhas duplas. Foram considerados vários tipos de comboios (trens de carvão, carga geral, expresso) e terminais de carga/descarga. Buscou-se simular a rede ferroviária com elevado nível de detalhe, capaz de representar todos os aspectos do comportamento da rede. Foram experimentados vários cenários de planos de investimentos futuros, visando proporcionar decisões seguras para a MRS.

Do ponto de vista dos portos, Fioroni et al. (2010) destacam que o projeto portuário é uma das aplicações mais favoráveis aos estudos de simulação, pois envolve equipamentos caros, movimentação de cargas em grande escala e muitas pesadas para os atrasos. Além disso, o uso eficiente dos portos é fundamental para os países, uma vez que esta é, geralmente, a estrutura de maior importância para escoar a produção voltada para exportação.

Devido à complexidade inerente à um terminal portuário, Caballini e Sacone (2015) definem o porto como um sistema composto de subsistemas. Dentre esses subsistemas, as autoras realiza-

ram um estudo específico no ciclo ferroviário de um porto na Itália, que compreende as atividades de importação e exportação de produtos provenientes de três terminais de contêineres. Cada um dos subsistemas em si é um sistema complexo que pode operar independentemente de maneira parcial, pois suas propriedades e dinâmica afetam todo o desempenho do porto. O estudo das autoras adotou a abordagem de simulação Dinâmica de Sistemas (SD), que é mais raramente utilizada que a tradicional simulação de Eventos Discretos. A simulação utilizou dados reais disponíveis. Com o objetivo de apontar os gargalos físicos e obter informações desses terminais, foram simulados e analisados quatro cenários, que buscaram: avaliar o potencial máximo dos terminais com os recursos reais (móveis e infraestrutura); avaliar o desempenho do sistema através da variação do número de recursos disponíveis por terminal, tanto em termos de equipamentos móveis (guindastes ferroviários, reboques ou *reach stackers*) quanto de recursos de infraestrutura (número de linhas nos pátios ferroviários); avaliar a melhoria da eficiência das operações ferroviárias de manobra, através da eletrificação das linhas; e avaliar a possibilidade de dispor de um porto seco para um dos terminais de contêineres analisados.

Fioroni et al. (2010) também desenvolveram um estudo de simulação de portos de minérios em fase de concepção e construção, chamado Porto do Açu, pertencente à Anglo American. Este porto seria construído para receber grandes navios de diferentes capacidades e tipos de produtos. Neste sistema, buscava-se um equilíbrio entre as chegadas de produtos e de navios, afim de se evitar espera dos navios e consequentes multas de atraso. A simulação de um porto de movimentação de minério é muito diferente de outros tipos de portos em que cargas discretas, como contêineres, são recebidos, armazenados e carregados. O modelo busca representar as regras e detalhes operacionais do porto que possuem impacto significativo sobre os indicadores globais que são o objeto principal da simulação. São consideradas também as restrições de navegação para chegada dos navios envolvendo clima, a ocupação de canais e variações de marés. O foco do modelo é permitir a correta avaliação dos principais indicadores da simulação: impacto de atender aos requisitos do mix de produtos no prazo de entrega e o nível de atendimento aos horários de chegada do navio. Os autores experimentaram vários cenários e o modelo mostrou a produção e a expedição (navios carregados) para cada um dos mesmos.

2.2.3 Uso da simulação para análise de sistemas logísticos integrados

Há também na literatura alguns estudos que envolvem a simulação de um sistema logístico intermodal, englobando diversos modais diferentes. Fanti et al. (2015) desenvolveram um estudo

de simulação da logística de grãos no Brasil das regiões produtoras até o porto, envolvendo o transporte multimodal e o armazenamento de produtos. O estudo buscou auxiliar o processo de tomada de decisão da Multigrain, empresa de comércio internacional de *commodities*. Foi feito um estudo de localização de 57 armazéns, responsáveis por armazenar a produção de 78 fazendas, dispersas geograficamente em todo o país. O sistema possuía também 14 terminais intermodais e 10 portos. O sistema logístico inicia com o transporte do produto das fazendas até o armazém mais próximo, realizado por caminhões pertencentes aos agricultores. Logo após, utilizava-se também o modal rodoviário para realizar o transporte dos armazéns até o terminal intermodal. Desta vez, o escoamento era de responsabilidade da Multigrain, sendo feito por caminhões próprios ou de terceiros. Os terminais intermodais eram responsáveis por receber a produção de caminhões e carregá-la em barcos ou trens. Os portos possuíam uma capacidade limitada de armazenamento e infraestrutura de descarga para lidar com trens, barcos e caminhões. Além disso, eles possuem recursos de carregamento para carregar os navios. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo de simulação. Posteriormente, os autores criaram diversos cenários de simulação com base em estimativas determinísticas, fornecendo dados para armazéns, capacidades e demandas esperadas dos terminais e o tamanho da frota responsável para o escoamento dos produtos entre os terminais. Por fim, simulou-se estes cenários e avaliou-se a melhor opção de infraestrutura logística para atender a demanda prevista nos portos.

Vale destacar que o estudo acima aborda um caso particular do sistema logístico abordado nesta dissertação. Contudo, o mesmo utilizou apenas a ferramenta da simulação, sem nenhum recurso de otimização. Como ressaltado por Jing-Jing e Ke-Ping (2013), a abordagem de análise de simulação pode evitar cair em dificuldades de representação da variabilidade e incerteza do sistema real, mas não permite obter uma solução exata para o problema. Assim sendo, pode-se dizer que o estudo de Fanti et al. (2015) avaliaram apenas os cenários criados, não sendo possível afirmar que estes cenários são os melhores. Os próprios autores enfatizaram o esforço considerável necessário ao usuário para a criação de um cenário viável ou bom.

A representação de um processo otimizado em um modelo é um obstáculo real para o construtor, pois as ferramentas de simulação de eventos discretos não são projetadas para resolver problemas complexos de otimização de uma maneira rápida e fácil. Desta forma, pode-se utilizar o modelo de simulação associado a um modelo de otimização para resolver este tipo de problema (MERSCHMANN, 2002). Essa técnica será abordada na subseção 2.3.

2.3 Otimização via Simulação

2.3.1 Conceitos

Chwif e Medina (2007) afirmam que a simulação computacional possui diversas vantagens, mas ainda possui algumas limitações, visto que a simulação é uma ferramenta do tipo *What-if questions*, ou seja, responde a perguntas do tipo “O que ocorre se?”, sendo portanto uma ferramenta avaliadora de soluções e não, geradora de soluções. Logo, utiliza-se as técnicas de otimização na simulação computacional para minimizar as desvantagens do método.

Fu (2002) destaca que os procedimentos de otimização mais comumente usados - de programação linear, programação não-linear e de programação inteira (mista) exigem uma formulação matemática explícita. Contudo, o autor afirma que tal formulação é geralmente impossível para problemas onde a simulação é relevante. Desta forma, a otimização via simulação deve ser aplicada quando uma ou mais restrições e/ou função objetivo do modelo de otimização só podem ser avaliadas via simulação.

Bodon et al. (2011) afirmam que o modelo de otimização é ideal para analisar os processos complexos de tomada de decisão, onde têm-se um ou mais objetivos geralmente conflitantes e sujeitos à restrições, como a capacidade do sistema, limitações operacionais e de tempo. Para os autores, uma das características mais poderosas desse modelo é a sua capacidade de considerar centenas de milhares de possibilidades e determinar a decisão ótima em um período muito curto de tempo.

De acordo com Camargo e Cunha (2012), os modelos de otimização via simulação "caracterizam-se por ter em sua composição elementos básicos de modelos de otimização, como uma função objetivo a ser maximizada/minimizada, e elementos de problemas de simulação, como a existência de variáveis estocásticas". Os autores ressaltam ainda que a combinação entre os modelos de otimização e simulação em uma única ferramenta pode ser feita de diversas formas, o que limita a definição de um modelo de otimização via simulação apenas ao fato de que são utilizados elementos de ambos os tipos de modelo.

Segundo Bodon et al. (2011), o componente otimização pode ser integrado a um modelo de simulação de eventos discretos para a modelagem de uma cadeia logística complexa voltada para a exportação, permitindo um modelo abrangente do sistema a ser desenvolvido. Os autores citam algumas vantagens para o uso desta técnica na modelagem:

- Automatização do processo de geração dos cenários e realização dos mesmos na simulação;

- Redução da necessidade de intervenção humana e auxílio no processo de captação e retenção de conhecimento.
- Capacidade de modificar e testar as estratégias de planejamento alternativas de maneira isolada e fácil.
- Capacidade de avaliar vários critérios, como a qualidade do produto e o tamanho dos estoques, bem como para explorar o efeito de mudança da prioridade de cada um dos objetivos.

Entretanto, a utilização da otimização em sistemas complexos exigem grande atenção. Chwif e Medina (2007) destacam que ao se introduzir aspectos dinâmicos e muitas variáveis, o modelo de otimização fica difícil de ser construído, podendo se tornar extremamente complicado. Por outro lado, ao elaborar um modelo de otimização muito simples, este pode não representar adequadamente todos os aspectos do problema, impedindo a resolução do mesmo. Logo, o grande desafio é como juntar simulação e otimização de modo que possa minimizar as desvantagens de cada uma das ferramentas.

Carneiro (2010) complementa ainda que a otimização via simulação adiciona uma complicação adicional, pois o desempenho dos problemas não pode ser avaliado de maneira exata, mas somente através de estimativas. Devido à isso, pode não ser possível determinar conclusivamente se uma estimativa é melhor ou não do que outra, frustrando os algoritmos de otimização que se movem em direções de melhora. O autor destaca ainda que, a princípio, pode-se eliminar essa complicação fazendo diversas replicações do modelo de simulação, objetivando reduzir a variância do estimador.

De acordo com Chwif e Medina (2007), a idéia básica utilizada para a modelagem de sistemas de otimização via simulação que possuem uma única função objetivo é a articulação de modelos de otimização e simulação distintos atuando de forma iterativa. Dada uma condição inicial X_0 , o modelo de otimização irá fornecer os valores das variáveis a serem simuladas (*inputs*) e receberá do modelo de simulação o valor da função objetivo (*outputs*). O procedimento cíclico é interrompido quando atinge-se a satisfação de um determinado critério. Como resultado final do processo, tem-se os valores ótimos ou “sub-ótimos” do modelo de simulação. A Figura 2.5 ilustra o processo descrito.

Segundo Fu (2002), a literatura dispõe de uma ampla variedade de termos utilizados ao referir-se aos *inputs* e *outputs* de um problema de otimização via simulação. *Inputs* são chamados de

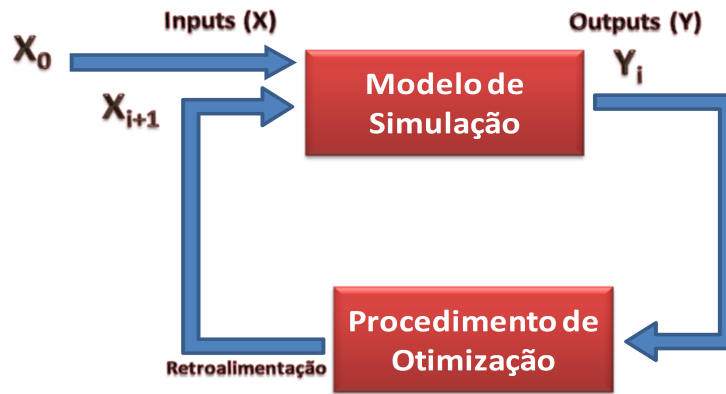


Figura 2.5: Representação da idéia base da Otimização Via Simulação
 Fonte: Chwif e Medina (2007). Adaptado pelo autor.

parâmetros, valores, variáveis, soluções, modelos, configurações ou fatores (na terminologia do *design* de experimentos). *Outputs* são chamados geralmente de medidas de desempenho, critérios, ou respostas (na terminologia do *design* de experimentos).

Nesse tipo de abordagem, o modelo de simulação cria a superfície de resposta (esperada) para diversas configurações de parâmetros de entrada e essa superfície de resposta pode ser considerada como a função objetivo do modelo. Enquanto isso, o modelo de otimização é responsável pela busca do melhor conjunto de parâmetros de acordo com essa determinada superfície de resposta. De acordo com Fu (2002), o objetivo da metodologia de superfície de resposta (RSM) é obter uma relação funcional aproximada entre as variáveis de entrada e a função objetivo de saída (resposta), que é expressa na equação:

$$\min_{\theta \in \Theta} J(\theta) = E[L(\theta, \omega)] \quad (2.1)$$

onde $\theta \in \Theta$ representa o vetor de *inputs*, $J(\theta)$ é a função objetivo, ω é a replicação de simulação, $L(\theta, \omega)$ é a medida de desempenho da amostra e $E[L(\theta, \omega)]$ é o valor esperado da medida de desempenho. De acordo com Carneiro (2010), os problemas para os quais é necessário aplicar alguma técnica de otimização via simulação são problemas complexos o suficiente para que a função objetivo $J(\theta)$ não possa ser avaliada de forma exata, isto é, através de solução analítica.

Diante do destaque desta metodologia no ambiente de simulação, a maioria dos pacotes de *software* de simulação de eventos discretos possuem atualmente alguma rotina de otimização, ao invés de uma estimativa estatística pura (FU, 2002). Como exemplos, têm-se o otimizador OptQuest, acoplado aos *softwares* Anylogic, Arena, CSIM 19, FlexSim, Simul8, dentre outros;

o otimizador SimRunner, acoplado ao *software* de simulação ProModel; o otimizador RiskOptimizer, acoplado ao *software* @Risk; e o otimizador AutoStat, acoplado ao *software* de simulação Automod.

Para Fu (2002), o objetivo dessas rotinas de otimização é buscar definições melhoradas de parâmetros do sistema selecionado pelo usuário em relação à(s) medida(s) de desempenho(s) de interesse. Contudo, embora essas rotinas possam ser inteligentes na execução de procedimentos de busca, elas são um pouco alheias à natureza estocástica do sistema subjacente. Além disso, elas não conseguem explorar a busca na otimização de simulação e o usuário não tem nenhuma maneira de saber se um ótimo realmente foi atingido (FU, 2002). Acrescente-se à isso, o fato de que os procedimentos heurísticos adotados, por serem genéricos, não conseguem utilizar as características intrínsecas de cada sistema para melhorar o desempenho de suas buscas.

Existem procedimentos de otimização que têm potencial para melhorar drasticamente a eficiência da metodologia. Chwif e Medina (2007) exemplificam outras técnicas de otimização que podem ser utilizadas. Se a função objetivo e as restrições são constituídas por combinações lineares das variáveis, o problema de otimização pode ser resolvido por meio da programação linear. Caso a formulação tenha variáveis inteiras, podem ser aplicadas técnicas derivadas de busca em árvore (*Branch and Bound*, *Beam Search*, etc). Por fim, se a formulação for não-linear, podem ser aplicadas técnicas de busca heurísticas, que por não garantirem o ótimo, são chamadas de técnicas “sub-otimizantes”. Como exemplo de técnicas de busca, ou metaheurísticas, pode-se citar o *Genetic Algorithm*, o *Simulated Annealing* e o *Tabu Search*. O uso de técnicas heurísticas para a geração das configurações candidatas também é destacado por Fu (2002).

A seguir são apresentados alguns trabalhos disponíveis na literatura relacionados ao escopo deste trabalho, que utilizam a técnica de otimização via simulação em sistemas logísticos.

2.3.2 Uso conjunto de otimização e simulação aplicados em sistemas logísticos

Na literatura é possível encontrar diversos estudos que fazem uso da otimização e da simulação de maneira conjunta para a solução de problemas logísticos em ambientes de mineração e complexos portuários. Como exemplo, têm-se os estudos de Fioroni et al. (2008) e Merschmann (2002), que tratam de planejamento de lavra e alocação e despacho de caminhões de mina.

O estudo de Merschmann (2002) mostrou uma associação entre modelos de otimização e simulação, onde a solução proposta pelo modelo de otimização era posteriormente avaliada através de um modelo de simulação, para observar como o sistema se comportava dinamicamente na

presença de variáveis aleatórias.

No estudo de Fioroni et al. (2008), uma outra forma de uso conjunto de simulação e otimização é utilizada. Neste estudo, o modelo de simulação do transporte de minério em minas a céu aberto chama um modelo de otimização para auxiliar na tomada de decisão que trata da seleção do próximo destino dos caminhões, após a descarga de uma viagem.

Contudo, o desenvolvimento de modelos que possuem a utilização simultânea da otimização e da simulação tem sido comumente realizados em ambientes que consideram o sistema logístico ao longo da cadeia, ou seja, dizem respeito às movimentações entre a mina (ou ambiente de produção) e o porto.

Segundo Fioroni et al. (2013), estudos de transporte de passageiros normalmente se concentram em pontualidade (agendamento de horários), enquanto estudos de transporte ferroviário de carga geralmente se concentram em problemas de capacidade.

O agendamento de horários de trens em uma rede ferroviária possui como objetivo principal a minimização do tempo total de viagem. Esses modelos determinam os horários de chegada e saída dos trens de/para cada estação e buscam satisfazer um conjunto de restrições operacionais típicas de um sistema real, tais como paradas periódicas para manutenção da via férrea, conflitos entre trens e utilização eficaz dos recursos. Na literatura, existem alguns estudos que consideram a aplicação da ferramenta de otimização via simulação em problemas de agendamento. A seguir, são apresentados alguns deles.

Sajedinejad et al. (2011) realizaram um estudo em uma rede ferroviária iraniana, composta em sua maioria por linha singela. Os autores desenvolveram um *software*, chamado SIMARAIL, que é composto por quatro módulos integrados que trabalham de maneira simultânea. O núcleo principal é um sistema de simulação de eventos discretos. O módulo de simulação simula os movimentos dos comboios na rede ferroviária e ajuda a gerir eficazmente os diferentes tipos de restrições de capacidade e as regras completas de sistemas ferroviários. A rotina de otimização, baseada no algoritmo genético (AG), tem o objetivo de minimizar o tempo de viagem de todos os comboios na rede ferroviária e também encontrar a melhor estação para o abastecimento, sujeito a algumas restrições do sistema.

Bahramian e Bagheri (2015) também abordaram o mesmo problema, considerando uma rede ferroviária de pista única para trem de passageiros. Foram propostos dois métodos de otimização via simulação. Ambos os métodos utilizam um modelo de simulação de autômatos celulares (CA) para modelar o fluxo de tráfego de trens e avaliar a aptidão de cada solução, ou seja, o tempo total

de atraso gerado durante a otimização. O primeiro método proposto integra esse modelo com um método de otimização, que utiliza algoritmo genético. Na segunda abordagem proposta, o modelo de simulação é combinado com o método de otimização de busca dinâmica dimensionada (DDS). Os modelos propostos foram aplicados a um estudo de caso hipotético e os resultados revelaram que o método AG é mais eficiente do que o DDS.

Nesse mesmo contexto, Azadeh, Ghaderi e Izadbakhsh (2008) desenvolveram um modelo integrado que utilizou a análise da envoltória de dados (DEA), o processo analítico de hierarquia (AHP) e simulação computacional. A metodologia proposta considera simultaneamente objetivos quantitativos e qualitativos para a avaliação da eficiência e otimização de desempenho. Inicialmente, a simulação é usada para modelar, verificar e validar o sistema em estudo. O modelo considera as limitações de tempo, prioridades da fila e limitação das linhas como características do sistema ferroviário. Logo após, a metodologia AHP é utilizada para quantificar dados qualitativos, determinando o peso de quaisquer critérios qualitativos (de entrada ou saídas). Por fim, o modelo DEA, que é baseado em um modelo de programação linear (LP), é utilizado para resolver o modelo multiobjetivo e identificar a alternativa ótima. A eficácia do método também foi comprovada através de um estudo de caso.

O estudo de Jing-Jing e Ke-Ping (2013) tem como objetivo adicional ao atendimento de horários a redução do consumo de energia durante a circulação do comboio. Para isso, os autores buscaram a otimização da curva de velocidade de circulação do trem. Foi feito um estudo nas três fases da circulação: aceleração, deslocamento a velocidade constante, e desaceleração (frenagem). O modelo de simulação capturou algumas das principais características da circulação do comboio e os resultados indicaram a eficiência do modelo proposto.

Do ponto de vista da utilização da otimização via simulação para a análise de capacidade dos sistemas logísticos, com enfoque no auxílio à tomada de decisões estratégicas, a literatura também apresenta alguns estudos relevantes. A seguir serão apresentados os trabalhos de Bodon et al. (2011), Fanti et al. (2015) e Camargo e Cunha (2012).

Bodon et al. (2011) desenvolveram um método para a modelagem de uma cadeia de fornecimento de exportação de carvão, usando uma combinação de otimização e técnicas de simulação de eventos discretos. O principal objetivo do modelo integrado desenvolvido é avaliar as consequências de decisões estratégicas, táticas e operacionais. O modelo de otimização é formulado como um programa linear cujo objetivo principal é maximizar a taxa de transferência de carvão alcançado pelo sistema no curto e médio prazo. As restrições são incluídas para limitar a capa-

cidade de cada item de equipamento em qualquer período de tempo, para controlar a mistura de estoques intermediários, e em alguns casos, a execução de uma ordem de precedência ou sequência em certas atividades ou eventos. Foram consideradas algumas hipóteses simplificadoras devido à complexidade do sistema a ser modelado. O modelo de simulação de eventos discretos considera o desempenho do sistema durante um período de um ano, usando como entradas o plano de mina e o plano de transporte desenvolvido para o ano referente. O modelo de otimização é usado para determinar uma sequência de tarefas para entregar o carvão necessário para os navios à espera em uma base de tempo mais frequente, quinzenal. O método é iniciado através da execução do modelo de otimização para produzir um plano inicial de movimentos de minério para a primeira quinzena do ano. O modelo de simulação, em seguida, tenta realizar estas tarefas tão próximo quanto possível do plano, sujeitos a eventos aleatórios e variabilidade. Quando a simulação progrediu ao final do período de planejamento, o controle é passado de volta para o modelo de otimização com um conjunto atualizado de insumos para o próximo horizonte de planejamento. O processo descrito é então repetido até o final do período de tempo de simulação. O modelo foi implementado para analisar a cadeia de abastecimento de exportação de *PT Kaltim Prima Coal* (KPC), que opera uma mina de carvão em East Kalimantan, na Indonésia.

Fanti et al. (2015) desenvolveram um Sistema de Apoio à Decisão (*Decision Support System* - DSS) cujo objetivo é auxiliar no processo de tomada de decisão tática e operacional em um sistema logístico entre um porto e um porto seco. O DSS é constituído de quatro componentes: dados, modelo, decisão e interface. O componente modelo é o núcleo do DSS, que inclui um modelo de simulação de eventos discretos e um conjunto de algoritmos de otimização adequados para analisar o efeito das escolhas sobre o desempenho do sistema. A otimização combina uma variante da metaheurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) com um esquema de *Optimal Computing Budget Allocation* (OCBA) no intuito de alocar otimamente o número de repetições de simulação que atinge as melhores performances do sistema. Assim, o módulo de simulação estima os indicadores de desempenho e fornece ao módulo de otimização os resultados. Com base nos resultados, o módulo de otimização pode desencadear outras simulações com novos valores para as variáveis de decisão, a fim de otimizar as performances escolhidas. Um protótipo do DSS foi aplicado no sistema formado pelo porto de Trieste e pelo porto seco de Ferneti, no norte da Itália. Foram apresentados dois casos de uso diferentes: o primeiro considera decisões no nível tático (escolher o melhor tamanho das áreas de estacionamento, a fim de maximizar o rendimento do sistema) e o segundo no plano operacional (escolher o melhor número de operadores envolvidos

no processo, a fim de minimizar a equipe). Os resultados auxiliaram os usuários na tomada de decisões e permitiram melhorar o desempenho do sistema, através da redução dos tempos de espera nas zonas portuárias e de porto seco e da reorganização do fluxo de trabalho, ao utilizar adequadamente os recursos humanos.

O trabalho de Camargo e Cunha (2012) estuda um sistema logístico intermodal, composto por duas ferrovias distintas (Ferrovia Centro-Atlântica e Estrada de Ferro Vitória a Minas), múltiplas origens, múltiplos produtos e destino ao Porto de Tubarão. De todos os trabalhos encontrados na literatura, este é o estudo que apresenta o sistema logístico de maior semelhança ao sistema a ser estudado nesta dissertação. Apesar dessa semelhança, o estudo de Camargo e Cunha (2012) não focou no dimensionamento da capacidade da infraestrutura, e sim na análise da eficiência de políticas operacionais, de forma a maximizar o desempenho de um sistema ferroviário de transporte de grãos em circuito fechado. Inicialmente, foi construído um modelo de simulação de eventos discretos convencional, que representasse adequadamente o sistema real. Posteriormente, as regras estocásticas do modelo de simulação (alocação de ativos ferroviários e gestão de filas) foram substituídas por regras de priorização, as quais podem ser interpretadas como estratégias operacionais. Essas decisões envolvem todo o sistema logístico, desde o transporte por caminhão a partir das regiões produtoras, passando pelo transporte ferroviário, até a transferência para os navios que atracam no porto. Por fim, desenvolveu-se uma heurística baseada no algoritmo de Hooke & Jeeves para determinar o melhor subconjunto de regras de priorização. O modelo foi implementado diretamente na linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA). Os resultados obtidos mostraram que as regras de priorização foram substitutas adequadas às regras comumente utilizadas em modelos de simulação estocásticos e baseados em sorteios aleatórios.

Capítulo 3

Definição do Problema

Este capítulo tem como objetivo descrever o problema em estudo, que possui uma abordagem genérica, isto é, pode ser aplicado em diferentes contextos por empresas mineradoras, de siderurgia e de exportação de grãos agrícolas, que fazem uso de logística ferroviária e outros modais de transporte.

Na seção 3.1 será apresentado o sistema logístico em estudo, destacando suas principais características. Posteriormente, na seção 3.2, serão definidos os principais pontos a serem estudados dentro deste sistema logístico.

3.1 Sistema logístico multimodal para escoamento de *commodities*

Em diversas atividades como mineração, siderurgia e indústria agrícola, os pontos de produção e consumo e/ou exportação dos produtos encontram-se muito afastados geograficamente. Desta forma, é necessário realizar o escoamento da produção por longas distâncias. A fim de minimizar os altos custos logísticos envolvidos neste processo, faz-se uso de um transporte intermodal.

O modal ferroviário é muito utilizado para o transporte de *commodities* até o terminal portuário, devido às suas características peculiares, como o transporte de grandes volumes de carga, a médias e longas distâncias, por um baixo custo operacional unitário (COVA; MOTTA, 2010). Vale ressaltar que muitas empresas dos diferentes ramos destacados anteriormente compartilham de uma mesma ferrovia para o transporte de seus produtos, pois estes geralmente são exportados a partir de um mesmo terminal portuário.

O problema em estudo irá considerar a situação descrita na Figura 3.1. Têm-se diversos

pontos de produção que produzem múltiplos produtos (*commodities*). Esses produtos podem pertencer a um mesmo grupo (minérios tipo A, B e C, por exemplo) ou a grupos distintos (minérios e grãos).

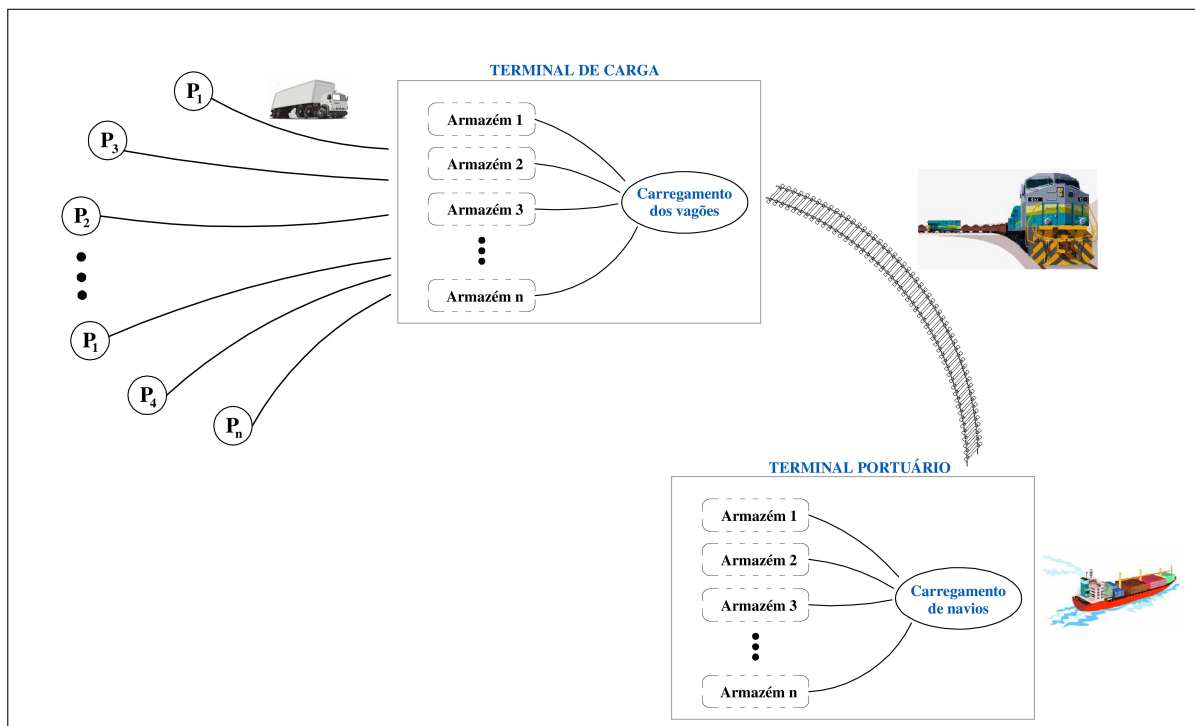


Figura 3.1: Sistema logístico estudado
Fonte: Elaborado pela Autora

O fluxo do sistema se inicia com o transporte dos produtos a partir de seus pontos de produção. Este transporte é realizado pelas empresas, individualmente. Neste trecho, o escoamento pode ser realizado pelos modais rodoviários, minerodutos, correias transportadoras, entre outros. Neste trabalho, será adotado o transporte rodoviário para este segmento, em virtude de seu uso habitual em todo território nacional.

Será considerado que o escoamento das *commodities* compartilha uma mesma ferrovia, que possui um único terminal de carga em sua origem. Desta forma, os caminhões transportam os produtos até o terminal, onde é realizada a descarga dos mesmos. Geralmente, adota-se a política FIFO (*First In First Out*) para essa atividade.

No terminal de carga, os produtos dos diversos pontos de produção permanecem estocados em armazéns, enquanto aguardam o carregamento dos vagões. Cada armazém estoca um grupo de *commodity* específica. Geralmente, os minérios são armazenados em pátios e os grãos em silos de estocagem. Os armazéns possuem capacidade limitada.

Nesse estudo, as composições ferroviárias serão consideradas exclusivas, ou seja, os vagões

carregam apenas produtos de um mesmo grupo a cada carregamento. A partir do terminal de carga, os produtos são transportados via ferrovia até o porto.

Ao final da ferrovia, têm-se o terminal portuário. Quando a composição chega até o terminal, a mesma aguarda a descarga dos vagões. Essa descarga é realizada por equipamentos de grande porte, que podem ser viradores de vagão, carregadeiras ou empilhadeiras. Cada um desses recursos realizam a descarga de um ou mais vagões por vez. Os produtos são transportados por correias transportadoras até os armazéns. De maneira análoga ao terminal de carga, produtos distintos são estocados em diferentes armazéns também com capacidades limitadas, onde aguardam a chegada dos navios para embarque. Vale ressaltar que as estruturas de carga e descarga também serão consideradas exclusivas para cada grupo de *commodity*, devido às suas especificidades.

Os navios podem ser de carga única, ou seja, transportam um único tipo de produto, ou de carga mista, que são os mais usuais e carregam produtos distintos pertencentes a um mesmo grupo de *commodity*. Nesse estudo, será considerado um sistema portuário genérico, composto por um único canal de navegação, um berço de atracação e pelos carregadores de navios (*shiploaders*). O canal de navegação e o berço de atracação é compartilhado para todos os navios que transportam diferentes grupos de *commodities*. Contudo, a estrutura de carregamento (*shiploader*) é exclusiva para cada grupo de *commodity*. A chegada dos navios é aleatória, mas sabe-se com certa antecedência as características do navio que irá chegar ao terminal portuário. Quando os mesmos chegam ao porto, eles passam por alguns processos, a saber: navegação de entrada, atracação, pré-carregamento, carregamento, pós-carregamento, desatracação e navegação de saída.

A navegação de entrada consiste na passagem do navio pelo canal de acesso ao porto, responsável pelo tráfego de navios desde à entrada do porto até as instalações portuárias. A navegação de saída diz respeito ao processo inverso à navegação de entrada. Já a atracação é a operação de fixação do navio ao berço, onde são realizadas as atividades de carregamento e descarregamento de mercadorias. A desatracação é a operação contrária à atracação. A atividade de pré-carregamento diz respeito à inspeção do estado físico do navio, realização de limpeza dos porões (caso necessário), realização de procedimentos de segurança, conferência de documentação e liberação de ordens de carregamento. A atividade de pós-carregamento trata das etapas de conferência do carregamento dos porões e da liberação da documentação fiscal.

Para que ocorra o carregamento do navio, é necessário inicialmente a disponibilidade do berço de atracação e do *shiploader*. Além disso, manter o estoque adequado dos produtos nos terminais

portuários é de suma importância, visto que o navio só sai do píer após o seu carregamento completo. Desta forma, caso haja indisponibilidade do produto no estoque, o navio permanece atracado, gerando multas, aumentando os custos e reduzindo a eficiência do transporte.

O transporte de grãos e minérios possuem diversas estruturas que são de uso exclusivo para cada grupo de *commodity*, tais como: as estruturas de carga e descarga presentes nos terminais de carga e portuário; e os *shiploaders*. Contudo, vale ressaltar que o escoamento destes produtos é interdependente, e não podem ser analisados separadamente, uma vez que os mesmos compartilham algumas estruturas, tais como: a ferrovia, o canal de navegação e o berço de atracação. Desta forma, todo o sistema de escoamento das *commodities* deve ser analisado de maneira conjunta, sendo necessário o desenvolvimento de um modelo de otimização via simulação que engloba todo o sistema logístico.

3.2 Pontos de estudo no sistema logístico abordado

O sistema logístico em estudo é bastante complexo e possui um amplo leque de análises que podem ser realizadas. Neste trabalho, será dado enfoque no dimensionamento dos armazéns e pátios presentes no terminal de carga e no terminal portuário, bem como na quantidade de composições ferroviárias e seu respectivo número de vagões, visando atender à demanda de *commodities* nos portos, isto é, a meta de exportação prevista. O sistema logístico deve ainda respeitar os limites de oferta dos produtos e de capacidade dos recursos disponibilizados.

O problema abordado nesse estudo é relativamente genérico, pois o correto dimensionamento da infraestrutura de sistemas logísticos multimodais pode ser de difícil mensuração para muitas empresas. Além disso, não encontrou-se na literatura nenhum trabalho que utiliza a ferramenta de otimização via simulação para a resolução do problema sob este enfoque, o que reforça ainda mais o interesse neste estudo. Desta forma, busca-se propor e desenvolver uma metodologia eficaz para dimensionar parte do sistema logístico com o menor custo possível.

A análise do problema logístico descrito na seção 3.1 mostra que a adoção da técnica de otimização via simulação é a ferramenta mais adequada para a sua correta modelagem e para assegurar uma representação adequada da realidade do sistema. A utilização de apenas uma das abordagens, otimização ou simulação, não seria suficiente para atender aos objetivos deste trabalho. Desenvolver um modelo de otimização capaz de representar fidedignamente o sistema seria bastante difícil e até mesmo inviável, devido à dificuldade para elaboração de um modelo

matemático que considerasse as características estocásticas do processo, como as taxas de chegada das *commodities* ao terminal de carga e as taxas de chegada dos navios ao porto. Por outro lado, um modelo de simulação puro permitiria avaliar apenas um ou alguns cenários, não sendo possível realizar uma análise global do sistema logístico. Assim, um modelo híbrido de otimização via simulação é capaz de minimizar as desvantagens de ambas as técnicas, possibilitando a representação das características estocásticas do sistema e visando minimizar os recursos logísticos utilizados, mediante uma análise global do mesmo.

A metodologia de otimização via simulação proposta por este estudo consiste no desenvolvimento de duas etapas principais: um modelo de simulação e um modelo de otimização. Esses dois modelos irão interagir entre si de forma cíclica, até a obtenção do resultado desejado, como explicado na seção 2.3.

Na primeira etapa deste estudo busca-se elaborar um modelo computacional de simulação que represente o sistema logístico multimodal, considerando: a chegada dos produtos de seus pontos de origem (produção) pelo transporte rodoviário, a descarga dos caminhões, a ocupação dos armazéns e pátios no terminal de carga, o carregamento dos vagões, o transporte ferroviário, a descarga dos vagões, a ocupação dos armazéns e pátios do terminal portuário e o despacho das cargas pelos navios.

Para isto, será adotada a metodologia proposta por Chwif e Medina (2007), descrita na seção 2.2.1. Inicialmente, será realizada a elaboração de um modelo conceitual para o problema, visando compreender suas principais características. Posteriormente, será realizada a conversão deste modelo para um modelo computacional, utilizando um *software* de simulação. Logo após, será feita a validação do modelo desenvolvido, utilizando-se dados estimados de um sistema intermodal.

Vale ressaltar que não é o foco deste estudo simular o comportamento detalhado de uma ferrovia, ou seja, não serão consideradas algumas características operacionais do tráfego ferroviário, tais como: cruzamento entre composições na malha ferroviária, intensidade do tráfego, velocidades específicas para diferentes composições, interrupção de energia, paradas para abastecimento de locomotivas, prioridades em linhas singelas, etc. De maneira análoga, este estudo também não irá detalhar o funcionamento de um porto, visto que este está sujeito a diversas interferências, tais como: condições para passagem de navios pelo canal, alta das marés para chegada e atracação de navios, priorização no uso de recursos, congestionamentos, condições meteorológicas, etc. Estudos que desenvolvem modelos de simulação com enfoque no funcionamento de ferrovias e

portos mediante as interferências destacadas são apresentados no capítulo anterior, na subseção 2.2.2.

O enfoque deste trabalho é mostrar como uma metodologia de otimização via simulação pode ser útil e eficiente para dimensionar alguns recursos logísticos de infraestrutura do sistema intermodal, que dizem respeito à capacidade dos armazéns e pátios presentes no terminal de carga e no terminal portuário, bem como o dimensionamento dos veículos de transporte ferroviário (composições e seu respectivo número de vagões) visando atender a demanda de exportação a um menor custo possível.

De posse dos dados de saída do modelo de simulação, a próxima etapa deste trabalho é propor e implementar um modelo de otimização que seja capaz de representar os recursos logísticos e proceder com a minimização dos custos. Esse modelo de otimização irá procurar e fornecer o melhor conjunto de parâmetros de entrada para o modelo de simulação, sendo elas:

- CAP_CARG_k : capacidade do armazém do terminal de carga para o grupo de *commodity* (k);
- CAP_PORT_k : capacidade do armazém do terminal portuário para o grupo de *commodity* (k);
- r : tipo de composição baseado no seu número de vagões (cada tipo de composição r tem um número específico de vagões de idêntica capacidade);
- $NCOMP_r$: número de composições do tipo (r).

A técnica de otimização via simulação irá analisar diversos cenários e fornecer como solução aquele que possuir o dimensionamento de menor custo para o sistema logístico, respeitando as capacidades mínimas e máximas dos recursos disponibilizados no sistema e atendendo às demais restrições impostas ao modelo.

Além da proposição e aplicação da técnica de otimização via simulação, será realizada uma análise de sensibilidade, que constitui a última etapa deste trabalho. Por meio da análise de sensibilidade, será possível mostrar o reflexo do dimensionamento dos recursos na capacidade de exportação do sistema, ao se relacionar alguns parâmetros, a saber: tipo e número de composições *versus* capacidade de exportação do sistema; e tipo e número de composições *versus* velocidade de escoamento. Essas relações podem fornecer algumas considerações importantes acerca do sistema logístico estudado.

Capítulo 4

Modelo Conceitual

Neste capítulo, busca-se desenvolver a primeira etapa da metodologia proposta por Chwif e Medina (2007) para o estudo de simulação, que é a fase de concepção. De acordo com Robinson (2006), Remiel, Cauvin e Ferrarini (2014) e Law (1991), a etapa de criação do modelo conceitual é uma das etapas mais importantes de um projeto de simulação. Além de sua importância, Law (1991) destaca que esta é também a fase mais difícil e menos compreendida no processo de modelagem. Somente recentemente a modelagem conceitual ganhou popularidade na literatura da simulação de eventos discretos (FURIAN et al., 2015).

Liu et al. (2011) afirmam que o modelo conceitual tem como objetivo organizar as necessidades do usuário como um modelo formal para a compreensão do sistema exigido, sendo um dispositivo de comunicação entre o desenvolvedor e usuário. Além disso, ele permite guiar a etapa de coleta de dados, já que irá definir os pontos de coleta dos mesmos; além de facilitar a modelagem computacional, pois apresenta os elementos necessários para esta etapa e independe da plataforma a ser utilizada (MONTEVECHI et al., 2010). Robinson (2008) acrescenta ainda que a modelagem conceitual auxilia na verificação e validação do projeto, pois pode ser usado para registrar a lógica do modelo.

Furian et al. (2015) afirmam que o modelo conceitual representa a mais alta camada de abstração, pois é formulado na mente do modelador. Dessa forma, o autor define a modelagem conceitual como uma representação simplificada do sistema real, incluindo características estruturais e comportamentais.

Já Robinson (2008) define que o modelo conceitual é "uma descrição específica não-*software* do modelo computacional de simulação (que será, é, ou tem sido desenvolvido), descrevendo os objetivos, *inputs*, *outputs*, o conteúdo, pressupostos e simplificações do modelo".

Furian et al. (2015) afirmam que os *outputs* podem ser usados para determinar se os objetivos foram atingidos e, caso contrário, por que não. Os *inputs* representam os dados do modelo, que podem ser alterados a fim de atingir os objetivos da modelagem. Ainda segundo o autor, a parte mais importante do modelo conceitual é a determinação do alcance e nível de detalhe do modelo, que pode estar baseado em quatro tipos de componentes: entidades; atividades; filas; e recursos.

De acordo com Robinson (2008), uma variedade de métodos têm sido propostos para representar os modelos conceituais de simulação, tais como: diagramas de fluxo de processo, diagramas de ciclo de atividade, redes de Petri, gráficos de eventos e tabelas que descrevem os fundamentos e conteúdo do modelo.

Robinson (2006) enfatiza ainda que um modelo conceitual bem concebido aumenta significativamente a probabilidade de um resultado positivo para um estudo de simulação. O modelo conceitual é iniciado na fase inicial do projeto de simulação, mas é repetido de forma iterativa juntamente com o modelo computacional, que é revisado continuamente ao longo de um estudo.

Neste capítulo, inicialmente, serão descritos quais são os objetivos da simulação, ou seja, será apresentado o que se espera atingir, o nível de desempenho esperado e as restrições existentes. Posteriormente, serão definidas as especificações do modelo, que compreendem os dados de entrada e de saída. Nesta fase, busca-se também determinar as variáveis aleatórias e a forma da sua distribuição. Por fim, será elaborado um fluxograma para facilitar o entendimento do processo a ser modelado. Ao longo destas seções será apresentada uma descrição do conteúdo, das suposições e simplificações do modelo.

4.1 Objetivos da simulação

Como objetivos do modelo de simulação, é possível relatar:

- Identificar os gargalos, filas excessivas e restrições em todo o sistema logístico, desde à chegada das *commodities* no terminal de carga até o despacho das cargas pelos navios nos portos;
- Obter a capacidade de exportação do sistema logístico para cada cenário simulado, verificando se o mesmo atende à demanda esperada;
- Avaliar o impacto do dimensionamento dos recursos logísticos na eficiência do sistema logístico;

- Utilizar a configuração proposta pelo modelo de otimização para avaliar as variáveis de desempenho através do modelo de simulação.

O escopo do modelo se restringirá à movimentação de *commodities* (minérios e grãos) e irá abranger as etapas de chegada dos caminhões trazendo os produtos de seus pontos de origem (produção), descarga e ocupação dos armazéns e pátios no terminal de carga, carregamento dos vagões, transporte ferroviário, descarga dos vagões e ocupação dos armazéns e pátios no terminal portuário e despacho das cargas pelos navios. Como já citado anteriormente, não é objetivo deste estudo simular características específicas do transporte ferroviário e do funcionamento do porto. Portanto, não serão consideradas as características do funcionamento de diversos equipamentos específicos destes processos. Por exemplo, será utilizado um tempo probabilístico total para a atividade de transporte ferroviário no trecho em estudo, sem considerar o tempo individualmente gasto em cada trecho da rota, inclusive cada parada, que é uma atividade intrínseca deste processo (paradas para aguardar trem do sentido oposto, abastecimento, troca de maquinista, etc). No porto, serão consideradas atividades básicas relacionadas com a chegada de navios, entrada no porto, atracação, carregamento, desatracação e saída do porto.

4.2 Especificações do sistema logístico

As entradas (*inputs*) são as informações que alimentam o simulador. Os dados de entrada deste modelo serão originados de duas fontes: parte destes parâmetros são as características específicas do sistema logístico estudado, já descritas previamente e que serão imutáveis durante as análises realizadas. Outra parte dos parâmetros de entrada, chamados de controles, terão seus valores iniciais obtidos pelo sistema, porém serão melhorados e atualizados a cada iteração pelo modelo de otimização. Os parâmetros de entrada pré-fixados fornecidos pelo sistema são apresentados na Tabela 4.1.

Como pode ser observado na Tabela 4.1, o sistema pode possuir diferentes tipos de composições (r), que são classificadas de acordo com o número de vagões existentes. Será considerado que as composições serão fixas, ou seja, possuem um número específico de vagões já predeterminados, não sendo possível alterá-las durante o processo. Esta hipótese foi adotada por se considerar, nesse estudo, um sistema composto por um único terminal de carga e outro de descarga. Dessa forma, todas as composições terão mesmo ponto de origem e de destino, não justificando o trabalho inerente à existência de pontos para recomposição de trens.

Tabela 4.1: Parâmetros de entrada do modelo de simulação

Parâmetro	Descrição	Unidade
r	Identificação dos tipos de composição disponíveis, em função do número de vagões	número de vagões
C_VAG_k	Capacidade dos vagões que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	t
C_CAM_k	Capacidade dos caminhões que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	t
C_NAV	Capacidade média dos navios	t
P_NAV_{xk}	Percentual de navios do tipo de carga (x) e que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	%
P_CAM_k	Percentual de caminhões que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	%
POR	Número médio de porões dos navios	unidade
T_FER_i	Expressão que define o tempo de transporte ferroviário na ida ao porto	horas
T_FER_v	Expressão que define o tempo de transporte ferroviário na volta do porto	horas
I_TR_i	Intervalo mínimo entre trens na ferrovia na ida ao porto	horas
I_TR_v	Intervalo mínimo entre trens na ferrovia na volta do porto	horas
T_NAV_e	Expressão que define o tempo para navegação de entrada no porto	horas
T_NAV_s	Expressão que define o tempo para navegação de saída no porto	horas
T_ATR	Expressão que define o tempo para atracação do navio	horas
T_DES	Expressão que define o tempo para desatracação do navio	horas
T_CG_e	Expressão que define o tempo para pré-carregamento do navio	horas
T_CG_s	Expressão que define o tempo para pós-carregamento do navio	horas
T_MUD	Expressão que define o tempo para mudança entre os porões de armazenamento dos navios	horas
BER	Número de berços de atracação	unidade
C_CAN	Capacidade do canal de navegação (n° de navios que podem navegar simultaneamente no canal)	unidade
C_VIR_k	Capacidade do virador de vagões (n° de vagões descarregados por vez para o grupo de <i>commodity</i> (k))	unidade
TX_CAM	Expressão que define a taxa de chegada dos caminhões no terminal de carga	horas
TX_NAV	Expressão que define a taxa de chegada dos navios no porto	horas
$META_k$	Meta de exportação de cada grupo de <i>commodity</i> (k)	t/ano
$DCAM_k$	Expressão que define o tempo de descarga dos caminhões no terminal de carga, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	horas
$CVAG_k$	Expressão que define o tempo de carga dos vagões no terminal de carga, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	horas
$DVAG_k$	Expressão que define o tempo de descarga dos vagões no terminal portuário, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	horas
$CNAV_k$	Expressão que define o tempo de carga dos navios por porão no terminal portuário, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	horas
EST_CAM_k	Número de estruturas de descarga de caminhões para o grupo de <i>commodity</i> (k)	unidade
EST_CAR_k	Número de estruturas de carregamento de vagões para o grupo de <i>commodity</i> (k)	unidade
EST_DES_k	Número de estruturas de descarga de vagões para o grupo de <i>commodity</i> (k)	unidade
$SHIP_k$	Número de <i>shiploaders</i> que carregam o grupo de <i>commodity</i> (k)	unidade

Os vagões transportam uma capacidade específica de produtos para cada grupo de *commodity* (k) (C_VAG_k), bem como os caminhões (C_CAM_k). Já os navios possuem uma capacidade

média total estimada (C_NAV) e também um médio de porões utilizados para o armazenamento dos produtos nos navios (POR), que independe do grupo de *commodity* (k) que ele transporta. Como ressaltado anteriormente, os navios podem ser de carga única (transportam um único tipo de produto) ou de carga mista (transportam produtos distintos de um mesmo grupo de *commodities*).

Será considerado um tempo total para a atividade de transporte ferroviário (T_FER). Este tempo é diferente para o percurso de ida e volta do terminal de carga ao terminal portuário, visto que no retorno os vagões estão vazios e a composição realiza o trajeto em um tempo substancialmente menor. Considera-se também um intervalo de tempo entre trens, para evitar colisões no mesmo sentido e congestionamentos ao longo da via, devido à diferenças de velocidade entre composições e panes mecânicas. Desta forma, caso uma composição seja liberada no tempo t , uma próxima composição só pode ser liberada após $t + \Delta t$, onde Δt é o intervalo mínimo entre trens I_TR .

Os tempos referentes aos processos anteriores e posteriores ao carregamento do navio no porto também devem ser fornecidos (T_NAV_e , T_NAV_s , T_ATR , T_DES , T_CG_e , T_CG_s , e T_MUD). Vale ressaltar que todos os tempos fornecidos pelo sistema, tanto para as atividades na ferrovia quanto no porto são estocásticos, seguindo, portanto, distribuições de probabilidade. Será considerado que os navios entram no porto de maneira contínua, sem considerar a alta das marés. Contudo, essas operações sofrem paralisações devido à condições temporais.

Outros parâmetros a serem fornecidos pelo sistema logístico são: o número de berços (píeres) de atracação (BER), a capacidade para passagem simultânea de navios no canal de navegação (C_CAN), a capacidade do virador de vagões para cada grupo de *commodity* k (C_VIR_k), as taxas de chegada dos caminhões (TX_CAM) e dos navios (TX_NAV), além da meta de exportação para cada grupo de *commodity* k ($META_k$).

Os recursos logísticos a serem dimensionados inicialmente e fornecidos ao modelo de simulação são: estruturas de descarga de caminhões (EST_CAM_k), estruturas de carregamento de vagões (EST_CAR_k), estruturas de descarga de vagões (EST_DES_k) e *shiploaders* ($SHIP_k$). Todos estes recursos são de uso exclusivo para cada grupo de *commodity* (k). O tempo de operação de cada um destes recursos é estocástico ($DCAM_k$, $CVAG_k$, $DVAG_k$ e $CNAV_k$) e considera paradas para manutenção preventiva, manutenção corretiva, além de alguns atrasos operacionais comumente observados neste tipo de atividade. Para cada recurso, serão adotadas taxas de disponibilidade física variáveis e compatíveis com aquelas observadas na realidade.

Tabela 4.2: Controles do sistema em estudo.

Parâmetro	Descrição	Unidade
CAP_CARG_k	Capacidade do armazém do terminal de carga para o grupo de <i>commodity</i> (k)	t
CAP_PORT_k	Capacidade do armazém do terminal portuário para o grupo de <i>commodity</i> (k)	t
r	Identificação do tipo de composição	-
$NCOMP_r$	Número de composições do tipo (r)	unidades

Vale ressaltar ainda que os recursos portuários a serem simulados serão de uso exclusivo da ferrovia, ou seja, as estruturas de descarga de vagões, os armazéns e os berços de atracação a serem utilizados estarão disponíveis apenas para os produtos originados da ferrovia, não havendo compartilhamento dos mesmos para o escoamento de *commodities* de outras origens. O mesmo irá ocorrer com os recursos presentes no terminal de carga, que realiza a captação de produtos do modal rodoviário exclusivo para o sistema em estudo.

A Tabela 4.2 apresenta os controles do sistema estudado, que são os parâmetros atualizados pelo modelo de otimização a cada iteração, com suas respectivas unidades.

Como pode ser observado na Tabela 4.2, o dimensionamento de recursos muito importantes do sistema logístico será fornecido pelo modelo de otimização. A capacitação dos armazéns e o dimensionamento das composições foram escolhidos para serem otimizados devido ao grande impacto nos custos que é atribuído à estes componentes. Vale ressaltar que as capacidades dos armazéns dos terminais de carga e portuário (CAP_CARG_k e CAP_PORT_k) serão fornecidas obedecendo a restrições mínimas e máximas de volume, a serem fornecidas pelo sistema logístico.

As saídas (*outputs*) do modelo de simulação são definidas em função das medidas de desempenho de interesse. O modelo irá fornecer como (*output*) a capacidade de exportação do sistema logístico, ou seja, a quantidade de cada grupo de *commodity* (k) transportada pelos navios. Serão coletados ainda para fins de análise de viabilidade da solução e posterior análise de sensibilidade algumas outras medidas de desempenho, tais como: tamanho médio dos estoques de cada armazém para cada grupo de *commodity* (k), tempo de ciclo das entidades, etc.

4.3 Representação do processo

A fim de compreender o sistema logístico a ser modelado e facilitar a etapa de modelagem computacional e de validação do modelo, foi desenvolvido um fluxograma de todo o processo. Para tanto, foram identificados quatro componentes principais do sistema: entidades, recursos,

atividades e filas.

4.3.1 Entidades

Como entidades do sistema têm-se os caminhões, os trens (formados pelas locomotivas e seus respectivos vagões) e os navios. Os caminhões e os navios são entidades temporárias, que após passarem por algumas atividades saem do sistema. As composições são entidades permanentes, pois atuam em um ciclo fechado na ferrovia.

4.3.2 Recursos

Os recursos são os equipamentos e estruturas necessárias para o funcionamento do sistema, a saber: estrutura de descarga de caminhões, estrutura de carregamento de vagões, estrutura de descarga de vagões, canais de navegação, berços de atracação e carregadores de navios (*shiploaders*).

4.3.3 Atividades

As atividades ou processos são aquelas ações realizadas sobre as entidades, que utilizam os recursos e que consomem tempo para serem executadas. As atividades principais oriundas do modelo de simulação são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Atividades presentes no sistema estudado.

Atividades
Descarga de caminhões
Carregamento de vagões
Transporte ferroviário de ida ao porto
Transporte ferroviário de retorno do porto
Descarga das composições
Navegação de entrada dos navios
Atracação dos navios
Pré-carregamento dos navios
Carregamento dos navios
Mudança entre porões durante carregamento
Pós-carregamento dos navios
Desatracação dos navios
Navegação de saída dos navios

Em um sistema real, o tempo gasto em cada atividade deve ser coletado para cada sistema específico em estudo. Após coleta e tratamento destes dados, serão ajustadas as distribuições de probabilidade que melhor representam o tempo gasto em cada atividade. Como o objetivo deste trabalho é propor um modelo genérico e não está baseado em um sistema real específico, serão

utilizados dados estimados (distribuições de probabilidades) para compor o tempo dispendido nas atividades. Contudo, esses dados serão coerentes com sistemas logísticos reais.

As próximas subseções irão apresentar algumas características particulares e simplificações consideradas para cada uma das atividades presentes no sistema logístico estudado.

4.3.3.1 Descarga de Caminhões

A descarga de caminhões utiliza uma estrutura de descarga para cada grupo de *commodity*. Essas estruturas (moegas, carregadeiras, etc) são de uso exclusivo do sistema logístico estudado. Os caminhões chegam até o terminal e aguardam em uma fila para descarga de acordo com o grupo de *commodities* que estão transportando. No modelo, será adotada a disciplina FIFO para as filas. Os produtos a serem exportados não são perecíveis. Assim, sua permanência nos caminhões ou armazéns não altera suas qualidades físico-químicas. Desta forma, será considerado que os caminhões irão aguardar na fila até o seu descarregamento, não havendo desistência dos mesmos ou redução da qualidade do produto transportado.

Outro aspecto considerado é que a descarga só irá ocorrer quando houver espaço disponível no armazém para receber o produto. Desta forma, mesmo que a estrutura de descarga esteja disponível, na falta de espaço no armazém para estoque, o caminhão irá permanecer na fila aguardando a descarga. Os armazéns possuem capacidade fixa ao longo de todo o período da simulação. Como já ressaltado anteriormente, este é um dos parâmetros de entrada do modelo fornecido pelo modelo de otimização.

4.3.3.2 Carregamento de vagões

De modo análogo à descarga de caminhões, o carregamento de vagões também é composto por uma estrutura de carregamento para cada grupo de *commodity*, de uso exclusivo do sistema logístico. Quando a composição com os vagões vazios chega ao terminal de carga, será definido qual o produto a mesma irá transportar até o porto, de acordo com uma política de despacho que será determinada posteriormente.

A cada viagem, a composição somente irá transportar produtos de um mesmo grupo de *commodity*. Após a definição de qual produto será transportado, a composição aguarda a carga em um fila específica para cada grupo. É realizado o carregamento de apenas um vagão por vez. Após a conclusão do carregamento da composição, a estrutura de carga é imediatamente liberada e a composição desloca-se para uma fila única, enquanto aguarda a liberação da ferrovia

para tráfego.

4.3.3.3 Transporte ferroviário

A ferrovia a ser considerada neste estudo liga o terminal de carga ao terminal portuário. As composições aguardam em uma fila única e são liberadas para o tráfego respeitando-se um intervalo mínimo entre trens no mesmo sentido da ferrovia.

Apesar de não serem consideradas no modelo de simulação, as características intrínsecas do transporte ferroviário são atribuídas no tempo de percurso, que é diferente para cada um dos sentidos.

4.3.3.4 Descarga das composições

Após o transporte ferroviário, as composições que chegam até o terminal também aguardam o descarregamento em uma fila. O modelo irá considerar que a fila segue a lógica FIFO e é específica para o grupo de *commodity*. A descarga também é realizada por uma estrutura de descarga exclusiva para cada grupo de *commodity*. O número de vagões descarregados simultaneamente por cada estrutura é definido *a priori*, podendo ocorrer a descarga de um ou dois vagões por vez. A composição só é liberada para retorno ao terminal de carga após todos os seus vagões estarem vazios. Como o sistema é um ciclo fechado, as composições vazias retornam para o terminal de carga para aguardar novo carregamento.

A etapa de pesagem dos produtos também será considerada parte do processo de descarga, visto que não é considerada perda de produtos durante o processo de transporte. Além disso, será considerado que os veículos de transporte irão transportar exatamente a sua capacidade total de carga.

De maneira análoga à descarga dos caminhões, outro ponto considerado no processo de descarga dos vagões é a disponibilidade de espaço no armazém. A cada vagão, é verificada a disponibilidade para armazenagem para o grupo de *commodity* que está sendo descarregado. O descarregamento é interrompido quando o armazém esgota sua capacidade e aguarda a disponibilidade do mesmo para continuar a descarga dos vagões.

4.3.3.5 Carregamento de navios

Quando os navios chegam ao porto, os mesmos aguardam o carregamento em uma fila, que também segue a disciplina FIFO. O carregamento de navios é formado por um conjunto de

atividades a serem realizadas pela entidade: navegação de entrada, atracação, pré-carregamento, carregamento, pós-carregamento, desatracação e navegação de saída. Essas atividades foram descritas na seção 3.1 do capítulo anterior.

No modelo, o canal de navegação possui uma determinada capacidade para passagem simultânea dos navios, sendo necessária a sua disponibilidade para a entrada e saída dos navios nos portos. O berço também só consegue atracar um navio por vez. Este recurso permanece ocupado nas atividades de atracação, pré-carregamento, carregamento, pós-carregamento e desatracação. O canal de navegação e o berço são compartilhados para todos os navios. Contudo, cada estrutura de carregamento é exclusiva para um grupo de *commodity*.

Os tempos oriundos dos eventos característicos do funcionamento do porto e que não serão considerados neste modelo, conforme explicitado anteriormente, foram adicionados ao tempo de carregamento dos navios. Destaca-se a importância da disponibilidade de estoque do produto a ser transportado pelo navio pois, caso contrário, o mesmo permanece atracado e os recursos ocupados enquanto aguarda a disponibilidade do mesmo.

4.3.4 Filas

Além das atividades apresentadas na seção anterior, outro evento que dispende tempo de simulação é a espera em filas. Os veículos de transporte irão dispende tempo para aguardar algumas atividades, a saber:

- Caminhões: aguardam descarga no terminal de carga;
- Composições: aguardam carregamento e descarga nos terminais de carga e portuário;
- Navios: aguardam todas as atividades inerentes ao carregamento no porto.

Os tempos de espera irão variar de acordo com os *inputs* fornecidos para cada cenário da simulação. Estes serão medidos ao longo do tempo de simulação e serão fornecidos ao usuário como *outputs* do modelo.

4.4 Fluxograma do sistema

De posse destes dados, será possível desenvolver um modelo representativo do sistema real, que será apresentado por meio de um fluxograma para a movimentação de cada entidade. Estes fluxogramas são interligados pelo estoque das *commodities* nos armazéns e pátios, uma variável do

sistema. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, a movimentação dos caminhões, dos navios e das composições presentes no sistema.

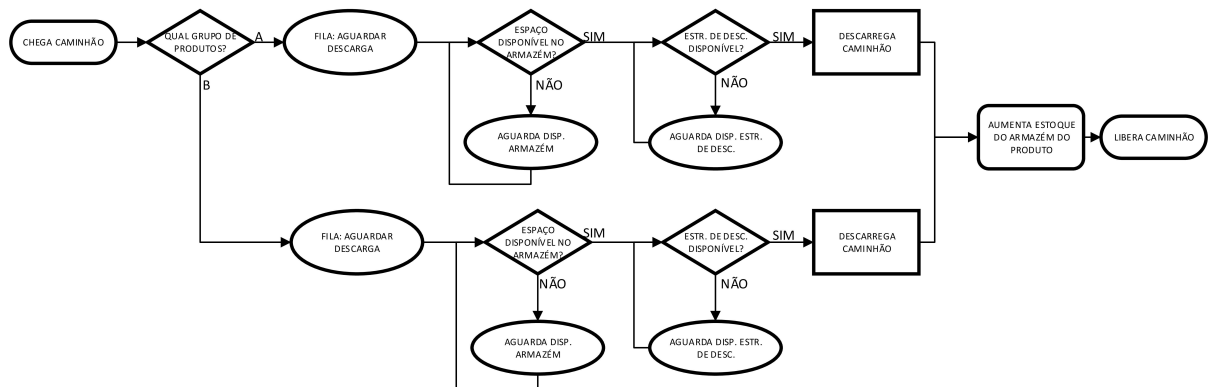


Figura 4.1: Fluxograma do sistema a ser modelado - Entidade Caminhão
 Fonte: Elaborado pela Autora

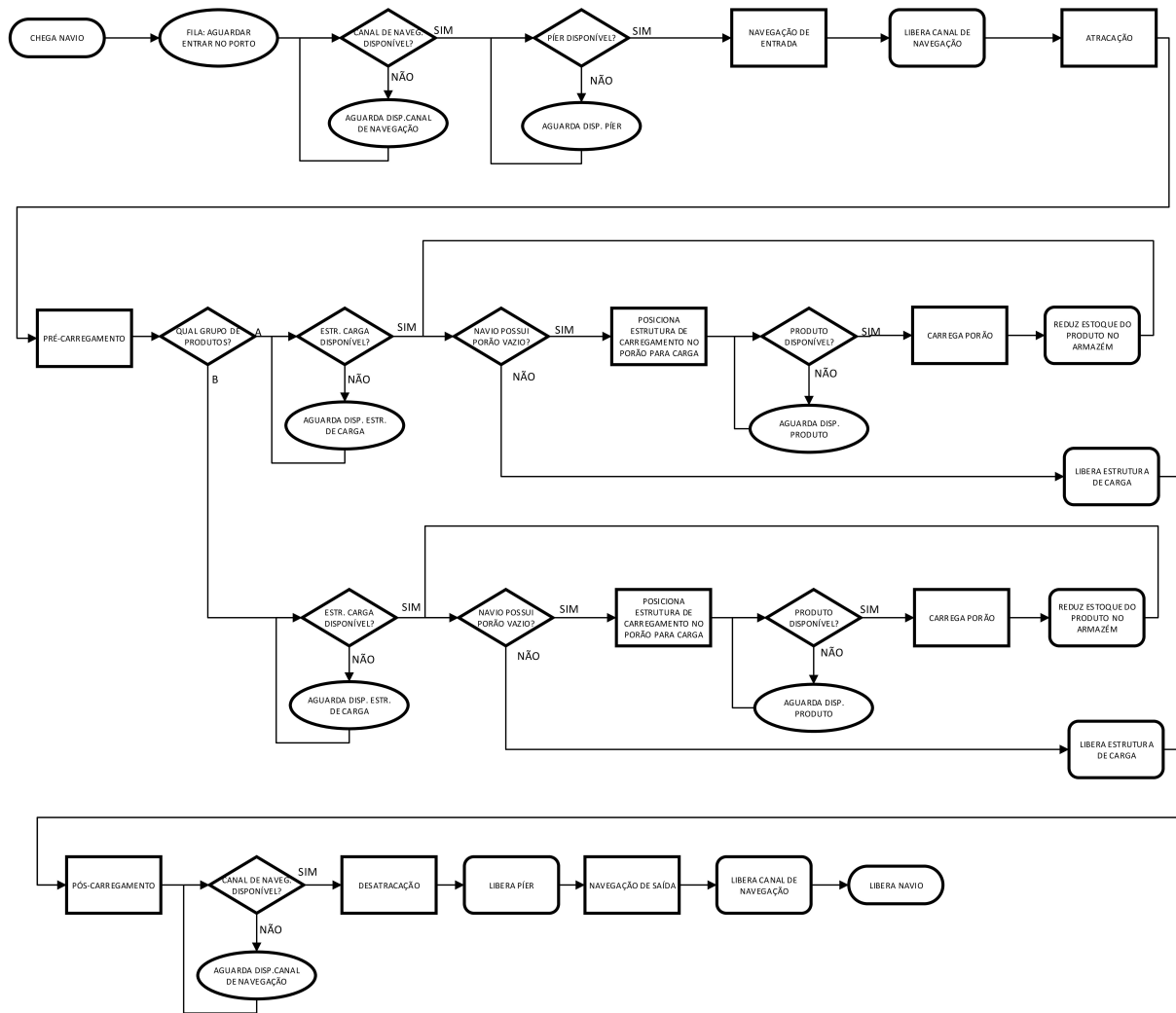


Figura 4.2: Fluxograma do sistema a ser modelado - Entidade Navio
 Fonte: Elaborado pela Autora

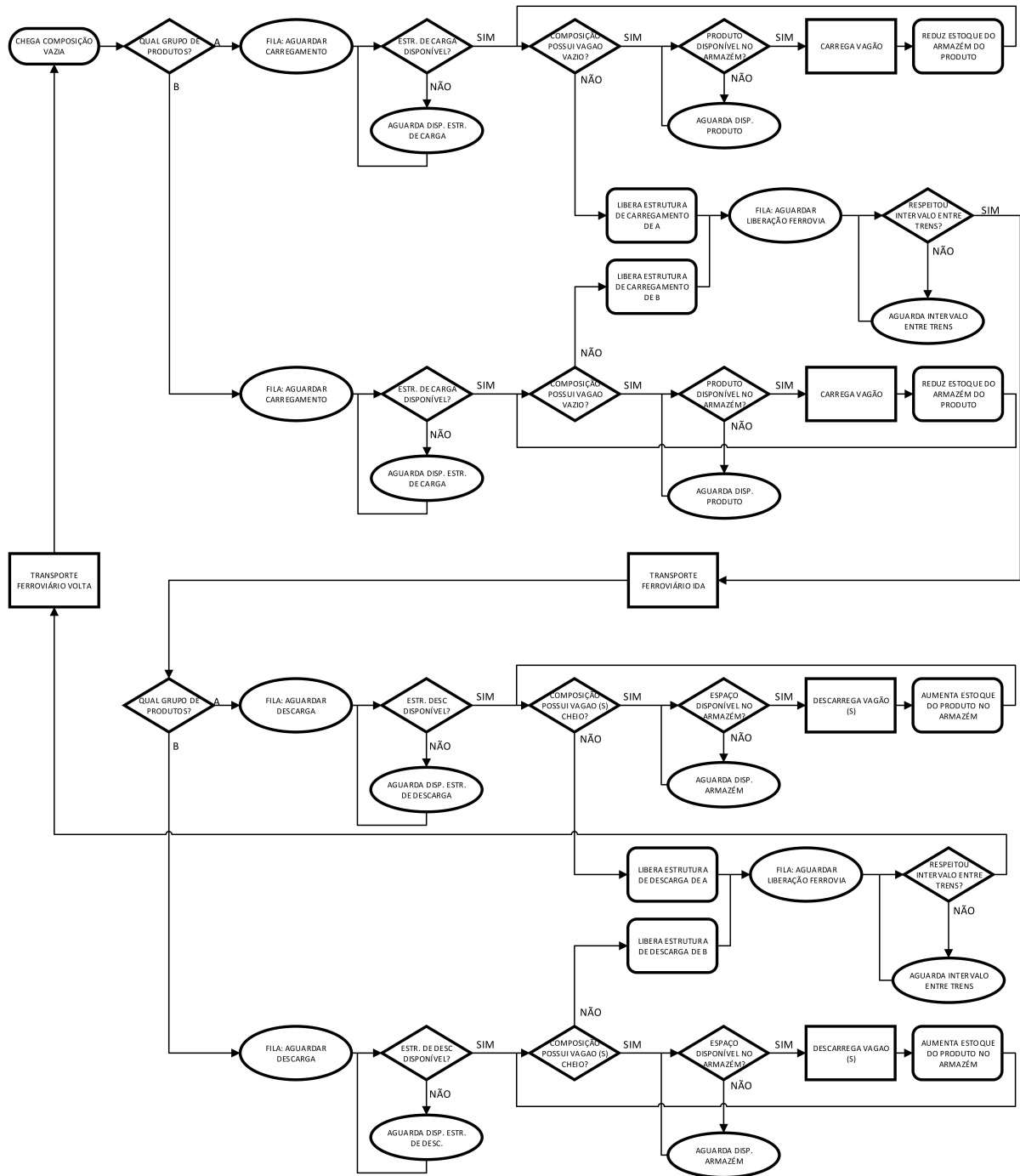


Figura 4.3: Fluxograma do sistema a ser modelado - Entidade Composição
 Fonte: Elaborado pela Autora

Capítulo 5

Modelo Computacional de Simulação

Esse capítulo tem como objetivo descrever as principais características da construção do modelo computacional de simulação, desenvolvido a partir do modelo conceitual apresentado no capítulo 4. Neste capítulo, serão discutidas as etapas para a elaboração do mesmo, bem como as principais políticas desenvolvidas para representar o sistema real e codificar o mesmo em uma linguagem de simulação. Posteriormente, apresenta-se a etapa de verificação e validação do modelo, seguido da definição dos parâmetros para execução da simulação. A seguir, serão apresentados os dados estimados, baseados em dados de sistemas reais, bem como o cálculo dos demais parâmetros do modelo, que foram utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Por fim, apresenta-se a definição de um cenário inicial para o problema em estudo.

5.1 Principais características do modelo computacional de simulação

O modelo computacional proposto neste trabalho foi desenvolvido utilizando-se pacote de simulação disponível no mercado. A adoção de um simulador para esta etapa visa a redução no tempo de implementação, devido à facilidade na interação com sua interface gráfica.

O modelo de simulação seguiu os preceitos do modelo conceitual já desenvolvido. Desta forma, buscou-se transferir para o modelo de simulação os fluxogramas apresentados na subseção 4.4, ou seja, a lógica para o escoamento das *commodities* para exportação obedece o fluxo das três entidades do sistema logístico: caminhões, composições e navios. Algumas características relevantes para a construção do modelo computacional de simulação são apresentadas nas próximas subseções.

5.1.1 Leitura de arquivos

A simulação inicia com a leitura de uma planilha contendo todos os parâmetros de entrada do modelo de simulação descritos na Tabela 4.1, apresentada anteriormente. Como este trabalho possui o objetivo de propor um modelo genérico, os parâmetros de entrada podem ser alterados apenas na planilha, e estes serão atualizados automaticamente no modelo de simulação ao iniciar a sua execução. Desta forma, não será necessário alterar os parâmetros dentro do modelo de simulação. Esta ferramenta também visa facilitar a interface com o usuário, visto que a planilha é um ambiente comum para muitos usuários que, às vezes, não possuem pleno domínio do *software* utilizado. Estes dados permanecem inalterados durante todo o processo de execução do modelo de otimização via simulação.

Já os controles do sistema em estudo, descritos anteriormente na Tabela 4.2, são armazenados em arquivos de texto. A leitura destes arquivos é realizada também no início da simulação. Têm-se três arquivos de texto: *ARQCAPCARGA* e *ARQCAPPORTO*, que armazenam as capacidades dos armazéns de carga e portuário, respectivamente, para todos os grupos de *commodities*; e *ARQNUMCOMP*, que armazena o tipo e o número de composições que irão atuar no sistema. Estes dados são alterados pelo modelo de otimização a cada ciclo do processo de otimização via simulação.

5.1.2 Principais variáveis do modelo

As variáveis do modelo responsáveis pela interligação dos fluxos das entidades (caminhões, composições e navios) são os estoques do armazém de carga e do armazém portuário, para cada grupo de *commodities* (k), ou seja, são as variáveis $EST_ARM_CARGA_k$ e $EST_ARM_PORTO_k$.

Toda vez que um caminhão realiza a descarga no terminal de carga, a variável de estoque $EST_ARM_CARGA_k$ é acrescida do valor de sua capacidade, visto que, como ressaltado anteriormente, não é considerada perda de material ao longo do transporte. Em contrapartida, toda vez que um vagão é carregado com determinada *commodity* (k), a variável $EST_ARM_CARGA_k$ é reduzida, de acordo com a capacidade do vagão. De maneira análoga, toda vez que uma composição chega ao terminal portuário para descarga, a variável $EST_ARM_PORTO_k$ sofre acréscimo. Contudo, a quantidade de produto a ser acrescentada no estoque depende do número de vagões que são descarregados por vez, já que este pode variar para cada grupo de *commodity* (k). Deve-se ter ainda especial atenção ao último conjunto de vagões da composição a ser descarregado, visto que este pode ter um número inferior de vagões

que os demais. O carregamento dos navios é realizado por porção. Contudo a redução do estoque do porto $EST_ARM_PORTO_k$ é discretizada em porções menores, visando tornar o carregamento do navio mais contínuo. Assim, o carregamento do navio demanda menor quantidade de produto disponível para ser carregado, o que reduz a probabilidade de interrupção do carregamento por falta de estoque no armazém. As variáveis de estoque dos armazéns são controladas ao longo de todo o sistema, respeitando as capacidades dos armazéns predeterminadas para o modelo.

Quando os navios terminam o seu carregamento, os mesmos realizam as atividades de pós-carregamento, desatracação e navegação de saída, para então serem liberados para sair do sistema. Anteriormente à sua liberação, a variável QT_EXP_k , que armazena a quantidade exportada para cada grupo de *commodity* (k), é contabilizada. Esta é uma variável fundamental para verificar a viabilidade da solução, ou seja, se o sistema conseguiu atingir a meta de exportação especificada.

Além destas variáveis principais, são coletadas, ao longo do tempo de simulação, algumas estatísticas para futuras análises de viabilidade e de qualidade das soluções. Dentre elas, têm-se: o estoque médio para cada armazém ($EST_MED_CARGA_k$ e $EST_MED_PORTO_k$); o tempo de ciclo médio para cada uma das entidades temporárias do sistema (TC_CAM_k e TC_NAV_k); e também o tempo médio de fila das entidades permanentes (composições), para as atividades de carga e descarga, para cada grupo de *commodity* (k) (TF_CARGA_k e TF_PORTO_k).

Essas variáveis são gravadas em um arquivo de texto, $ARQSAI$, que corresponde à saída da simulação (*output*). São apresentados os valores para cada replicação e, ao final, a média das replicações. Esses dados serão utilizados como ferramentas para a construção do modelo de otimização, próxima etapa deste trabalho.

Para fins de análise da qualidade das soluções apresentadas, são armazenadas ainda os valores das variáveis $EST_ARM_CARGA_k$ e $EST_ARM_PORTO_k$ ao longo do tempo de simulação, de maneira discretizada. O objetivo é construir um histograma para cada armazém, que mostra a situação do nível do estoque ao longo do tempo. Estes dados são gravados em uma planilha, que esboça automaticamente um diagrama (tempo *versus* capacidade do armazém). Os armazéns são considerados bem dimensionados quando os estoques permanecem, na maior parte do tempo, em torno da média de sua capacidade. A Figura 5.1 mostra um exemplo dos histogramas obtidos para uma determinada solução do modelo.

Nota-se na Figura 5.1 que, embora esta solução possa atender aos critérios de viabilidade do

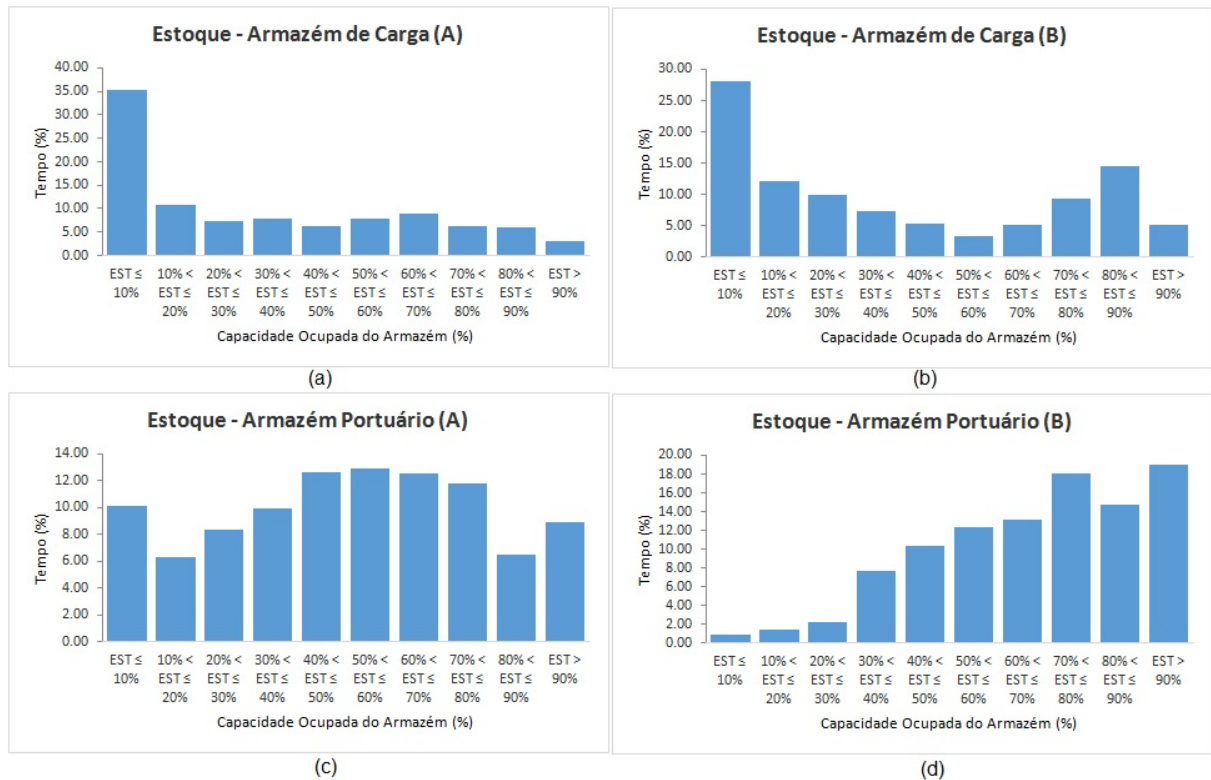


Figura 5.1: Histogramas de Capacidades dos Armazéns
 Fonte: Elaborado pela Autora

problema, a qualidade dos estoques ainda é insatisfatória. O estoque do armazém de carga para o grupo de *commodity* A, mostrado na letra (a), ainda permanece a maior parte do tempo vazio (35% do tempo), com estoque abaixo de 10%. O estoque do armazém de carga para o grupo de *commodity* B, mostrado na letra (b), tem uma pequena melhora, mas ainda permanece com a mesma situação. Já o estoque do armazém portuário para o grupo de *commodity* A, mostrado na letra (c), possui a melhor situação dentre os quatro, pois está com uma aparência um pouco mais parecida com a curva da Normal. Por sua vez, o estoque do armazém portuário para o grupo de *commodity* B, mostrado na letra (d), permanece a maior parte do tempo cheio, com estoques acima de 80%, o que revela o subdimensionamento desse armazém.

5.1.3 Definição da política de despacho de trens

Quando as composições vazias chegam ao terminal de carga para serem carregadas, deve-se selecionar qual o grupo de *commodity* será transportado por ela, visto que cada composição só pode transportar um mesmo grupo de *commodities* por vez.

Foram realizados vários testes até a seleção de uma política de despacho que melhor representasse a realidade dos sistemas logísticos como o estudado. A definição de qual *commodity*

será transportada segue a política de despacho descrita na Figura 5.2. Essa política parece ser adequada para representar sistemas onde se tem o manuseio simultâneo de dois tipos de produtos.

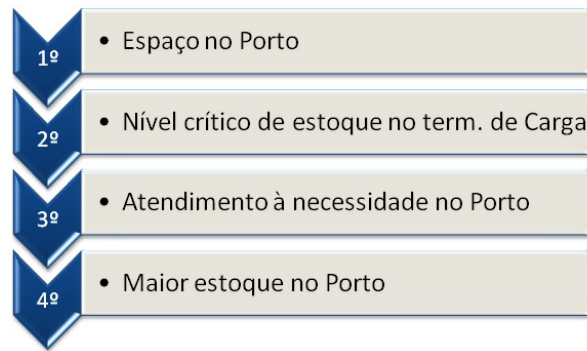


Figura 5.2: Esquema da política de despacho de trens
 Fonte: Elaborado pela Autora

A primeira questão a ser analisada para definição de qual produto deverá ser despachado consiste em verificar se há espaço suficiente no terminal portuário para armazenar o produto que será transportado. A equação que verifica a disponibilidade de espaço no armazém é dada por:

$$CPT_k - EST_ARM_PORTO_k - ETR_k \geq C_VAG_k * r \quad k = 0, 1 \quad (5.1)$$

Onde ETR_k é o estoque em trânsito do produto (k) para o armazém portuário e r é o número de vagões existentes. Se a condição da equação 5.1 for satisfeita, pode-se prosseguir para a segunda verificação. Caso contrário, se houver espaço para apenas um dos produtos, este será transportado. Se não houver espaço para nenhum dos produtos, caso uma composição seja liberada para carregar, a mesma irá aguardar na fila para descarga no porto devido à falta de espaço no armazém. Portanto, deve-se aguardar até que haja espaço no porto para um dos produtos para que este possa ser enviado.

Caso haja disponibilidade no armazém do terminal portuário para todos os produtos, a segunda questão a ser analisada é verificar se o nível dos estoques do terminal de carga está acima de um nível superior crítico, por exemplo, 85% de sua capacidade. Caso um dos estoques esteja nessa situação crítica, próximo de atingir a sua capacidade máxima, deve-se realizar uma análise cruzada entre os estoques dos armazéns do terminal de carga e do terminal portuário, como mostrado na Figura 5.3.

A análise cruzada permite comparar o nível do estoque do armazém de um produto e o estoque do porto de outro produto. Essa análise cruzada é relevante pois, como pode ser observado na Figura 5.3, pode-se ter uma situação em que o estoque do produto A no armazém está cheio,

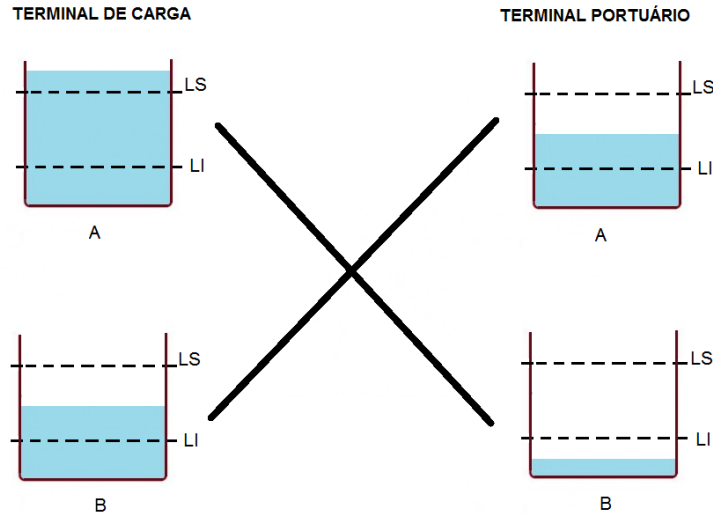


Figura 5.3: Análise cruzada entre estoques 1
 Fonte: Elaborado pela Autora

quase atingindo a capacidade máxima do armazém. Contudo, o nível do estoque do produto B no porto está quase vazio, em um nível abaixo do limite crítico inferior (por exemplo, 15%). Neste caso, ainda que o produto A esteja em excesso no terminal de carga, é melhor enviar o produto B que está em falta no porto, pois pode-se ter uma demanda maior por este e se estoque do armazém portuário for insuficiente para suprir a necessidade de carregamento do navio, irá acarretar em multas por atraso do mesmo. Desta forma, é preferível o sistema ser interrompido no terminal de carga por excesso do produto A do que por falta do produto B no carregamento do navio. Vale ressaltar que o produto B só será enviado se o estoque do mesmo no terminal de carga for suficiente para carregar a composição. Caso contrário, será enviado o produto A.

Em contrapartida, caso se tenha a situação descrita na Figura 5.4, se o nível do estoque do produto A estiver acima do limite crítico superior no armazém do terminal de carga e o nível do estoque do produto B no terminal portuário estiver acima do limite crítico inferior, pode-se então enviar o produto A sem que haja possíveis prejuízos ao carregamento de B no porto.

Caso o nível dos estoques de ambos os produtos estiver acima do limite superior crítico, nenhum dos mesmos será escolhido para ser despachado e parte-se então para a terceira questão a ser analisada, expressa na Figura 5.2.

A necessidade do produto (k) no porto pode ser definida pela seguinte equação:

$$Nec_k = Dem_k - EST_ARM_PORTO_k - ETR_k \quad k = 0, 1 \quad (5.2)$$

Onde Nec_k é a necessidade da *commodity* (k) e Dem_k é a demanda dos navios pela *commodity*

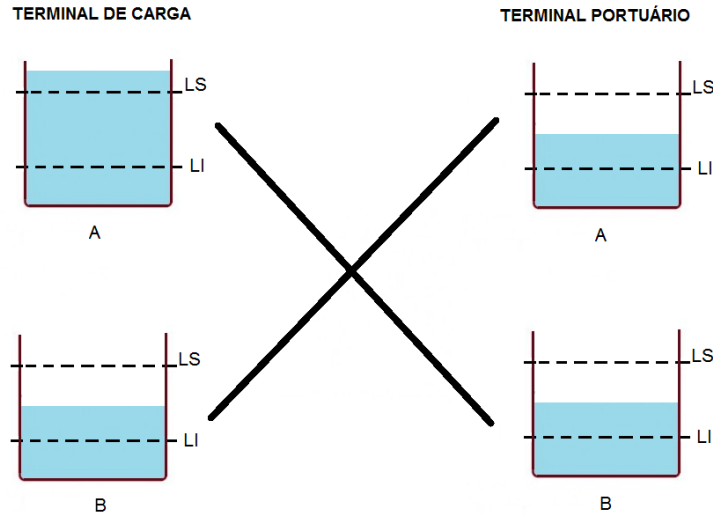


Figura 5.4: Análise cruzada entre estoques 2
 Fonte: Elaborado pela Autora

(k). A demanda dos navios pelo produto (k) é dado pelo somatório da demanda dos navios presentes no porto e dos navios programados para chegar ao porto dentro de um determinado período. Nesse estudo, foi adotado que a administração do porto toma conhecimento da chegada dos navios com cinco dias de antecedência. Contudo, esse número pode variar entre os sistemas logísticos.

A terceira questão a ser analisada é verificar se o estoque existente é suficiente para atender às necessidades do porto para cada um dos produtos (k). Se algum dos produtos tenha necessidade positiva ($Nec_k > 0$), ou seja, demanda produto, este será o produto despachado pela composição. Caso ambos os produtos tenham necessidade positiva, será despachado aquele produto com maior necessidade no porto.

Por fim, caso o estoque seja suficiente para atender às necessidades de todos os produtos ($Nec_k \leq 0$), será analisada a última questão da política de despacho, que é enviar aquele produto que possui menor estoque ($EST_ARM_PORTO_k + ETR_k$).

5.2 Verificação e validação do modelo computacional

De acordo com Freitas Filho (2001), a avaliação do modelo de simulação consiste em duas etapas: verificação e validação. Segundo o autor, a verificação consiste em avaliar se os preceitos e as simplificações sobre o comportamento do sistema real foram corretamente implementados no modelo computacional. A validação consiste em detectar se o modelo ainda comporta-se de maneira semelhante ao sistema real, mesmo após os preceitos e simplificações consideradas.

Desta forma, na etapa de verificação do modelo computacional foi analisado se o funcionamento das funções e processos implementados estão de acordo com o desejado. Além disso, o modelo computacional programado é comparado ao modelo conceitual, para que sua adequação àquele modelo possa ser verificada.

Para facilitar o processo de verificação do modelo computacional foi utilizada a implementação modular, ou seja, os fluxos de cada uma das entidades foram implementados e executados separadamente. Inicialmente, desenvolveu-se o fluxo de caminhões, que é a etapa mais simples na construção do modelo. Para verificação do funcionamento deste módulo, a capacidade dos armazéns do terminal de carga era ilimitada, *a priori*. Após a implementação, verificou-se que toda a produção prevista era descarregada pelos caminhões e permanecia nos armazéns do terminal.

Posteriormente, implementou-se o fluxo de navios. Para a verificação deste módulo, o estoque dos armazéns do terminal portuário continham, no início da simulação, uma quantidade de produto superior à meta de exportação daquele período. Após a implementação, verificou-se que os navios conseguiam chegar ao porto, realizar todas as atividades anteriores e posteriores ao carregamento e, por fim, exportar a quantidade desejada para o sistema logístico.

O último módulo a ser implementado foi o fluxo das composições. Este fato se deve ao fato deste fluxo interligar os terminais de carga e portuário. Inicialmente, foi implementado o carregamento das composições no terminal de carga. Para a verificação do funcionamento do terminal de carga como um todo, os armazéns foram então capacitados. Em um segundo momento, foi implementado a outra ponta do fluxo das composições, que é a etapa de descarregamento no porto. Após a capacitação também destes armazéns, foi verificado o funcionamento completo do terminal portuário. Por fim, a última etapa de implementação modular consiste na construção da ferrovia, interligando os extremos do fluxo das composições.

Como ressaltado anteriormente, a validação do modelo de simulação se dá mediante a verificação da proximidade de seus resultados com o sistema real. Como o sistema logístico em estudo é fictício, a etapa de validação se deu mediante contato e participação de um profissional experiente e capacitado na área de simulação de sistemas logísticos, como o estudado. Foi utilizada a técnica de validação "face a face", em que todo o processo de funcionamento do sistema foi discutido com o profissional, bem como as simplificações adotadas na etapa de modelagem e a definição das variáveis utilizadas como medidas de desempenho do sistema. Vale ressaltar que, os dados utilizados para validação do modelo, apesar de serem estimados, são baseados fortemente em sistemas reais já conhecidos pelo profissional.

5.3 Definição dos parâmetros de execução do modelo de simulação

Após a validação do modelo de simulação, considera-se que o modelo já é operacional, ou seja, já pode ser utilizado. Para tanto, deve-se definir a melhor configuração dos parâmetros para a execução da simulação, como o número de replicações e o tempo de aquecimento do sistema.

A simulação de um sistema geralmente passa por duas etapas: regime transitório e regime permanente. Como pode ser observado na Figura 5.5, o regime transitório é a fase inicial da simulação, onde o desempenho do sistema está fortemente relacionado às suas condições iniciais. Após um determinado tempo de simulação, essas condições passam a não afetar o comportamento do sistema, dando início, assim, ao regime permanente.

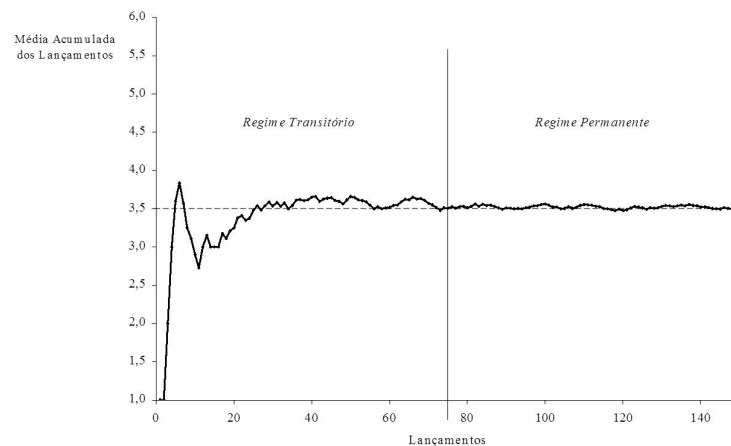


Figura 5.5: Resultados de uma medida de desempenho após 150 replicações
Fonte: Chwif e Medina (2007).

Estudar sistemas em regime transitório é muito complexo. Além disso, quando o sistema estudado é não terminal, tal como os sistemas logísticos em estudo, deve-se analisar o comportamento da simulação e identificar cuidadosamente a duração dos regimes transitório e permanente.

Desta forma, uma técnica utilizada para facilitar o estudo destes sistemas consiste em eliminar o período transitório, ou seja, iniciar a simulação com o sistema já em um estado dentro do regime permanente. Quando faz-se uso desta técnica, o tempo de aquecimento (*warm-up*) do sistema, que é considerado o tempo necessário para que o sistema entre em equilíbrio, deve ser desconsiderado para obtenção dos dados para análise da solução. A fim de eliminar o *warm-up* do sistema e iniciar a execução do modelo com o sistema já estabilizado, foram adotadas duas políticas:

- Inicialização do modelo com estoques iniciais médios dos armazéns;
- Distribuição das composições em diversas etapas do ciclo de atividades.

Os estoques de todos os armazéns são inicializados na metade de sua capacidade, permitindo que as entidades de navios e composições que chegarem aos terminais no primeiro instante da simulação já possam ser carregadas. Isso irá evitar a formação de filas iniciais para aguardar a disponibilidade de estoque nos armazéns para o primeiro carregamento.

As composições tem seu ciclo de atividades subdividido em quatro etapas, conforme mostra a Figura 5.6. Para se inicializar o sistema como se o mesmo já estivesse em operação, o número de composições existentes no sistema é dividido por quatro, fazendo com que cada quarto das composições estejam em uma das atividades do ciclo das composições quando ocorre a inicialização do sistema.



Figura 5.6: Atividades principais do ciclo das composições
Fonte: Elaborado pela Autora

Ao adotar a quantidade total exportada como medida de desempenho do sistema, nota-se, como pode ser observado na Figura 5.7, que a utilização dessas políticas eliminou o regime transitório do tempo de simulação. Desta forma, não será necessário o uso do *warm-up*. O número de replicações será o único parâmetro a ser ajustado para a execução da simulação.

Um modelo de simulação lida com números aleatórios e, portanto, não deve-se tirar conclusões sobre a funcionalidade de um modelo partindo apenas dos resultados de uma rodada de simulação (CHWIF; MEDINA, 2007). A determinação do número de replicações é muito importante e deve ser determinado considerando os níveis de confiança estatística e precisão desejados.

Ainda de acordo com os autores, a confiança estatística refere-se ao intervalo de confiança, ou seja, um intervalo de valores que contém a média da população com certa probabilidade.

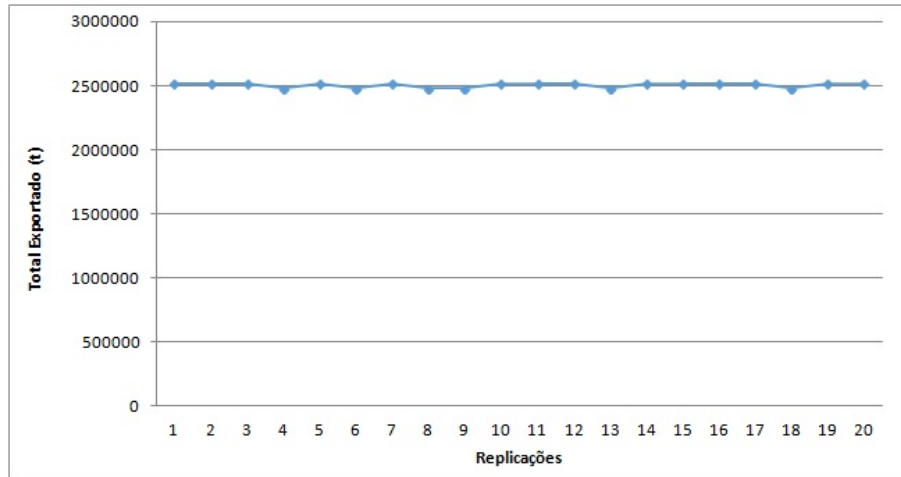


Figura 5.7: Regime permanente do sistema em estudo.
 Fonte: Elaborado pela Autora

Assim, quanto maior o valor desta probabilidade, maior a confiança estatística de que a média da população está entre o intervalo construído. Já a precisão refere-se ao tamanho do intervalo.

Segundo Chwif e Medina (2007), um intervalo de confiança, para uma confiança estatística $100(1 - \alpha)\%$, para a média de uma população é dado pela equação:

$$IC = \bar{x} \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

onde:

\bar{x} é a média da amostra;

$h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$ é a metade do tamanho do intervalo, aqui denominada de precisão;

$t_{n-1, \alpha/2}$ é o $(1 - \alpha/2)$ percentil da distribuição t de Student com n-1 graus de liberdade;

s é o desvio padrão da amostra;

n é o número de dados da amostra.

O desvio padrão, s, por sua vez, é dado pela seguinte equação:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.4)$$

A Tabela 5.1 apresenta os dados obtidos em dez replicações do sistema, utilizando como medida de desempenho a quantidade total exportada.

Os dados necessários para construção de um intervalo de confiança de 95% são apresentados na Tabela 5.2.

Nota-se que, para um intervalo de confiança de 95%, a adoção de 10 replicações permite

Tabela 5.1: Quantidade total exportada para cada replicação do modelo de simulação

Replicação	Quantidade total exportada (t)
1	2520000
2	2520000
3	2520000
4	2485000
5	2520000
6	2485000
7	2520000
8	2485000
9	2485000
10	2520000
Média (\bar{x})	2506000
Desvio Padrão (s)	18073.92

Tabela 5.2: Intervalo de Confiança para o sistema logístico em estudo

n	Confiança $100(1 - \alpha)\%$	α	$t_{n-1, \alpha/2}$	Precisão $h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Intervalo de confiança da média ($\bar{x} = 2506000$)
10	95%	0.05	2.262	12928.40	$2493071.60 \leq \mu \leq 2518928.40$

obter uma precisão considerada satisfatória para a análise do sistema em estudo. Caso deseja-se aumentar a precisão para este intervalo de confiança, deve-se aumentar o número de replicações.

5.4 Coleta e tratamento de dados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados estimados, porém, baseados fortemente em sistemas logísticos intermodais reais. Estes sistemas são tipicamente utilizados no território brasileiro para o escoamento de *commodities* voltadas para a exportação, tais como grãos e minérios.

Nas próximas subseções serão apresentadas as etapas de coleta e o tratamento de dados para obtenção dos parâmetros de entrada e dos controles do modelo de simulação.

5.4.1 Tratamento de parâmetros de entrada do modelo de simulação

Os valores adotados para alguns dos parâmetros de entrada deste modelo são apresentados na Tabela 5.3. Nota-se que as composições podem ser do tipo 1 (com 35 vagões), tipo 2 (50 vagões) ou do tipo 3 (70 vagões).

A Tabela 5.4 apresenta alguns dados probabilísticos adotados para as atividades presentes no sistema logístico. Nota-se que todos os parâmetros descritos na tabela utilizaram a distribuição de

Tabela 5.3: Definição de alguns parâmetros de entrada do modelo de simulação

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
$META_k$	Meta de exportação de cada grupo de <i>commodity</i> (k)	1500000 (A) e 1000000 (B)	t
r	Tipos de composições	35, 50 ou 70	número de vagões
C_VAG_k	Capacidade dos vagões que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	70	t
C_CAM_k	Capacidade dos caminhões que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	50	t
C_NAV	Capacidade média dos navios	35000	t
POR	Número médio de porões dos navios	10	unidade
C_CAN	Capacidade do canal de navegação (n° de navios que podem navegar simultaneamente no canal)	2	unidade
C_VIR_k	Capacidade do virador de vagões (n° de vagões descarregados por vez para o grupo de <i>commodity</i> (k))	2	unidade
I_TR_i	Intervalo mínimo entre trens na ferrovia na ida ao porto	2	horas
I_TR_v	Intervalo mínimo entre trens na ferrovia na volta do porto	1.5	horas

probabilidade triangular ($TRIA(min, moda, max)$). Segundo Assis et al. (2006), a distribuição triangular é utilizada quando pode-se determinar o valor mais provável da variável aleatória (moda), e também o seu valor mínimo e máximo, e quando uma função linear parece apropriada para essa descrição. Ainda de acordo com os autores, a distribuição triangular é um bom modelo entre as distribuições normal e a uniforme.

Além das atividades descritas na Tabela 5.4, têm-se ainda as atividades de carga e descarga dos veículos de transporte em ambos os terminais intermodais, que também seguem distribuições de probabilidade. Esses dados, apresentados na Tabela 5.5, foram estimados tendo como base a capacidade efetiva de cada estrutura de carga e descarga do sistema, já descontando as horas dispendidas para manutenção dos equipamentos. Uma estrutura de descarga de caminhões para produtos do tipo A geralmente gasta 2.5 minutos para realizar uma descarga, enquanto os produtos do tipo B são descarregados a uma taxa de 3 minutos. Já a estrutura de carregamento das composições demanda um tempo de 9.8 minutos para carregar um vagão, para ambos os produtos. Por conseguinte, uma estrutura de descarga realiza a descarga de um grupo de vagões (cujo tamanho varia de acordo com a capacidade do virador) em 2.5 minutos. Por fim, um *shiploader*, que é estrutura utilizada para o carregamento de navios, possui capacidade efetiva de 1800 t/h para os produtos do tipo A e de 1500 t/h para os produtos do tipo B.

De posse dessas capacidades, é possível estimar os valores adotados nas distribuições de probabilidade da Tabela 5.5. As atividades das estruturas de descarga dos caminhões e de carga

Tabela 5.4: Definição das expressões probabilísticas utilizadas como parâmetros de entrada do modelo de simulação 01

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
T_FER_i	Expressão que define o tempo de transporte ferroviário na ida ao porto	TRIA(28.8,32,35.2)	horas
T_FER_v	Expressão que define o tempo de transporte ferroviário na volta do porto	TRIA(21.6,24,26.4)	horas
T_NAV_e	Expressão que define o tempo para navegação de entrada no porto	TRIA(1.8,2.0,2.2)	horas
T_NAV_s	Expressão que define o tempo para navegação de saída no porto	TRIA(1.8,2.0,2.2)	horas
T_ATR	Expressão que define o tempo para atracação do navio	TRIA(0.675,0.75,0.825)	horas
T_DES	Expressão que define o tempo para desatracação do navio	TRIA(0.9,1.0,1.1)	horas
T_CG_e	Expressão que define o tempo para pré-carregamento do navio	TRIA(1.35,1.5,1.65)	horas
T_CG_s	Expressão que define o tempo para pós-carregamento do navio	TRIA(0.9,1.0,1.1)	horas
T_MUD	Expressão que define o tempo para mudança entre os porões de armazenamento dos navios	TRIA(0.225,0.25,0.275)	horas

dos navios seguem também a distribuição triangular, por melhor representar a variabilidade dos processos, considerando que a capacidade efetiva pode sofrer oscilações de $\pm 10\%$. Já as atividades das estruturas de carga e descarga das composições seguem a distribuição normal ($NORM(\mu, \sigma)$), que considera a capacidade efetiva como média e um desvio padrão também de 10%. O cálculo das capacidades efetivas utilizadas nas distribuições é feito realizando a conversão de minutos para horas, como mostra as seguintes equações:

$$Cap_DCAM_A = \frac{2.5}{60} = 0.042 \text{ h/cam} \quad (5.5)$$

$$Cap_DCAM_B = \frac{3.0}{60} = 0.05 \text{ h/cam} \quad (5.6)$$

$$Cap_CVAG_A = Cap_CVAG_B = \frac{9.8}{60} = 0.163 \text{ h/vagao} \quad (5.7)$$

$$Cap_DVAG_A = Cap_DVAG_B = \frac{2.5}{60} = 0.042 \text{ h/cjt de vagoes} \quad (5.8)$$

$$Cap_CNAV_A = \frac{C_NAV}{\frac{POR}{1800}} = 1.944 \text{ h/porao} \quad (5.9)$$

$$Cap_CNAV_B = \frac{C_NAV}{\frac{POR}{1500}} = 2.333 \text{ h/porao} \quad (5.10)$$

Tabela 5.5: Cálculo de expressões probabilísticas utilizadas como parâmetros de entrada do modelo de simulação

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
$DCAM_k$	Expressão que define o tempo de descarga dos caminhões no terminal de carga, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	TRIA(0.038,0.042,0.046) (A) e TRIA(0.045,0.050,0.055) (B)	horas
$CVAG_k$	Expressão que define o tempo de carga dos vagões no terminal de carga, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	NORM(0.163,0.016)	horas
$DVAG_k$	Expressão que define o tempo de descarga dos vagões no terminal portuário, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	NORM(0.042,0.004)	horas
$CNAV_k$	Expressão que define o tempo de carga dos navios por porão no terminal portuário, para cada grupo de <i>commodity</i> (k)	TRIA(1.75,1.944,2.139) (A) e TRIA(2.10,2.333,2.567) (B)	horas

Diante dos parâmetros apresentados nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5, utiliza-se a técnica de balanceamento do sistema para calcular os demais parâmetros de entrada do modelo de simulação. Para que o sistema logístico esteja em equilíbrio, deve-se manter o fluxo de produtos à taxas semelhantes ao longo de todo o processo. Desta forma, o volume de entidades temporárias que deverão chegar ao sistema e o dimensionamento da estruturas de carga e descarga serão suficientes para que a meta de exportação possa ser atingida. Os parâmetros que serão calculados a seguir são apresentados na Tabela 5.6.

Para calcular o percentual de chegada dos navios, adotou-se como dado de entrada que 80% dos navios que chegam ao porto são de carga única e 20% são de carga mista. Dos navios de carga mista, 70% de sua capacidade transporta produtos do tipo A e os outros 30% transporta produtos do tipo B. Para determinar quais os percentuais de navios de carga única que transportam produtos do tipo A e do tipo B deve-se, inicialmente, definir qual a quantidade de produto de cada tipo é transportada pelos navios mistos. Para isso, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$QExp_{misto,A} = \sum Meta_k * 0.2 * 0.7 = 350000 \text{ t} \quad (5.11)$$

$$QExp_{misto,B} = \sum Meta_k * 0.2 * 0.3 = 150000 \text{ t} \quad (5.12)$$

Tabela 5.6: Cálculo de alguns parâmetros de entrada do modelo de simulação utilizando a técnica de balanceamento do sistema

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
P_NAV_{xk}	Percentual de navios do tipo de carga (x) e que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	46% Carga única (A), 34% Carga única (B) e 20% carga mista	%
P_CAM_k	Percentual de caminhões que transportam produtos do grupo de <i>commodity</i> (k)	60% (A) e 40% (B)	%
TX_CAM	Expressão que define a taxa de chegada dos caminhões no terminal de carga	NORM(0.175,0.018)	horas
TX_NAV	Expressão que define a taxa de chegada dos navios no porto	TRIA(102.816,120.96,139.104)	horas
EST_CAM_k	Número de estruturas de descarga de caminhões para o grupo de <i>commodity</i> (k)	1 (A) e 1 (B)	unidade
EST_CAR_k	Número de estruturas de carregamento de vagões para o grupo de <i>commodity</i> (k)	1 (A) e 1 (B)	unidade
EST_DES_k	Número de estruturas de descarga de vagões para o grupo de <i>commodity</i> (k)	1 (A) e 1 (B)	unidade
$SHIP_k$	Número de <i>shiploaders</i> que carregam o grupo de <i>commodity</i> (k)	1 (A) e 1 (B)	unidade
BER	Número de berços de atracação	1	unidade

Para obter um sistema balanceado, deve-se exportar a meta de cada produto. Desta forma, a quantidade total exportada pelos navios de carga única dos produtos A ($QExp_{unico,A}$) e B ($QExp_{unico,B}$) são, respectivamente:

$$QExp_{unico,A} = Meta_A - QExp_{misto,A} = 1500000 - 350000 = 1150000 \text{ t} \quad (5.13)$$

$$QExp_{unico,B} = Meta_B - QExp_{misto,B} = 1000000 - 150000 = 850000 \text{ t} \quad (5.14)$$

Transformando essas quantidades em percentuais tem-se, portanto, que o percentual de chegadas dos navios é dado por:

$$P_NAV_{unico,A} = \frac{QExp_{unico,A}}{Meta_A + Meta_B} = 46\% \quad (5.15)$$

$$P_NAV_{unico,B} = \frac{QExp_{unico,B}}{Meta_A + Meta_B} = 34\% \quad (5.16)$$

$$P_NAV_{misto} = 20\% \quad (5.17)$$

Utilizando o mesmo conceito de balanceamento do sistema, o percentual de chegada dos ca-

minhões que transportam cada tipo de produto (k), deve seguir também a quantidade necessária para atendimento à meta de exportação. Desta forma, tem-se que:

$$P_CAM_A = \frac{\frac{Meta_A}{C_CAM_A}}{\frac{Meta_A}{C_CAM_A} + \frac{Meta_B}{C_CAM_B}} = 60\% \quad (5.18)$$

$$P_CAM_B = \frac{\frac{Meta_B}{C_CAM_B}}{\frac{Meta_A}{C_CAM_A} + \frac{Meta_B}{C_CAM_B}} = 40\% \quad (5.19)$$

Para definir as taxas de chegada dos navios e caminhões, que são as entidades temporárias do sistema, têm-se inicialmente que definir o total dessas entidades que devem chegar ao sistema durante o período, de forma a cumprir a meta de exportação. Para isso, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$QNav = \frac{\sum Meta_k}{C_NAV} = \frac{2500000}{35000} = 71.42 \text{ nav/ano} \quad (5.20)$$

$$QCam = \sum_k \frac{Meta_k}{C_NAV_k} = \frac{1500000}{50} + \frac{1000000}{50} = 50000 \text{ cam/ano} \quad (5.21)$$

Diante disso, pode-se então calcular o intervalo de chegadas para os navios (IC_Nav) e para os caminhões (IC_Cam):

$$IC_Nav = \frac{8640}{QNav} = 120.96 \text{ h} \quad (5.22)$$

$$IC_Cam = \frac{8760}{QNav} = 0.1752 \text{ h} \quad (5.23)$$

Nota-se que, para o caso específico dos navios, o seu intervalo de chegada ao longo do período foi reduzido de 8760 horas anuais para 8640 horas. Isso se deve ao fato de que, como já ressaltado anteriormente na subseção 5.1.3, o modelo deverá identificar qual a carga a ser transportada por um navio cinco dias antes de sua chegada ao porto, para o cálculo da demanda de um determinado produto. Portanto, o período para chegada dos mesmos sofreu um decréscimo de 120 horas (cinco dias).

Assumiu-se que a taxa de chegada dos navios TX_NAV segue uma distribuição triangular, sendo a moda o IC_Nav e os valores mínimos e máximos limitados a $\pm 10\%$. Já a taxa de chegada dos caminhões (TX_CAM) segue uma distribuição normal, sendo a média o IC_Cam

e desvio padrão de 10% sobre este valor. Esses valores podem variar de acordo com cada sistema logístico.

Por fim, os últimos parâmetros de entrada a serem determinados para a execução do modelo de simulação dizem respeito ao dimensionamento das estruturas de carga e descarga dos veículos de transporte, cujas quantidades estão apresentadas na Tabela 5.6.

Para dimensionar o número de estruturas necessárias para cada atividade do processo, ressaltando que essas estruturas de carga e descarga são de uso exclusivo para cada tipo de produto deve-se, inicialmente, analisar qual a taxa média de utilização desses recursos.

Para atender à meta de exportação anual dos produtos, o fluxo de produtos (λ_A e λ_B) ao longo do sistema logístico deve ser:

$$\lambda_A = \frac{Meta_A}{8760} = 171.23 \text{ t/h} \quad (5.24)$$

$$\lambda_B = \frac{Meta_B}{8760} = 114.15 \text{ t/h} \quad (5.25)$$

Em um sistema balanceado, têm-se que o fluxo de produtos deve ser semelhante ao longo de todo o processo. Desta forma, as estruturas de carga e descarga devem ter capacidade no mínimo suficiente para manusear esse fluxo de produtos determinado.

Utilizando as capacidades das estruturas de descarga de caminhões já apresentadas anteriormente, tem-se que:

$$Cap_DCAM_A = \frac{0.042 \text{ h}}{cam} = \frac{0.042 \text{ h}}{50t} = \frac{0.00084h}{t} = 1190 \text{ t/h} \quad (5.26)$$

$$Cap_DCAM_B = \frac{0.050 \text{ h}}{cam} = \frac{0.05 \text{ h}}{50t} = \frac{0.001h}{t} = 1000 \text{ t/h} \quad (5.27)$$

Portanto, a taxa de utilização das estruturas de descarga dos caminhões ($TX_Ut_{DCAM,A}$ e $TX_Ut_{DCAM,B}$) serão de:

$$TX_Ut_{DCAM,A} = \frac{\lambda_A}{Cap_DCAM_A} = \frac{171.23 \text{ t/h}}{1190 \text{ t/h}} = 0.144 \quad (5.28)$$

$$TX_Ut_{DCAM,B} = \frac{\lambda_B}{Cap_DCAM_B} = \frac{114.15 \text{ t/h}}{1000 \text{ t/h}} = 0.114 \quad (5.29)$$

Nota-se que a taxa de utilização de ambas as estruturas é muito baixa (14.4% e 11.4%). Portanto, pode-se usar apenas uma estrutura de descarga de caminhões para cada um dos produtos.

Realizando os cálculos de maneira análoga para as demais estruturas de carga e descarga, as capacidades das estruturas são:

$$Cap_CVAG_A = Cap_CVAG_B = \frac{0.163 h}{vagio} = \frac{0.163 h}{70t} = \frac{0.00233h}{t} = 429.55 t/h \quad (5.30)$$

$$Cap_DVAG_A = Cap_DVAG_B = \frac{0.042 h}{cjt\ de\ vagoes} = \frac{0.042 h}{2 * 70t} = \frac{0.0003h}{t} = 3333.33 t/h \quad (5.31)$$

$$Cap_CNAV_A = \frac{1.944 h}{porao} = \frac{1.944 h}{3500t} = \frac{0.000555h}{t} = 1801.80 t/h \quad (5.32)$$

$$Cap_CNAV_B = \frac{2.333 h}{porao} = \frac{2.333 h}{3500t} = \frac{0.000667h}{t} = 1499.25 t/h \quad (5.33)$$

As taxas de utilização das estruturas são:

$$TX_Ut_{CVAG,A} = \frac{\lambda_A}{Cap_CVAG_A} = \frac{171.23 t/h}{429.55 t/h} = 0.40 \quad (5.34)$$

$$TX_Ut_{CVAG,B} = \frac{\lambda_B}{Cap_CVAG_B} = \frac{114.15 t/h}{429.55 t/h} = 0.26 \quad (5.35)$$

$$TX_Ut_{DVAG,A} = \frac{\lambda_A}{Cap_DVAG_A} = \frac{171.23 t/h}{3333.33 t/h} = 0.05 \quad (5.36)$$

$$TX_Ut_{DVAG,B} = \frac{\lambda_B}{Cap_DVAG_B} = \frac{114.15 t/h}{3333.33 t/h} = 0.034 \quad (5.37)$$

$$TX_Ut_{CNAV,A} = \frac{\lambda_A}{Cap_CNAV_A} = \frac{171.23 t/h}{1801.80 t/h} = 0.095 \quad (5.38)$$

$$TX_Ut_{CNAV,B} = \frac{\lambda_B}{Cap_CNAV_B} = \frac{114.15 t/h}{1499.25 t/h} = 0.076 \quad (5.39)$$

Nota-se, portanto, que todas as estruturas de carga e descarga possuem taxa de utilização muito baixa. Portanto, o sistema logístico será dimensionado com apenas uma estrutura para cada tipo de atividade e de produto.

Para dimensionar o número de berços necessários, sabe-se que o intervalo de chegada entre navios (IC_Nav) é de 120.96 horas, como já calculado anteriormente. O tempo médio que um navio permanece atracado no porto (TP_Nav) é dado por:

$$TP_Nav = T_NAV_c + T_NAV_e + T_ATR + T_DES + T_CG_c + T_CG_e + T_MUD * POR + (CNAV_A * 0.6 + CNAV_B * 0.4) * POR$$

$$TP_Nav = 2.0 + 2.0 + 0.75 + 1.0 + 1.5 + 1.0 + 0.25 * 10 + (1.944 * 0.6 + 2.333 * 0.4) * 10$$

$$TP_Nav = 31.746 \text{ h} \quad (5.40)$$

A taxa de utilização do berço é dada por:

$$TX_Ut_B = \frac{TP_Nav}{IC_Nav} = \frac{31.746}{120.96} = 0.26 \quad (5.41)$$

Nota-se, portanto, que um berço também é suficiente para realizar o carregamento de todos os navios, visto que sua taxa de utilização também é baixa.

5.4.2 Tratamento de controles do sistema logístico

Como já citado anteriormente, os controles são as variáveis de entrada do modelo de simulação que terão seus valores atualizados a cada iteração do modelo de otimização via simulação, sendo elas:

- CAP_CARG_k : capacidade do armazém do terminal de carga para a *commodity* (k);
- CAP_PORT_k : capacidade do armazém do terminal portuário para a *commodity* (k);
- r : tipo de composição baseado no seu número de vagões;
- $NCOMP_r$: número de composições do tipo (r).

Contudo, esses recursos são limitados, ou seja, possuem restrições mínimas e máximas de capacidade. Dessa forma, deve-se inicialmente identificar quais são os valores possíveis para cada uma dessas variáveis, de modo a manter a operacionalidade do sistema.

Utilizando os dados apresentados na seção anterior, observa-se que, para o terminal de carga, são descarregadas 50 t de produto por vez, em cada caminhão, enquanto em uma composição são carregadas, para o menor tipo de composição possível (35 vagões), 2450 t. Em contrapartida, para o terminal portuário, são descarregados, no mínimo, 2450 t em uma composição, enquanto um navio carrega 35000 t de produto. Dessa forma, sabe-se que o sistema deve possuir armazéns para amortecer as flutuações entre a carga e descarga de produtos nos terminais.

Após a execução de vários testes com o modelo de simulação, foram definidos que os armazéns devem possuir uma capacidade mínima de 1% da meta de exportação e uma capacidade máxima de 10%, para que o sistema possa ser operacionalizado. Limites maiores que 10% podem ser aplicados, entretanto, geram custos adicionais desnecessários, visto que os tempos de fila em todo o sistema já permanecem mínimos e a meta de exportação já é atingida com esta solução. Desta forma, têm-se que os limites dos armazéns nos terminais intermodais são dados por:

$$15000t \leq CAP_CARGA \leq 150000t \quad (5.42)$$

$$10000t \leq CAP_CARGB \leq 100000t \quad (5.43)$$

$$15000t \leq CAP_PORTA \leq 150000t \quad (5.44)$$

$$10000t \leq CAP_PORTB \leq 100000t \quad (5.45)$$

Para definir qual o número de composições que podem ser utilizadas para cada um dos tipos de trens, deve-se inicialmente verificar qual quantidade mínima de composições necessárias para atender à meta de exportação. Assim, deve-se definir o conjunto de composições que atendem ao fluxo de produtos no sistema, que é dado por:

$$\lambda = \lambda_A + \lambda_B = 171.23 + 114.15 = 285.38 \text{ t/h} \quad (5.46)$$

O fluxo médio de produtos para as composições pode ser calculado pela fórmula:

$$\lambda_{COMP} = \frac{r * C_VAG}{TC_{COMP} * NCOMP_r} \quad (5.47)$$

Onde TC_{COMP} é o tempo de ciclo médio da composição, que é dado por:

$$TC_{COMP} = T_FER_i + T_FER_v + I_TR_i + I_TR_v + r * C_VAG +$$

$$ABS\left(\frac{r}{C_VIR_k}\right) * D_VAG_k \quad (5.48)$$

Utilizando essas fórmulas, elaborou-se a Tabela 5.7, que apresenta algumas soluções para o problema em estudo. Nota-se que algumas soluções são consideradas inviáveis, pois o λ_{COMP} é inferior ao λ , o que significa que aquela configuração não possui capacidade suficiente para escoar a meta de exportação desejada no modelo. Vale ressaltar ainda que qualquer número de composições acima dos valores apresentados na tabela é viável para o sistema. Contudo, estas soluções poderão aumentar os custos do sistema logístico, visto que a taxa de utilização das composições será muito pequena.

Tabela 5.7: Análise do número de composições viáveis para o sistema

r (n° vagões)	Capacidade da Composição $r * C_VAG$ (t)	TC_{COMP} (h)	$NCOMP_r$ (unidades)	λ_{COMP} (t/h)	Solução
35	2450	65.961	6	222.86	Inviável
35	2450	65.961	7	260.00	Inviável
35	2450	65.961	8	297.14	Viável
35	2450	65.961	9	334.29	Viável
35	2450	65.961	10	371.43	Viável
50	3500	68.7	5	254.73	Inviável
50	3500	68.7	6	305.68	Viável
50	3500	68.7	7	356.62	Viável
50	3500	68.7	8	407.57	Viável
70	4900	72.38	4	270.79	Inviável
70	4900	72.38	5	338.49	Viável
70	4900	72.38	6	406.19	Viável

Desta forma, serão adotadas como opções para definição do número de composições do sistema as oito soluções viáveis apresentadas na Tabela 5.7.

5.5 Definição de Cenário Inicial

Após a definição dos parâmetros de entrada e dos controles que serão utilizados no modelo de otimização via simulação, foi definido um cenário inicial viável, que atenda à meta de exportação das *commodities*, e que será utilizado como solução inicial para as próximas etapas do processo de otimização via simulação.

Dessa forma, os valores iniciais para os controles são:

- CAP_CARG_A : 150000 t;
- CAP_CARG_B : 100000 t;

- CAP_PORT_A : 150000 t;
- CAP_PORT_B : 100000 t;
- r : tipo 1 (35 vagões);
- $NCOMP_1$: 8 unidades.

A simulação do sistema logístico utilizando este cenário inicial, com os parâmetros de entrada já especificados, retorna os resultados apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resultados estatísticos do modelo de simulação para o cenário inicial

Rep	Qtde Exp A (t)	Qtde Exp B (t)	Qtde Total Exp (t)	% Exp A (t)	% Exp B (t)	% Total Exp (t)	EM Carga A (t)	EM Carga B (t)	EM Porto A (t)	EM Porto B (t)	TC Nav (h)	TC Cam (h)	Qtde Desc Porto A (t)	Qtde Desc Porto B (t)
1	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	49462	11965	96889	84526	31.73	0.04	1528800	1019200
2	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	35013	13184	116798	87549	31.71	0.04	1572900	1036350
3	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	47408	12010	103549	86093	31.72	0.04	1531250	1021650
4	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	31034	23349	122469	88670	31.75	0.04	1570450	1036350
5	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	79786	9656	77260	79793	31.71	0.04	1514100	1011850
6	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	33173	25833	116279	87728	31.76	0.04	1563100	1036350
7	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	41321	11456	108377	87522	31.74	0.04	1538600	1036350
8	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	34931	13960	114855	87938	31.74	0.04	1565550	1036350
9	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	38535	14773	120616	88461	31.74	0.04	1565550	1036350
10	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	31384	17382	116991	88077	31.72	0.04	1575350	1036350
Média	1519000	987000	2506000	1.01	0.99	1.00	42205	15357	109408	86636	31.73	0.04	1552565	1030715

A Tabela 5.8 apresenta os dados da saída da simulação (*outputs*) que serão utilizados como ferramentas de análise do sistema para o modelo de otimização que será desenvolvido na próxima etapa deste trabalho. Será considerado que o modelo atendeu à meta de exportação quando a quantidade exportada para cada tipo de *commodity* for superior a 95% da meta anual.

Por meio da análise das estatísticas apresentadas, nota-se que o sistema, utilizando as configurações do cenário inicial, atendeu à meta de exportação tanto para o produto A (*Qtde Exp A*) quanto para o produto B (*Qtde Exp B*). A Tabela apresenta estes valores em toneladas e em percentual. Nota-se também que o tempo de ciclo médio dos navios (*TC_NAV*) é o equivalente ao (*TP_Nav*), calculado na equação 5.40 da seção anterior. Portanto, o navio não ficou aguardando em nenhum momento a disponibilidade de recursos ou de produtos.

De maneira análoga, pode-se dizer que os caminhões também não aguardaram a disponibilidade das estruturas de descarga ou dos armazéns, visto que o tempo de ciclo médio dos caminhões (*TC_CAM*), que é de 0.04 horas, também é equivalente ao tempo necessário para a execução da única atividade que essas entidades temporárias aguardam no sistema, que é a descarga dos produtos. O tempo de permanência médio dos caminhões para a descarga dos mesmos (*TP_Cam*)

é dado pela média das atividades de descarga dos produtos, ou seja:

$$\begin{aligned}
 TP_Cam &= DCAM_A * P_CAM_A + DCAM_B * P_CAM_B \\
 &= 0.042 * 0.6 + 0.05 * 0.4 = 0.0452 \text{ h}
 \end{aligned}
 \tag{5.49}$$

Observa-se também que a quantidade de produto descarregada no armazém portuário, tanto para A quanto para B (*Qtde Desc Porto A* e *Qtde Desc Porto B*) são superiores à quantidade exportada, ou seja, todo o sistema logístico conseguiu escoar a produção necessária para a exportação até o terminal portuário.

A Tabela 5.8 apresenta ainda os estoques médios de cada um dos armazéns existentes no sistema (*EM Carga A*, *EM Carga B*, *EM Porto A* e *EM Porto B*). Nota-se que os estoques, apesar da viabilidade da solução, estão completamente desbalanceados. Isso fica ainda mais evidente ao analisar o histograma, apresentado na Figura 5.8.

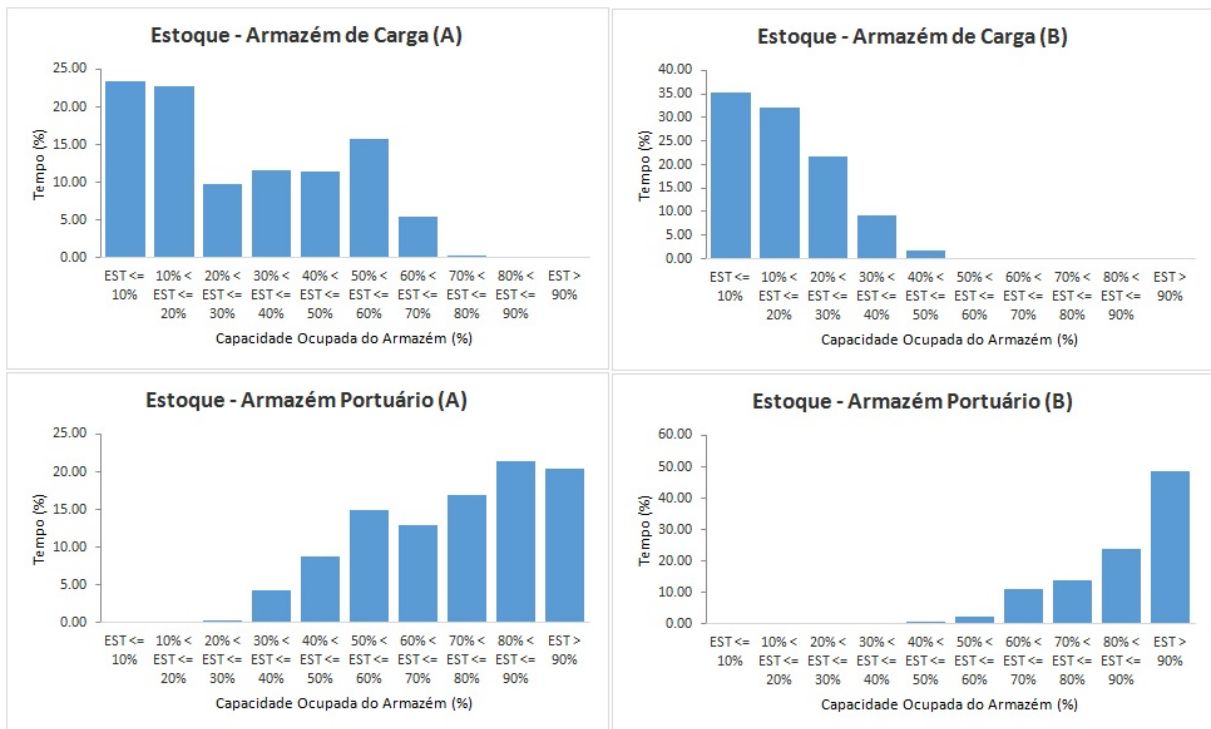


Figura 5.8: Histogramas dos estoques do cenário inicial
 Fonte: Elaborado pela Autora

Observa-se que os estoques dos armazéns de carga permaneceram baixos a maior parte do tempo, para ambas as *commodities*. Para o produto A o estoque médio calculado foi de 42205 t, cerca de 28% de sua capacidade, enquanto para o produto B o estoque médio foi ainda menor, 15357 t, cerca de 15% de sua capacidade. Já os estoques dos armazéns portuários permaneceram cheios na maior parte do tempo, e não ficaram vazios em nenhum momento. O armazém portuário

do produto B foi o que permaneceu mais tempo cheio, sendo seu estoque médio de 86636 t, cerca de 87% de sua capacidade. O armazém de B, por sua vez, permaneceu em média com 109408 t, cerca de 73% de sua capacidade.

Nota-se, portanto que, apesar da viabilidade desta solução, os armazéns estão desbalanceados, sendo que os mesmos podem estar gerando custos logísticos superiores ao necessário para este sistema. O ideal é que os estoques dos armazéns permaneçam em torno do valor médio de sua capacidade, pois assim, não haverá falta ou excesso de produtos nos armazéns na maior parte do tempo. Diversos fatores podem interferir na qualidade dos estoques dos armazéns, tais como: a capacidade dos armazéns, o tamanho e número de composições. Vale ressaltar ainda que todas estas variáveis estão correlacionadas, ou seja, ao se alterar uma determinada variável, todas as outras serão impactadas por essa alteração. Por exemplo, ao aumentar apenas o número de composições ferroviárias no sistema, um armazém que anteriormente era considerado pequeno pode então ter seu tamanho adequado para essa nova configuração.

Diante do exposto, a aplicação de um modelo de otimização permitirá melhorar essa solução, buscando dimensionar os armazéns e o tipo e número de composições da melhor forma possível, visando reduzir os custos inerentes ao processo logístico, tais como os custos de manutenção dos armazéns e das locomotivas. A etapa de otimização aplicada ao modelo de simulação desenvolvido será tratada no próximo capítulo deste trabalho.

Capítulo 6

Modelo de Otimização Via Simulação

Esse capítulo tem como objetivo mostrar como técnicas de otimização via simulação podem ser aplicadas a problemas logísticos como o apresentado nesse estudo, bem como sua eficiência na busca de soluções.

Será apresentado um modelo de otimização via simulação que será utilizado para a minimização dos custos logísticos referentes ao dimensionamento dos armazéns e das composições para o sistema em estudo.

Para isso, foram utilizadas duas ferramentas de otimização via simulação: uma disponível no pacote de simulação utilizado e a outra desenvolvida pela autora utilizando uma heurística simples.

Inicialmente, serão apresentadas algumas generalidades sobre o modelo de otimização via simulação, destacando também quais os custos logísticos relativos aos recursos que serão otimizados neste trabalho.

Posteriormente, apresenta-se o processo de desenvolvimento do modelo de otimização via simulação utilizando um otimizador integrado a um pacote de simulação disponível no mercado, destacando suas características principais e a solução obtida por esta ferramenta. Na próxima seção, empregou-se uma heurística desenvolvida para a resolução deste problema, apresentando-se também a melhor solução obtida com este modelo. Por fim, estas ferramentas serão analisadas e seus resultados serão comparados, visando identificar a adequação das mesmas à resolução de problemas logísticos como o estudado.

Vale ressaltar que para ambos os modelos de otimização via simulação desenvolvidos foram realizadas 10 replicações do modelo de simulação sempre que o mesmo é executado. O intervalo de confiança dos resultados foram construídos para o nível de 95% de confiança.

6.1 Generalidades do modelo de otimização via simulação

O modelo de otimização via simulação desenvolvido neste trabalho deverá ser capaz de avaliar a resposta da simulação atual e compará-la com os resultados de simulações anteriores, para gerar um novo conjunto de variáveis a serem avaliadas pelo modelo de simulação. Após a definição de um novo conjunto de variáveis, o modelo irá chamar o simulador para obter a função objetivo desejada. Este processo cíclico irá acontecer até satisfazer a um determinado critério de parada. O modelo de otimização irá também armazenar o melhor conjunto de variáveis obtido ao longo de todo o processo. Este conjunto de variáveis será considerado "ótimo" para o problema em estudo.

O modelo será formulado de acordo com a metodologia proposta por Fu (2002), já explicitada anteriormente. As variáveis de decisão do modelo de otimização são os controles do sistema em estudo, a saber:

- CAP_CARG_k : capacidade do armazém do terminal de carga para o grupo de *commodity* (k);
- CAP_PORT_k : capacidade do armazém do terminal portuário para o grupo de *commodity* (k);
- r : identificação do tipo de composição, em função de seu número de vagões;
- $NCOMP_r$: número de composições do tipo (r).

O objetivo do modelo de otimização é minimizar os custos dos armazéns e das composições ferroviárias, e, conseqüentemente, os recursos disponíveis. Para isso, serão adotados custos relativos para esses recursos, que serão considerados parâmetros do modelo, onde:

- $CFCG_k$: Custo fixo do armazém no terminal de carga para o grupo de *commodity* (k);
- $CFPT_k$: Custo fixo do armazém no terminal portuário para o grupo de *commodity* (k);
- $CVCG_k$: Custo variável do armazém no terminal de carga por tonelada de produto para o grupo de *commodity* (k);
- $CVPT_k$: Custo variável do armazém no terminal portuário por tonelada de produto para o grupo de *commodity* (k);
- $CtCOMP_r$: Custo por composição do tipo (r);

A Tabela 6.1 apresenta os custos relativos que serão adotados para o problema em estudo. Vale ressaltar, novamente, que esses dados também são estimados e têm o objetivo exclusivo de mostrar a aplicabilidade da técnica.

Tabela 6.1: Custos relativos adotados para o problema em estudo

Parâmetro	Valor	Unidade
$CFCG_A$	1000000	\$
$CFCG_B$	1000000	\$
$CFPT_A$	1000000	\$
$CFPT_B$	1000000	\$
$CVCG_A$	10	\$/t
$CVCG_B$	10	\$/t
$CVPT_A$	10	\$/t
$CVPT_B$	10	\$/t
$CtCOMP_1$	6000000	\$/composicao
$CtCOMP_2$	9000000	\$/composicao
$CtCOMP_3$	13000000	\$/composicao

Desse modo, a função objetivo é dada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \min fo = & \sum_{k=0}^1 CFCG_k + CFPT_k + CAP_CARG_k * CVCG_k \\ & + CAP_PORT_k * CVPT_k + NCOMP_r * CtCOMP_r \end{aligned} \quad (6.1)$$

Como restrições do modelo, as variáveis de decisão estão sujeitas às limitações de capacidade expressas nas seguintes equações:

$$CAP_CG_{k_{min}} \leq CAP_CARG_k \leq CAP_CARG_{k_{max}} \quad k = 0, 1 \quad (6.2)$$

$$CAP_PORT_{k_{min}} \leq CAP_PORT_k \leq CAP_PORT_{k_{max}} \quad k = 0, 1 \quad (6.3)$$

Os valores mínimos e máximos para a capacidade dos armazéns já foram apresentados no capítulo anterior, nas equações 5.42, 5.43, 5.44 e 5.45, sendo os limites mínimos e máximos de 1% e 10% da meta de exportação, respectivamente.

Além das restrições de capacidade, o conjunto de variáveis deve permitir atingir, no mínimo, 95% da meta de exportação para cada grupo de *commodity* k . Logo, têm-se mais uma restrição no modelo de otimização, dada pela equação:

$$exp_k \geq 0.95 * META_k \quad k = 0, 1 \quad (6.4)$$

Onde exp_k é o volume exportado para cada *commodity* k .

Outra restrição diz respeito ao volume de produto que foi escoado pelo sistema logístico até o terminal portuário. A quantidade de produto exportada pelo sistema logístico deve ser equivalente à quantidade que é descarregada no terminal portuário, com desvios de $\pm 5\%$. Essa restrição visa garantir o balanceamento do sistema. A restrição é dada pela seguinte equação:

$$0.95 * exp_k \leq desc_k \leq 1.05 * exp_k \quad k = 0, 1 \quad (6.5)$$

Onde $desc_k$ é o volume descarregado no terminal portuário para cada *commodity* k .

Além dessas restrições, as entidades temporárias do sistema não podem aguardar por muito tempo a disponibilidade de recursos, principalmente os navios, já que o atraso no seu carregamento acarreta multas onerosas. Dessa forma, convencionou-se que um tempo aceitável de espera para os caminhões é de até 1 hora e para os navios é de até 12 horas. Dessa forma, o tempo de ciclo dos caminhões (TC_{CAM}) e o tempo de ciclo dos navios (TC_{NAV}) devem respeitar as seguintes limitações:

$$TC_{CAM} \leq 1 + TP_Cam \quad (6.6)$$

$$TC_{NAV} \leq 12 + TP_Nav \quad (6.7)$$

Onde TP_Cam é o tempo médio para descarga do caminhão no terminal de carga e TP_Nav é o tempo médio de permanência do navio no porto, calculados nas equações 5.49 e 5.40 do capítulo anterior, respectivamente.

Nota-se que as restrições do modelo de otimização apresentadas nas equações 6.5, 6.6 e 6.7 só podem ser obtidas mediante o uso da simulação, pois elas possuem uma série de componentes estocásticas e não podem ser avaliadas de forma analítica.

Esse modelo de otimização será utilizado para as duas ferramentas de otimização via simulação a serem desenvolvidas nas próximas seções, tendo ainda como solução inicial o cenário apresentado na seção 5.5. Para ambas as ferramentas, após a satisfação de um determinado critério de parada, o conjunto de parâmetros que fornecer o menor custo será a solução encontrada para o problema.

Vale ressaltar que o modelo de otimização irá selecionar apenas um tipo de composição r para ser utilizado a cada rodada de simulação. Desta forma, o modelo de otimização irá selecionar, dentre os três tipos de composição r , aquele que apresenta a melhor solução para o problema, além de definir qual o número de composições a ser utilizado no sistema. As opções para o tipo

e número de composições são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Opções de tipo e número de composições viáveis para o sistema

Tipo r	Nº de vagões	$NCOMP_r$ (unidades)
1	35	8
1	35	9
1	35	10
2	50	6
2	50	7
2	50	8
3	70	5
3	70	6

6.2 Otimização via Simulação utilizando um otimizador disponível em pacote de simulação comercial

A maioria dos pacotes de simulação disponíveis no mercado acoplam outros pacotes com rotinas de otimização para realização de otimização via simulação. Entre esses otimizadores, podem ser citados: o OptQuest, o SimRunner, o RiskOptimizer, o AutoStat, dentre outros. Todos eles operam de forma semelhante. Nessa seção, será descrito o Optquest, que acompanha diversos *softwares* de simulação, tais como: Arena, Anylogic, CSIM 19, FlexSim, Simul8, etc.

O OptQuest é um otimizador integrado a alguns *softwares* de simulação, que permite ampliar o poder de análise do *software*. Um modelo de simulação simples permite avaliar o desempenho do sistema apenas para um cenário, que contém um conjunto de variáveis que foram especificadas. A utilização da ferramenta OptQuest permite pesquisar os melhores cenários dentro do modelo de simulação, mediante a alteração dos valores dessas variáveis, chamadas controles.

O OptQuest realiza a busca de soluções ótimas automaticamente, dentro do modelo de simulação. Para isso, deve-se inicialmente descrever o problema de otimização na ferramenta, destacando: as variáveis de decisão (controles) e seus respectivos limites mínimos e máximos, as respostas a serem obtidas através da simulação, a função objetivo e as restrições. Pode-se também definir uma solução inicial para o problema.

O otimizador utiliza procedimentos heurísticos para encontrar as melhores soluções viáveis dentre todas as soluções possíveis. A solução gerada pelo OptQuest serve como entrada para o modelo de simulação. O *software* de simulação é chamado toda vez que um conjunto diferente de valores para os controles deve ser avaliada. A simulação irá gerar novas informações, chamadas respostas.

O OptQuest avalia as respostas da atual simulação, segundo as restrições e a função objetivo especificadas. Essas informações serão integradas com as respostas das simulações anteriormente executadas, e determina-se um novo conjunto de valores para os controles, que em seguida, são avaliados através da execução do modelo simulação. Esse processo iterativo irá continuar até que algum critério de parada seja satisfeito.

Para o caso deste trabalho, inicialmente, foram especificados na interface do otimizador os controles e as respostas para o problema. Vale ressaltar que os controles de capacidade dos armazéns foram discretizados a cada 1000 t, visando reduzir o tempo de execução do otimizador. Posteriormente, definiu-se o conjunto de restrições e a função objetivo do mesmo, já apresentadas anteriormente. Como critério de parada, o otimizador disponibiliza algumas opções, sendo elas: parada após um número específico de simulações, determinado pelo usuário; parada manual, realizada a qualquer momento pelo usuário; e parada utilizando-se o critério automático, onde o otimizador define o momento de interrupção da otimização. Quando a parada automática é definida, a otimização é interrompida quando o otimizador determina que as novas soluções não são propensas a produzir um melhor valor para a função objetivo. Definiu-se que, nesse estudo, o processo de otimização via simulação será interrompido após uma série de simulações, definidas automaticamente pelo otimizador.

Após descrever todo o problema de otimização, foi solicitada a otimização do mesmo. O cenário inicial apresentado no capítulo anterior foi considerado como solução inicial para o problema. Para essa solução, o custo logístico foi de \$ 57 milhões.

Como resultado da otimização via simulação, foram realizadas 1842 simulações até a satisfação do critério de parada. A Figura 6.1 apresenta o valor encontrado para a função objetivo (custo logístico) ao longo das simulações. Nota-se que esse valor foi decrescendo até encontrar a melhor solução na simulação 817.

Os valores obtidos para os controles foram: 26000t e 41000t para os armazéns do terminal de carga, para as *commodities* A e B, respectivamente; 43000t e 30000t para os armazéns do terminal portuário, para as *commodities* A e B, respectivamente; serão utilizadas 8 composições do tipo 1, com 35 vagões. Esta solução obteve um custo total de \$53.4 milhões. Para obter esse resultado, o modelo de otimização via simulação obteve um custo computacional de 14270 segundos, em uma máquina equipada com processador Intel Core i3, 3.10 GHz, memória interna de 8GB e sistema operacional Windows 7 64 bits.

Os resultados das estatísticas são apresentados na Tabela 6.3. Nota-se que a solução atende à

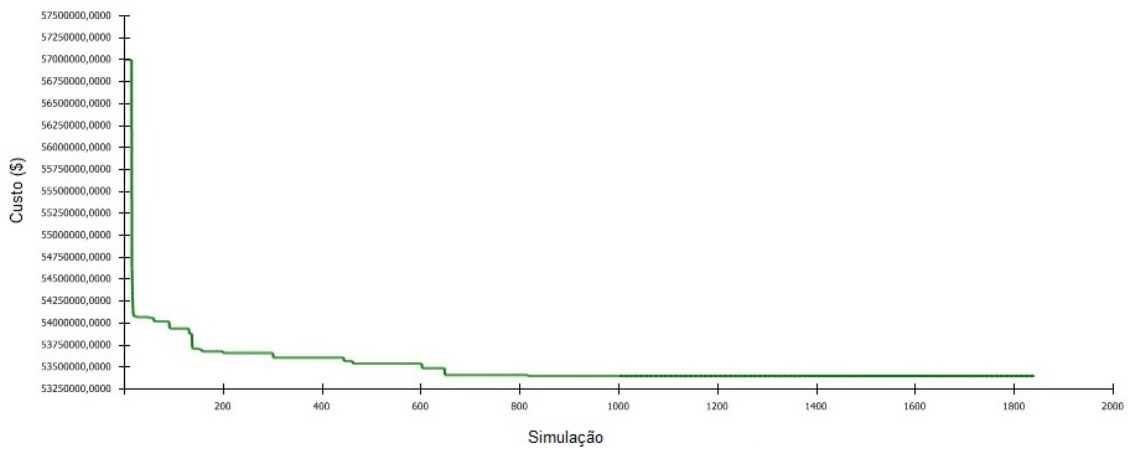


Figura 6.1: Resultados da Otimização via Simulação utilizando o pacote de simulação
 Fonte: Elaborado pela Autora

todas as restrições impostas no modelo de otimização. A Figura 6.2 apresenta o histograma dos estoques dos armazéns. Nota-se que a qualidade da solução, apesar de não estar com todos os estoques na metade da capacidade na maior parte do tempo, a qualidade da solução já melhorou consideravelmente ao comparar com a solução do cenário inicial.

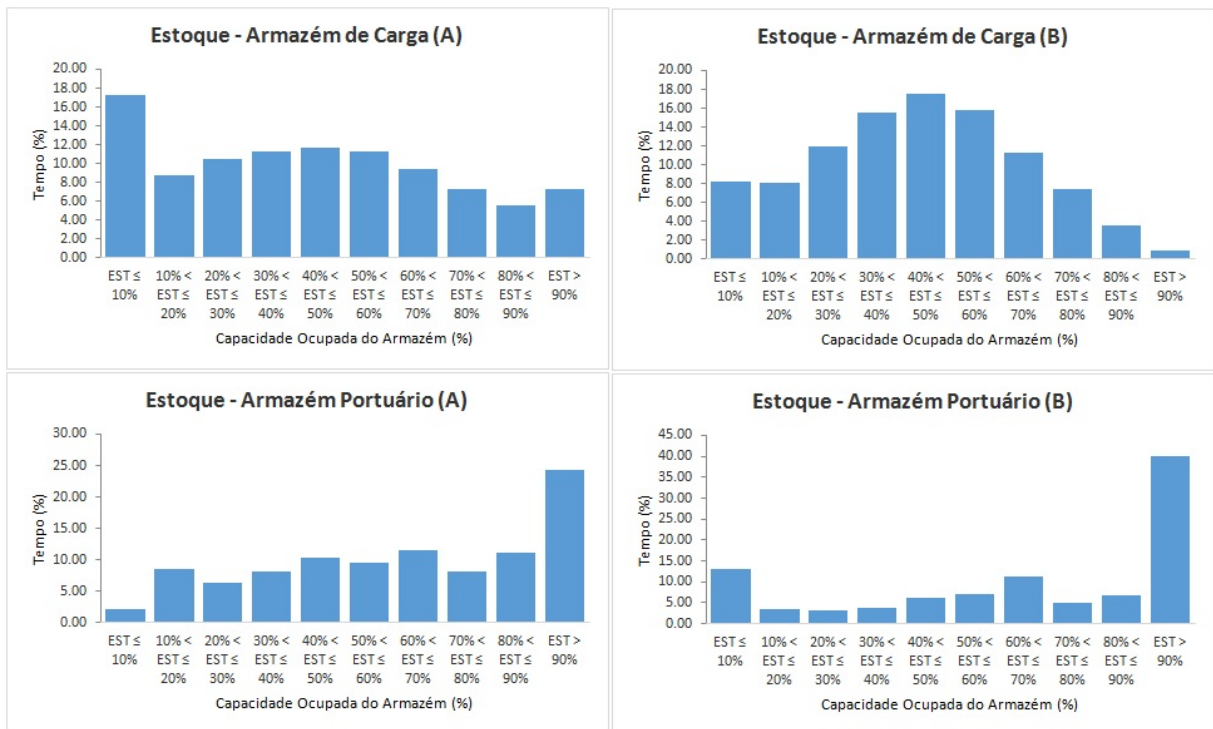


Figura 6.2: Histograma de estoques da solução obtida utilizando o otimizador do pacote de simulação
 Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 6.3: Estatísticas da melhor solução obtida pelo otimizador do pacote de simulação

Rep	Qtde Exp A (t)	Qtde Exp B (t)	Qtde Total Exp (t)	% Exp A (t)	% Exp B (t)	% Total Exp (t)	EM Carga A (t)	EM Carga B (t)	EM Porto A (t)	EM Porto B (t)	TC Nav (h)	TC Cam (h)	Qtde Desc Porto A (t)	Qtde Desc Porto B (t)
1	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	10470	12841	26213	19083	43.29	0.22	1519000	999600
2	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	13631	14229	26763	19339	42.20	0.67	1514100	999600
3	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	9952	20932	27991	19903	42.09	0.19	1514100	999600
4	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	8908	21328	25274	18709	45.28	0.15	1519000	999600
5	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	12912	19124	27800	19960	41.52	1.24	1516550	999600
6	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	16654	20504	28970	20551	40.99	2.33	1504300	989800
7	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	9797	17255	25425	18838	44.36	0.42	1521450	999600
8	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	13255	25454	28799	20523	40.79	0.68	1504300	989800
9	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	10082	20447	27113	19600	42.43	0.36	1516550	999600
10	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	13963	13151	27772	19916	40.88	1.40	1511650	994700
Média	1519000	987000	2506000	1.01	0.99	1.00	11963	18526	27212	19642	42.38	0.77	1514100	997150

6.3 Otimização via Simulação utilizando o método heurístico proposto

Essa seção tem como objetivo mostrar a viabilidade de se desenvolver rotinas próprias para a execução de simulação via otimização para problemas logísticos do tipo do apresentado nesse estudo. O desenvolvimento de heurísticas próprias para a análise de problemas desse tipo pode ser muito útil por dois motivos principais:

- i. sair da dependência da utilização dos otimizadores acoplados aos pacotes comerciais de simulação e assim obter um maior controle do processo de otimização via simulação;
- ii. eventualmente reduzir o tempo de busca de soluções, uma vez que heurísticas específicas podem ser mais eficientes que as genéricas.

O objetivo aqui é apresentar uma heurística simples, mas que permita obter resultados satisfatórios para o problema em estudo. Apesar de não ser possível garantir que os resultados encontrados para o problema sejam ótimos, busca-se resultados próximos da otimalidade.

A Figura 6.3 apresenta o pseudocódigo da heurística desenvolvida para este problema. A estratégia utilizada para a construção da heurística consiste em partir de uma solução viável e proceder à redução dos estoques até a obtenção de um dimensionamento mínimo dos armazéns para cada configuração de composições permitida, de modo a obter aquela solução viável que apresente o menor custo logístico possível dentre todas as soluções analisadas.

O pseudocódigo destaca as principais variáveis presentes na heurística desenvolvida, tais como: o número de produtos do sistema logístico ($prod$); o número de replicações ($nrep$); o número de dados estatísticos apresentados na saída da simulação ($ndados$); a quantidade de diferentes configurações de composições ($nopcao_comp$); a meta de exportação para cada produto ($meta_{prod}$); vetores que armazenam a capacidade dos armazéns do terminal de carga para

```

Entradas: prod, nrep, ndados, nopcao_comp, metak;
Variáveis: carga[prod], porto[prod], comp[2], saissimul[nrep+1][ndados], opção_comp[nopcao_comp][2];

ler_ARQCUSTO.txt;
ler_ARQOPCAO.txt;

//Define configuração inicial
carga_s0k ← metak*0.10;
porto_s0k ← metak*0.10;
comp_s0 ← opcao_comp;

//Seta as config iniciais como as melhores;
carga_bestk ← carga_s0k;
porto_bestk ← porto_s0k;
comp_best ← comp_s0;
sai_best ← saissimul;

cont ← 0;
viabilidade ← 0;

enquanto (cont < nopcao_comp) faça
  comp_atual ← opcao_compcont;
  executa simulação;
  avalia viabilidade;
  se(viabilidade = 1) então
    Define a solução inicial como a atual;
    //1ª etapa: reduz todos os estoques proporcionalmente até inviabilizar a solução:
    perc ← lmax1;
    enquanto (perc ≥ lmin1) faça
      enquanto (viabilidade = 1) faça
        reduz estoques;
        executa simulação;
        avalia viabilidade;
      fim enquanto
      retorna à última configuração de estoques viável
      perc ← perc*0.5;
    fim enquanto
    //2ª etapa: reduz dupla de estoques até inviabilizar a solução:
    perc ← lmax2; //percentual de reducao inicial de 1%
    alteracao ← 1;
    enquanto (perc ≥ lmin2) faça
      enquanto (alteração ≠ 0) faça
        alteracao ← 0;
        Para cada dupla de armazém (carga ou porto) faça
          reduz estoques;
          executa simulação;
          avalia viabilidade;
          se (viabilidade = 1) então: alteracao ← alteracao+1;
          senão: retorna à última configuração de estoques viável
        fim para
      fim enquanto
      perc ← perc*0.5;
    fim enquanto
    //3ª etapa: reduz os armazéns individualmente até inviabilizar a solução:
    perc ← lmax3; //percentual de reducao inicial de 1%
    alteracao ← 1;
    enquanto (perc ≥ lmin3) faça
      enquanto (alteração ≠ 0) faça
        alteracao ← 0;
        Para cada armazém faça
          reduz estoques;
          executa simulação;
          avalia viabilidade;
          se (viabilidade = 1) então: alteracao ← alteracao+1;
          senão: retorna à última configuração de estoques viável
        fim para
      fim enquanto
      perc ← perc*0.5;
    fim enquanto
    //Compara a solução atual e a melhor em termos de custos:
    se(ctotal_atual < ctotal_best) então: troca a solução;
  fim se

  //Verifica se continua testando as demais opções de composição:
  se (diferenca_comp > custo_armazens) então: cont ← nopcao_comp;
  senão cont++;
fim enquanto

```

Figura 6.3: Heurística desenvolvida para o problema
 Fonte: Elaborado pela Autora

cada produto ($carga_s0_{prod}$, $carga_atual_{prod}$ e $carga_best_{prod}$); vetores que armazenam a capacidade dos armazéns do terminal portuário para cada produto ($porto_s0_{prod}$, $porto_atual_{prod}$ e $porto_best_{prod}$); vetores que armazenam o tipo e o número de composições escolhida ($comp_s0_i$, $comp_atual_i$ e $comp_best_i$); e matrizes que armazenam a tabela com todos os dados estatísticos apresentados na saída da simulação para cada replicação e, na sua última linha, para a média das replicações ($saisimul_{nrep+1,ndados}$ e $sai_best_{nrep+1,ndados}$).

A primeira atividade da heurística consiste em realizar a leitura de um arquivo de texto contendo todos os custos logísticos para os armazéns e para as composições. Posteriormente, realiza-se também a leitura de outro arquivo de texto que apresenta uma matriz contendo todas as configurações de composições viáveis para o problema, explicitando o tipo e a quantidade de composições para cada configuração. Essas configurações estão ordenadas em ordem crescente do custo total das composições. A solução inicial ($s0$) e melhor solução ($best$) são inicializadas com os parâmetros do cenário inicial apresentado.

A heurística desenvolvida irá pesquisar, para cada configuração de composições existente, a melhor solução em termos de custos. Para isso, realiza-se o procedimento de redução dos tamanhos dos estoques até obter o menor dimensionamento viável dos mesmos. Na primeira etapa da heurística, realiza-se a redução de todos os estoques proporcionalmente e de maneira simultânea, mediante um determinado percentual de redução. Esse percentual é reduzido à metade toda vez que a solução torna-se inviável para uma tentativa de redução com o percentual atual. Nesta etapa, o percentual de redução inicial ($lmax1$) foi de 10% e o percentual de redução mínimo ($lmin1$) foi de 1%. O mesmo procedimento é feito para as outras etapas. Contudo, na segunda etapa, a redução dos estoques é feita por duplas de estoques, ou seja, é realizada inicialmente a tentativa simultânea de redução dos dois estoques do terminal de carga e, posteriormente, dos dois estoques do terminal portuário. Enquanto a redução de ao menos uma das duas duplas for viável, procede-se com a redução. O percentual de redução inicial ($lmax2$) foi de 1% e o final ($lmin2$) foi de 0.1%. Na terceira etapa, a tentativa de redução dos armazéns é feita individualmente, ou seja, altera-se a capacidade de um dos armazéns por vez. A sequência de tentativa de redução foi os armazéns de carga(A), carga(B), porto(A) e porto(B). Enquanto houver viabilidade na redução de pelo menos um dos armazéns, o processo é continuado. O percentual de redução inicial da terceira etapa ($lmax3$) foi de 10% e o final ($lmin3$) foi de 1%. Ao final das três etapas têm-se uma solução com o menor dimensionamento encontrado para os armazéns para aquela configuração de composições. Essa solução é então comparada com a melhor solução

encontrada até o momento em termos dos custos logísticos totais, tanto dos armazéns como das composições. Caso a solução atual (*atual*) tenha um custo menor que a melhor solução (*best*), essa solução será então substituída. Vale ressaltar que os percentuais de redução inicial e final foram definidos após diversos testes e execuções do modelo, realizados com o intuito de identificar o conjunto de parâmetros que permite obter uma melhor solução.

Visando reduzir o tempo computacional e aumentar a eficiência do algoritmo, antes de se analisar qual a melhor solução para a próxima configuração de composições, analisa-se primeiramente se esta nova configuração permite obter uma solução com menor custo que a melhor solução obtida até o momento. Como as configurações das composições estão ordenadas em ordem crescente de custo total dos trens, este cálculo é feito considerando a seguinte inequação:

$$CtCOMP_{cont+1} - CtCOMP_{cont} > CtARM_{best} \quad (6.8)$$

Onde $CtCOMP_{cont}$ e $CtCOMP_{cont+1}$ são os custos do conjunto de composições da configuração atual e da próxima configuração, respectivamente, e o $CtARM_{best}$ é dado pelo custo total de armazenagem da melhor configuração, incluindo os custos fixos e variáveis dos armazéns. Caso o acréscimo de custo relativo à diferença das duas configurações de locomotivas seja superior ao custo total de armazenagem da melhor solução, nenhuma outra opção de configuração terá custo menor que a melhor solução atual (*best*). Desta forma, pode-se sair do loop. Caso contrário, deve-se continuar com a otimização, procedendo à obtenção da melhor solução para a próxima configuração ($cont + +$).

O método heurístico foi implementado em linguagem de programação C++ e utilizou o mesmo pacote de simulação que foi adotado no modelo de otimização via simulação apresentado na seção 6.2.

Como resultado da otimização via simulação utilizando a heurística apresentada, foram obtidos os seguintes valores para os controles: 39450 t e 26297 t para os armazéns do terminal de carga, para as *commodities* A e B, respectivamente; 44277 t e 29516 t para os armazéns do terminal portuário, para as *commodities* A e B, respectivamente; serão utilizadas 8 composições do tipo 1, com 35 vagões. Esta solução obteve um custo total de \$53.3954 milhões. Foram executadas apenas 35 simulações até a satisfação do critério de parada do modelo. Para obter esse resultado, a heurística proposta obteve um custo computacional de 236.88 segundos.

Tabela 6.4: Estatísticas da melhor solução obtida pela heurística proposta

Rep	Qtde Exp A (t)	Qtde Exp B (t)	Qtde Total Exp (t)	% Exp A (t)	% Exp B (t)	% Total Exp (t)	EM Carga A (t)	EM Carga B (t)	EM Porto A (t)	EM Porto B (t)	TC Nav (h)	TC Cam (h)	Qtde Desc Porto A (t)	Qtde Desc Porto B (t)
1	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	24511	16582	30174	20466	41.18	2.15	1511650	989800
2	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	12834	13990	29079	19796	41.73	0.66	1519000	999600
3	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	23993	18393	30110	20627	40.99	3.16	1501850	989800
4	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	16165	13398	27933	19482	42.21	0.49	1519000	999600
5	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	25718	6977	20827	14480	55.41	0.54	1514100	999600
6	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	9082	15932	23439	18166	46.09	0.84	1511650	999600
7	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	23144	12461	29769	20121	41.21	0.61	1511650	989800
8	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	16476	14012	29869	20171	41.34	0.93	1516550	999600
9	1533000	987000	2520000	1.02	0.99	1.01	13801	13274	28101	19359	42.05	0.46	1519000	999600
10	1498000	987000	2485000	1.00	0.99	0.99	21134	8903	25630	18368	44.00	0.19	1509200	992250
Média	1512000	987000	2499000	1.01	0.99	1.00	18686	13392	27493	19104	43.62	1.00	1513365	995925

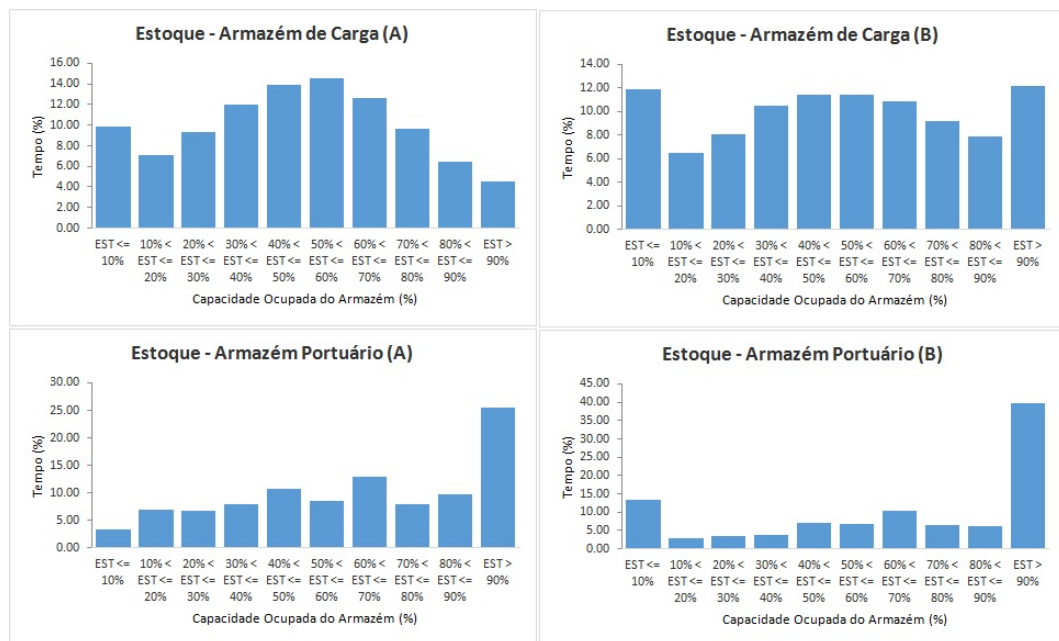


Figura 6.4: Histogramas de estoques da melhor solução obtida pela heurística proposta
Fonte: Elaborado pela Autora

Como pode ser observado na Tabela 6.4, nota-se que a solução encontrada também atendeu à todas as restrições impostas no modelo de otimização, tais como: metas de exportação, capacitação dos armazéns, volume de produtos escoado pelo sistema logístico e tempo de ciclo das entidades.

A Figura 6.4 apresenta o histograma dos estoques dos armazéns. Nota-se também que houve uma pequena melhora na qualidade da solução em comparação à solução obtida pelo otimizador do pacote de simulação, principalmente para o estoque do produto A no terminal de carga, que permaneceu um tempo maior com o volume ocupado equivalente à metade da capacidade do armazém, demonstrando um maior equilíbrio do estoque.

Tabela 6.5: Comparação dos resultados obtidos

Descrição	Solução Inicial	Otimizador do pacote de simulação	Método heurístico
Melhor configuração obtida:	Carga (1) = 150000 t	Carga (1) = 26000 t	Carga (1) = 39450 t
	Carga (2) = 100000 t	Carga (2) = 41000 t	Carga (2) = 26297 t
	Porto (1) = 150000 t	Porto (1) = 43000 t	Porto (1) = 44277 t
	Porto (2) = 100000 t	Porto (2) = 30000 t	Porto (2) = 29516 t
	Tipo de composição (r): 1 Nº Comp. (NCOMP): 8 unidades	Tipo de composição (r): 1 Nº Comp. (NCOMP): 8 unidades	Tipo de composição (r): 1 Nº Comp. (NCOMP): 8 unidades
Custo da solução:	\$57 milhões	\$53.4 milhões	\$53.3954 milhões
Tempo computacional:	-	14270 segundos	236.88 segundos
Total de simulações executadas:	-	1842 (817*)	35

* melhor solução encontrada nesta simulação

6.4 Análise dos resultados obtidos

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos utilizando as ferramentas de otimização via simulação apresentadas neste trabalho. Ela permite também comparar esses resultados com a solução do cenário inicial.

É possível observar que ambas as ferramentas utilizadas para a otimização via simulação permitiram melhorar a solução inicial, havendo uma redução considerável do dimensionamento de todos os armazéns, tanto do terminal de carga quanto do terminal portuário. O tipo e número de composições das melhores soluções para cada método permaneceram os mesmos da solução inicial. Por consequência, nota-se que o custo do sistema logístico foi reduzido de \$57 milhões para aproximadamente \$53,4 milhões em ambas as soluções.

Ao comparar as ferramentas de otimização via simulação utilizadas, os resultados mostram ainda que a adoção de uma heurística simples como a desenvolvida neste trabalho permitiu obter resultados semelhantes ao otimizador do pacote de simulação, porém com um custo computacional extremamente inferior, apenas 1.6% do total gasto pela rotina de otimização do *software* de simulação.

Capítulo 7

Análise de Sensibilidade

Esse capítulo tem como objetivo apresentar uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros do dimensionamento dos recursos logísticos na capacidade de exportação do sistema em estudo. Essas relações irão fornecer algumas considerações importantes acerca do sistema logístico estudado.

Para isso, foram realizadas dois tipos de análise de sensibilidade: tipo e número de composições *versus* capacidade de exportação e tipo e número de composições *versus* velocidade de escoamento.

Para cada uma das análises, é apresentado inicialmente a definição de alguns cenários. As saídas do modelo de simulação para cada um destes cenários são coletadas e dá-se início a análise de sensibilidade do sistema logístico.

7.1 Análise do tipo e número de composições *versus* capacidade de exportação

Para realizar a análise de sensibilidade de uma maneira mais pertinente, as opções de configurações das composições apresentadas na Tabela 6.2 foram estendidas. Dessa forma, mantendo-se todos os demais parâmetros constantes, serão analisados 36 cenários diferentes, alterando apenas o tipo e o número de composições para o sistema logístico estudado. A Tabela 7.1 apresenta os cenários estudados e também a quantidade exportada pelo sistema para cada produto, que é a saída da simulação foco desta análise. Vale ressaltar que os valores das estatísticas fornecidas na planilha refere-se ao valor médio das 10 replicações para cada um dos cenários apresentados.

De posse dos dados apresentados, foi possível elaborar um gráfico contendo o número de

Tabela 7.1: Dados para a análise de sensibilidade: tipo e número de composições *versus* capacidade de exportação

Cenário	Tipo Comp	Nº Comp	Qtde Exp (A) (t)	Qtde Exp (B) (t)	Total Exp (A+B) (t)	Cenário	Tipo Comp	Nº Comp	Qtde Exp (A) (t)	Qtde Exp (B) (t)	Total Exp (A+B) (t)
1	1	5	1025500	654500	1680000	19	2	11	1516550	985950	2502500
2	1	6	1249500	815500	2065000	20	2	12	1513050	985950	2499000
3	1	7	1438500	941500	2380000	21	2	13	1519000	990500	2509500
4	1	8	1512000	987000	2499000	22	2	14	1519000	987000	2506000
5	1	9	1529500	987000	2516500	23	2	15	1522500	987000	2509500
6	1	10	1519000	987000	2506000	24	3	3	1120000	735000	1855000
7	1	11	1526000	987000	2513000	25	3	4	1495550	985950	2481500
8	1	12	1522500	987000	2509500	26	3	5	1519000	987000	2506000
9	1	13	1515500	987000	2502500	27	3	6	1526000	987000	2513000
10	1	14	1515500	987000	2502500	28	3	7	1526000	987000	2513000
11	1	15	1522500	987000	2509500	29	3	8	1522500	990500	2513000
12	2	4	1120000	735000	1855000	30	3	9	1515500	987000	2502500
13	2	5	1403500	906500	2310000	31	3	10	1519000	990500	2509500
14	2	6	1522500	987000	2509500	32	3	11	1526000	987000	2513000
15	2	7	1519000	987000	2506000	33	3	12	1513050	985950	2499000
16	2	8	1512000	987000	2499000	34	3	13	1522500	987000	2509500
17	2	9	1519000	987000	2506000	35	3	14	1513050	985950	2499000
18	2	10	1526000	987000	2513000	36	3	15	1522500	987000	2509500

composições *versus* a quantidade exportada, para cada tipo de composição separadamente, como mostra a Figura 7.1. Por meio dos gráficos, é possível perceber o impacto do tipo e número de composições na capacidade de exportação do sistema.

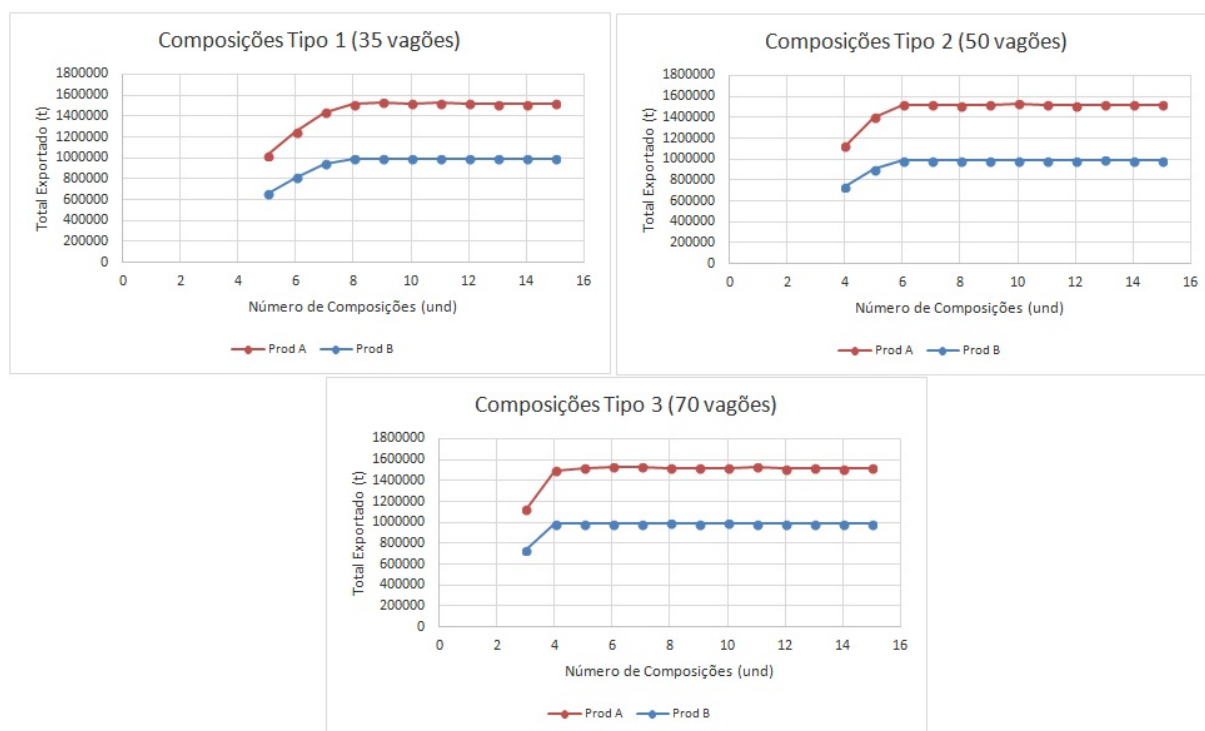


Figura 7.1: Número de composições *versus* capacidade de exportação

Fonte: Elaborado pela Autora

Nota-se que composições maiores conseguem exportar maior volume de produto com menor quantidade de composições ferroviárias. Por exemplo, para o sistema em estudo, em uma composição com 70 vagões, apenas 5 trens são necessários para escoar a meta de exportação, enquanto uma composição de 50 vagões demanda 6 trens e a de 35 vagões, 8 composições.

Nota-se também que o número de trens para cada tipo de composição satura a partir de um determinado valor, fazendo com que o acréscimo de novas unidades de composições ferroviárias ao sistema não implique necessariamente no aumento do volume exportado. Este fato já era esperado, visto que o sistema é composto por inúmeros componentes e a alteração de apenas um deles, neste caso o número de composições, não é suficiente para aumentar a capacidade de exportação do sistema em grande proporção, já que os outros recursos estarão trabalhando em sua capacidade máxima e restringindo o aumento do volume exportado.

7.2 Análise do tipo e número de composições *versus* velocidade de escoamento

Para analisar o impacto do tipo e número de composições na velocidade de escoamento dos produtos foram utilizados os mesmos cenários que a análise anterior. Contudo, a saída da simulação que será utilizada para analisar a velocidade de escoamento é o tempo de ciclo das composições. Esse período é dado pelo tempo que a composição necessita para fazer um ciclo completo no sistema, ou seja: carregamento no terminal de carga, transporte ferroviário de ida ao porto, descarregamento e retorno ao terminal de carga. De posse dessa estatística, foi calculada a velocidade de escoamento média das composições (V_{esc}), que é dada pela equação:

$$V_{esc} = \frac{C_VAG * r}{TC_COMP} \quad (7.1)$$

Onde C_VAG é a capacidade do vagões, r o número de vagões da composição e TC_COMP o tempo de ciclo médio das composições. A Tabela 7.2 apresenta os cenários, a saída da simulação e alguns dados calculados, bem como a velocidade de escoamento para cada cenário.

A Figura 7.2 mostra a relação entre o número de composições e a velocidade de escoamento da produção, para cada tipo de composição. A primeira análise consiste em observar o impacto de diferentes tamanhos de composições na velocidade de escoamento. Nota-se que composições maiores possuem maior velocidade de escoamento que composições menores, justamente pelo fato de terem uma capacidade maior de carga em cada viagem. Devido à essa característica, um sistema logístico que possui composições com maior número de vagões demanda uma disponibilidade de maior quantidade de produto nos terminais de carga e de maior disponibilidade de espaço nos armazéns dos terminais portuários. Daí surge a necessidade de se ter estoques bem dimensionados para que as composições não permaneçam muito tempo ociosas e aguardando

Tabela 7.2: Dados para a análise de sensibilidade: tipo e número de composições *versus* velocidade de escoamento

Cenário	Tipo Comp	Nº Comp	TC Comp (h)	Cap da Comp (t)	V_{esc} (t/h)	Cenário	Tipo Comp	Nº Comp	TC Comp (h)	Cap da Comp (t)	V_{esc} (t/h)
1	1	5	62.61	2450	39.13	19	2	11	91.93	3500	38.07
2	1	6	62.79	2450	39.02	20	2	12	93.39	3500	37.48
3	1	7	62.92	2450	38.94	21	2	13	93.51	3500	37.43
4	1	8	66.45	2450	36.87	22	2	14	93.92	3500	37.26
5	1	9	70.99	2450	34.51	23	2	15	94.68	3500	36.97
6	1	10	75.91	2450	32.27	24	3	3	68.87	5250	76.23
7	1	11	80.77	2450	30.33	25	3	4	69.01	5250	76.07
8	1	12	82.20	2450	29.81	26	3	5	79.11	5250	66.36
9	1	13	83.54	2450	29.33	27	3	6	84.17	5250	62.38
10	1	14	88.78	2450	27.60	28	3	7	89.35	5250	58.76
11	1	15	89.22	2450	27.46	29	3	8	91.16	5250	57.59
12	2	4	65.26	3500	53.63	30	3	9	94.62	5250	55.48
13	2	5	65.48	3500	53.45	31	3	10	95.89	5250	54.75
14	2	6	70.46	3500	49.67	32	3	11	96.61	5250	54.34
15	2	7	76.08	3500	46.00	33	3	12	94.21	5250	55.73
16	2	8	83.01	3500	42.16	34	3	13	92.33	5250	56.86
17	2	9	87.72	3500	39.90	35	3	14	92.67	5250	56.65
18	2	10	89.32	3500	39.18	36	3	15	92.81	5250	56.57

disponibilidade de recursos ou produtos. Sistemas com composições menores, tendem a ter um fluxo mais contínuo de produtos, desta forma, absorvem de uma melhor forma as flutuações na disponibilidade de recursos.

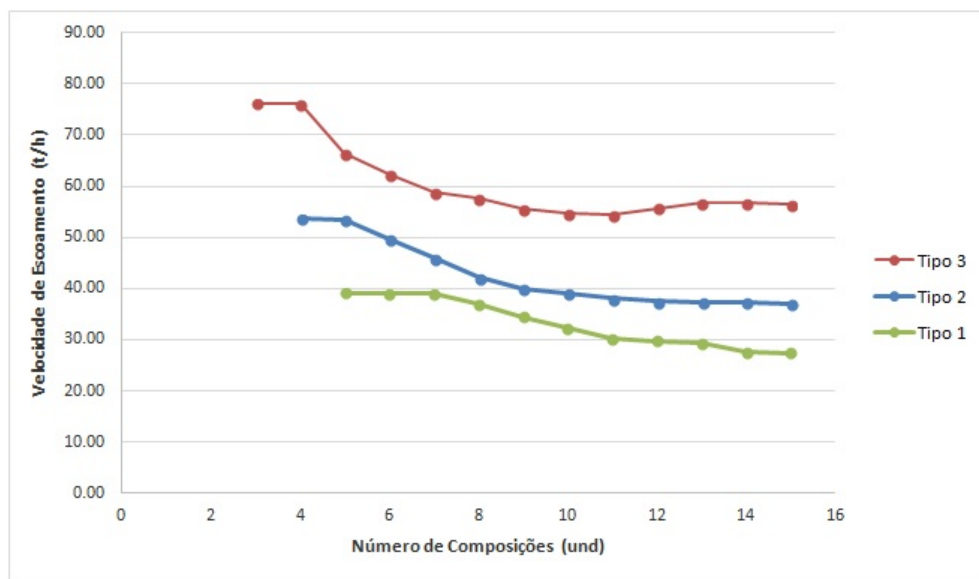


Figura 7.2: Tamanho das composições *versus* velocidade de escoamento
Fonte: Elaborado pela Autora

Pode-se observar também que, de maneira geral, para todos os tipos de composições, à medida que o número de trens aumenta, a velocidade de escoamento tende a diminuir. Isso deve-se ao fato de que números excessivos de trens acabam congestionando o sistema, fazendo com que muitas composições permaneçam um longo tempo em fila para carga e descarga de material nos terminais e, conseqüentemente, aumentando o tempo de ciclo das composições. Esse fato mostra a importância de se dimensionar bem o sistema, pois um número desnecessário de trens, além de onerar os custos logísticos, prejudica a eficiência do sistema.

Capítulo 8

Considerações Finais

Este trabalho de pesquisa propôs uma solução diferenciada e adequada para o problema do dimensionamento de infraestrutura em sistemas logísticos intermodais para o transporte de *commodities*, visando a minimização dos custos logísticos. Para tanto, utilizou-se a metodologia de otimização via simulação.

Essa ferramenta é considerada ideal para analisar processos complexos de tomada de decisão como o sistema estudado, visto que este possui diversas variáveis de natureza estocástica e está sujeito à restrições de capacidade dos recursos e limitações operacionais. Além disso, a otimização via simulação permite avaliar um extenso número de soluções e determinar a decisão "ótima" em um período muito curto de tempo.

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento detalhado de uma metodologia de otimização via simulação, descrevendo com detalhes as etapas de construção dos modelos conceitual, computacional, e do modelo integrado de otimização via simulação. Desta forma, esta pesquisa possui como principal contribuição a possibilidade de ser utilizada como uma referência para a elaboração de modelos de otimização via simulação para sistemas logísticos semelhantes ao estudado, que são bastante comuns em empresas de mineração e indústrias agrícolas.

Além disso, esse estudo apresentou e, de certa forma, comparou, duas ferramentas de otimização que podem ser utilizadas: os otimizadores dos pacotes comerciais de simulação e heurísticas desenvolvidas especificamente para o problema. Foi possível constatar que ambas as ferramentas são eficazes na resolução do problema. Contudo, a adoção de heurísticas simples podem ser suficientes para alcançar os resultados obtidos pelo otimizador do pacote de simulação, com a vantagem adicional de se ter maior controle do processo e eventualmente gastar menos tempo computacional, como no problema aqui apresentado. Isso se deve ao fato da heurística de-

desenvolvida utilizar características específicas do problema para compor a lógica de otimização, diferentemente do otimizador do pacote de simulação, que utiliza um procedimento genérico padrão.

O trabalho apresentou ainda uma análise de sensibilidade que relaciona o tipo e número de composições com a capacidade de exportação e também com a velocidade de escoamento do sistema. Observou-se a importância do correto dimensionamento dos recursos para ampliar a eficiência do transporte no sistema logístico. Dessa forma, o escoamento da produção para o mercado externo pode compreender menores custos logísticos, e conseqüentemente, maiores ganhos às organizações.

Portanto, foi possível perceber que este trabalho atendeu aos objetivos propostos no capítulo 1. Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar a aplicação da metodologia proposta neste trabalho em um sistema real, voltado para a exportação de *commodities*, visto que os dados utilizados neste estudo foram estimados, ainda que baseados em dados reais. Isso permitirá confirmar a eficácia do método desenvolvido.

A melhoria dos resultados apresentados pelo modelo de otimização via simulação também pode ser alcançada ao se desenvolver heurísticas mais elaboradas, que permitam obter soluções melhores do que as obtidas pelo otimizador do pacote comercial de simulação. Pode-se ainda focar na obtenção de estoques médios como critério adicional para otimização do problema, a fim de melhorar a qualidade da solução.

Pode ser realizada ainda uma análise de sensibilidade variando outros parâmetros do sistema logístico, visando identificar outras características do sistema logístico em estudo. Um exemplo seria analisar o reflexo do número e tipo de composições ferroviárias no dimensionamento dos armazéns dos terminais intermodais. Acredita-se que quando têm-se um volume maior de composições, o tamanho dos armazéns tende a reduzir, visto que o fluxo de produto torna-se mais contínuo.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. *Modal ferroviário*. 2016. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4971/Caracteristicas.html>>. Acesso em: 12 de março de 2016.

ALMEIDA, C. A. et al. Modelagem matemática e simulação para otimizar o escoamento da soja brasileira exportada à china. *RACE: Revista de Administração, Contabilidade e Economia*, 2013. Editora Unoesc, v. 12, n. 1, p. 199–224, 2013.

ALMEIDA, P. R. V.; ZINATO, G. Análise da logística de transporte na comercialização da produção de soja na região centro-oeste com foco no modal rodoviário. In: *49o Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*. Belo Horizonte: SOBER, 2011.

ASSIS, J. P. et al. Simulação estocástica de atributos do clima e da produtividade potencial de milho utilizando-se distribuição triangular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2006. EMBRAPA Informação Tecnológica, v. 41, n. 3, p. 539–543, 2006.

Associação Brasileira das Indústria de Óleos Vegetais - ABIOVE. *Estatística*. 2016. Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2016.

AZADEH, A.; GHADERI, S.; IZADBAKHS, H. Integration of dea and ahp with computer simulation for railway system improvement and optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 2008. Elsevier, v. 195, n. 2, p. 775–785, 2008.

BAHRAMIAN, Z.; BAGHERI, M. A simulation-based optimization approach for passenger train timetabling with periodic track maintenance and stops for praying. *Journal of Modern Transportation*, 2015. Springer, v. 23, n. 2, p. 148–157, 2015.

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

BANKS, J. et al. *Discrete-event System Simulation*. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005. (Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering).

BATALHA, M. *Gestão Agroindustrial*. São Paulo: Atlas, 2008.

BODON, P. et al. Modeling the mining supply chain from mine to port: a combined optimization and simulation approach. *Journal of Mining Science*, 2011. Springer, v. 47, n. 2, p. 202–211, 2011.

BOWERSOX, D.; CLOSS, D. Logística empresarial. *São Paulo: Atlas*, 2001. v. 11, 2001.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; HELFERICH, O. K. *Logistical management*. New York: McGraw-Hill, 1996.

CABALLINI, C.; SACONE, S. Modeling and simulation of the rail port cycle. *Systems Journal*, 2015. IEEE, v. 9, n. 1, p. 273–282, 2015.

- CAIXETA-FILHO, J. V.; MARTINS, R. S. *Gestão logística do transporte de cargas*. São Paulo: Atlas, 2000.
- CALABREZI, S. R. S. *A multimodalidade para o transporte de cargas: identificação de problemas em terminais visando à integração dos modais aéreo e rodoviário*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CAMARGO, P. V.; CUNHA, C. B. Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas em ciclo fechado. *Journal of Transport Literature*, 2012. v. 6, n. 2, p. 33–65, 2012.
- CARNEIRO, W. M. *Modelos de filas e simulação para análise do design de linhas ferroviárias singelas*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: teoria & aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora dos Autores, 2007.
- COVA, C.; MOTTA, R. *Logística Empresarial*. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2010. 212 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. *Embrapa Soja*. 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2016.
- FANTI, M. et al. A simulation based decision support system for logistics management. *Journal of Computational Science*, 2015. v. 10, p. 86–96, 2015.
- FARIA, C. H. F. *Análise do planejamento ferroviário: uma abordagem utilizando simulação de eventos discretos*. Dissertação (Mestrado) — Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.
- FIORONI, M. M. *Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.
- FIORONI, M. M. et al. Concurrent simulation and optimization models for mining planning. In: *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*. Miami: Winter Simulation, 2008. p. 759–767.
- FIORONI, M. M. et al. Railroad infrastructure simulator. In: IEEE. *Proceedings of the 37th Winter Simulation Conference*. Lake Buena Vista: Winter Simulation, 2005. p. 2581–2584.
- FIORONI, M. M. et al. Matching production planning and ship arrival scheduling by simulation. In: *Proceedings of the 42th Winter Simulation Conference*. Baltimore: Winter Simulation, 2010. p. 1990–1997.
- FIORONI, M. M. et al. Signal-oriented railroad simulation. In: *Proceedings of the 45th Winter Simulation Conference*. Washington: Winter Simulation, 2013. p. 3533–3543.
- FLEURY, P. F. Ferrovias brasileiras: dez anos de privatização. *Instituto de Logística e Supply Chain*, 2007. 2007.
- Freitas Filho, P. J. *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena*. Florianópolis: Visual Books, 2001.
- FU, M. C. Optimization for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 2002. INFORMS, v. 14, n. 3, p. 192–215, 2002.

- FURIAN, N. et al. A conceptual modeling framework for discrete event simulation using hierarchical control structures. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015. Elsevier, v. 56, p. 82–96, 2015.
- GHANE-EZABADI, M.; VERGARA, H. A. Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016. Elsevier, v. 89, p. 53–69, 2016.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. *Informações sobre a economia mineral brasileira de 2015*. 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 12 de março de 2016.
- JING-JING, Y.; KE-PING, L. Simulation optimization for train movement on a single-track railway. *Chinese Physics B*, 2013. IOP Publishing, v. 22, n. 5, p. 050205, 2013.
- KONINGS, J. Integrated centres for the transshipment, storage, collection and distribution of goods: A survey of the possibilities for a high-quality intermodal transport concept. *Transport Policy*, 1996. Elsevier, v. 3, n. 1, p. 3–11, 1996.
- LANDIVAR, C. G. P. *Determinantes da eficiência técnica dos terminais intermodais do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Administração. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012.
- LANDIVAR, C. G. P.; SPROESSER, R. L.; PEREIRA, M. W. G. Determinantes da eficiência dos terminais intermodais dos corredores logísticos de grãos do Brasil. *Espacios*, 2014. v. 35, n. 8, 2014.
- LAW, A. M. Simulation-models level of detail determines effectiveness. *Industrial Engineering*, 1991. Norcross, v. 23, n. 10, p. 16, 1991.
- LAW, A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 4th. ed. New York: McGraw Hill Professional, 2007.
- LIMA, M. P. Custos logísticos na economia brasileira. *Revista Tecnológica*, 2006. v. 11, n. 122, p. 64–69, 2006.
- LIU, J. et al. An overview of conceptual model for simulation and its validation. *Procedia Engineering*, 2011. Elsevier, v. 24, p. 152–158, 2011.
- MARINOV, M. et al. Railway operations, time-tabling and control. *Research in Transportation Economics*, 2013. Elsevier, v. 41, n. 1, p. 59–75, 2013.
- MARTINS, R. S. et al. Fatores relevantes na contratação de serviços em terminais intermodais para grãos agrícolas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 2014. Scielo Brasil, São Paulo, v. 52, n. 2, p. 347–364, 2014.
- MERSCHMANN, L. H. C. *Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto*. 93 p. Dissertação (Mestrado) — COPPE/URFJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- Ministério dos Transportes. *Transporte Ferroviário*. 2016. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario-relevancia.html>>. Acesso em: 03 de março de 2016.
- MONTEVECHI, J. A. B. et al. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted idf: an application in a Brazilian tech company. In: *Proceedings of the 42th Winter Simulation Conference*. Baltimore: Winter Simulation, 2010. p. 1624–1635.

- NAVES, J. P. P. *Modelo de atratividade de terminais intermodais de grãos*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Programa de Pós Graduação em Transportes. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- PEREIRA, A. C. S. *Transporte intermodal: um estudo do modelo estadunidense-europeu vs. situação brasileira*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Pós Graduação e Pesquisa em Administração. COPPEAD. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- Plano Nacional de Logística e Transportes - PNLT. *Relatório Executivo*. 2011. Disponível em: <<http://transportes.gov.br/conteudo/2818-pnlt-relatorio-executivo-2011.html>>. Acesso em: 24 de março de 2016.
- PONTES, H. L. J.; CARMO, B. B. T. D.; PORTO, A. J. V. Problemas logísticos na exportação brasileira da soja em grão. *Sistemas & Gestão*, 2009. v. 4, n. 2, p. 155–181, 2009.
- PRADO, D. Teoria das filas e da simulação. *Edição Belo Horizonte: INDG-Instituto de Desenvolvimento Gerencial*, 2004. v. 2, 2004.
- REMIEL, F. M.; CAUVIN, A.; FERRARINI, A. Conceptual design and simulation of an automotive body shop assembly line. In: *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 24–29.
- ROBINSON, S. Conceptual modeling for simulation: issues and research requirements. In: *Proceedings of the 38th Winter Simulation Conference*. Monterey: Winter Simulation, 2006. p. 792–800.
- ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation part i: definition and requirements. *Journal of the operational research society*, 2008. Nature Publishing Group, v. 59, n. 3, p. 278–290, 2008.
- SAJEDINEJAD, A. et al. Simarail: simulation based optimization software for scheduling railway network. In: IEEE. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2011 Winter*. [S.l.], 2011. p. 3730–3741.
- SANTOS, A. B.; SPROESSER, R. L. Caracterização e avaliação da eficiência dos terminais intermodais brasileiros. *Gestão & Regionalidade (Online)*, 2013. v. 29, n. 87, 2013.
- SOGABE, V. P. *Caracterização do desempenho operacional em terminais inter-modais de escoamento de grãos: um estudo multicaso no corredor Centro-Oeste*. 122 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação Stricto Sensu em Administração. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2010.
- TOZI, L. A. et al. Análise da importância relativa de atributos de nível de serviço em um terminal de cargas aeroportuário. *Transportes*, 2010. v. 18, n. 2, 2010.