

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE**

YUMI NISHIJIMA

**ANÁLISE DE PROCESSOS EM UM PÁTIO FERROVIÁRIO
NO PORTO DE SANTOS UTILIZANDO O FLEXSIM®**

JOINVILLE
2022

YUMI NISHIJIMA

**ANÁLISE DE PROCESSOS EM UM PÁTIO FERROVIÁRIO
NO PORTO DE SANTOS UTILIZANDO O FLEXSIM®**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia de Transportes e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Eng. Silvia Lopes de Sena Taglialenha.

JOINVILLE
2022

YUMI NISHIJIMA

**ANÁLISE DE PROCESSOS EM UM PÁTIO FERROVIÁRIO NO PORTO DE
SANTOS UTILIZANDO O FLEXSIM®**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia de Transportes e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca Examinadora

Dra. Silvia Lopes de Sena Tagliapietra
Orientadora/Presidente

Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, pelos aprendizados e por tudo que ainda está por vir.

À Prof. Dra. Silvia Lopes de Sena Tagliarenha, pela dedicação, empenho e auxílio me orientando de forma excepcional, pela gentileza e acima de tudo pela amizade de mestre. A sua ajuda e orientação foi importante para o direcionamento e melhoria deste trabalho.

Aos professores da banca examinadora Prof. Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes e ao Prof. Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias, pela dedicação do tempo e atenção na avaliação e críticas construtivas deste trabalho.

A toda a minha família em especial meus pais Izeca e Carlos que sempre buscaram dar o melhor para o meu estudo e ao meu irmão Hideki que sempre esteve presente me ajudando em todos os momentos felizes e tristes.

Aos meus amigos mais próximos Thálita, Bruna, Loany, Chrystian e Matheus, que tive o prazer de estar junto, compartilhar os piores e o melhores momentos da faculdade, principalmente pela maravilhosa amizade e acolhida nos momentos mais difíceis.

A todos da empresa FlexSim Brasil por todas as contribuições e auxílio durante o período de estágio. Os aprendizados e os ensinamentos foram muito importantes para o meu crescimento e evolução profissional.

RESUMO

A forte dependência do Brasil do transporte rodoviário implica diretamente no alto custo do transporte de cargas. O Porto de Santos considerado o porto com maior movimentação de carga no Brasil possui um alto fluxo de meios de transportes como os caminhões, trens e navios. Os altos riscos associados a investimentos em infraestrutura produtiva exigem prudência e planejamento acurado para sucesso em médio e longo prazo. A modelagem e simulação computadorizada desempenha um importante papel na redução desses riscos, já que permite a experimentação de incontáveis configurações do sistema e análises completas sobre efeitos de alterações em estruturas já existentes ou novas, sem que haja necessidade de alterações nos sistemas reais. O presente trabalho descreve a construção de um modelo de simulação de eventos discretos representando a planta de um pátio ferroviário próximo ao porto de Santos. O modelo virtual tem como objetivo principal fornecer uma base inicial para avaliar a capacidade de carregamento de vagões de produtos químicos em diferentes cenários, respeitando as restrições impostas ao carregamento, como tempos de ciclo de carregamento e de atendimento de demanda. O modelo de simulação foi implementado no *software* FlexSim® e através dos cenários analisados foi possível identificar as melhores proposições para o dimensionamento operacional para o pátio ferroviário observado. Os resultados obtidos sugerem ainda atendimento de aumento da demanda futura.

Palavras-chave: Simulação de eventos discretos. Simulação no FlexSim®. Análise de operação de carregamento em pátio ferroviário.

ABSTRACT

The strong dependence of Brazil in road transport directly implies the high cost of cargo transport. The Port of Santos, considered the port with the largest load movement in Brazil, has a high number of means of transport such as trucks, trains and ships. The risks associated with investments in productivity require high prudence and planning for success in the medium and long term. Computer modeling and simulation play an important role in reducing these risks, as it allows the experimentation of countless system configurations and complete analysis of the effects of changes in existing or new structures, without the need for system modification. The present work describes the construction of a discrete event simulation model representing a blueprint of a railroad near the Port of Santos. The virtual model's main objective is to provide an initial basis for evaluating the loading capacity of chemical products in different scenarios, respecting the restrictions imposed on loading, such as loading cycle span and demand service. The simulation model was implemented in FlexSim® software and through the analyzed scenarios it was possible to identify some layout propositions for the observed rail yard. The results obtained also suggest that future demand is attended.

Keywords: Discrete event simulation. Simulation with FlexSim®. Analysis loading operation in rail yard.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da movimentação ferroviária no Brasil.....	11
Figura 2 - Porto de Santos.	17
Figura 3 - Pátio Ferroviário Simples.	19
Figura 4 - Pátio Ferroviário por Gravidade.	20
Figura 5 - Formas de estudo de sistema.	24
Figura 6 - Exemplo da lógica de simulação construída no módulo <i>Process Flow</i>	30
Figura 7 - Exemplo da <i>Global Table</i>	31
Figura 8 - Exemplo de <i>dashboard</i> no modelo de simulação.	32
Figura 9 - Etapas para o desenvolvimento do trabalho.	35
Figura 10 - Chegada da composição ferroviária.....	37
Figura 11 - Posições de carregamento de vagões tanque do pátio ferroviário.	37
Figura 12 - Processo de carregamento dos vagões.....	38
Figura 13 - Sequenciamento dos vagões nas posições de carregamento.	38
Figura 14 - Modelo conceitual para operações de Locomotiva A.....	41
Figura 15 - Modelo conceitual da Locomotiva B.....	42
Figura 16 - Layout do pátio de carregamento ferroviário.....	44
Figura 17 - Lógica de movimentação da Locomotiva A no <i>Process Flow</i>	45
Figura 18 - Lógica de movimentação da Locomotiva B.....	47
Figura 19 - Local de chegada Locomotiva A.	49
Figura 20 - Locomotiva B na plataforma de carregamento	49
Figura 21 - Linhas férreas do pátio ferroviário.....	49
Figura 22 - Volume carregado em m ³ por cenário.....	52
Figura 23 - Taxa de utilização da locomotiva cenário 1, 2 e 3.....	53
Figura 24 - Taxa de utilização da locomotiva cenário 4, 5 e 6.....	54
Figura 25 - Taxa de utilização da locomotiva cenário 7, 8 e 9.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Softwares</i> de Simulação.....	28
Tabela 2 - Premissas consideradas no estudo.....	39
Tabela 3 - Cenários de análise.....	51
Tabela 4 - Resultados dos cenários	51
Tabela 5 - Resultado cenário extra.	56
Tabela 6 - Tempos de carregamento das réplicas de simulações do cenário 1.....	57
Tabela 7 - Média, variância e desvio padrão.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

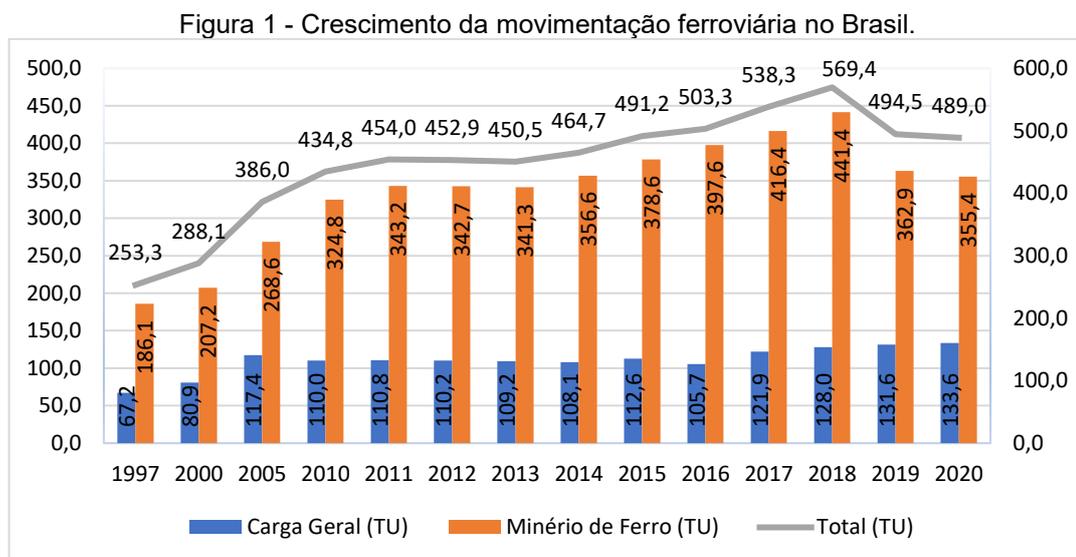
ANTF	Agência Nacional do Transporte Ferroviário
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CODESP	Companhia Docas do Estado de São Paulo
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 Estrutura do Trabalho.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Transporte de Cargas no Brasil.....	15
2.1.1 Transporte Rodoviário	15
2.1.2 Transporte Marítimo	16
2.1.3 Transporte Ferroviário	17
2.2 Pátios Ferroviários	18
2.3 Sincromodalidade.....	21
2.4 Modelagem e Simulação de Sistemas	22
2.4.1 Simulação de Sistemas	23
2.4.2 Vantagens e Desvantagens	25
2.4.3 Simulação de Eventos Discretos.....	26
2.4.4 Softwares de Simulação.....	28
2.4.5 Modelagem e Simulação utilizando o <i>FlexSim</i> ®	29
3. METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO	34
3.1 Metodologia.....	34
3.2 Etapas de Desenvolvimento do Trabalho.....	35
3.2.1 Definição do Problema	35
3.2.2 Coleta e Tratamento de Dados	39
3.2.3 Concepção do Modelo do Sistema.....	40
3.2.4 Modelo de Simulação	44
3.2.4.1 Modelo 3D da Simulação	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5. CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

Os investimentos no modal ferroviário foram retomados no ano de 1997 com o início das concessões para iniciativa privada. ANTF (2020) afirma que o volume transportado no ano de 1997 era de 253,3 toneladas úteis (TU) e, no ano de 2020, 489,0 TU, havendo então um aumento de 93% do volume. Em 1997 as ferrovias contavam com 1.154 locomotivas e, em 2020, já somavam 3.298 unidades, representando um aumento de 186%. No mesmo período, o número de vagões passou de 43.816 para 116.435, representando uma alta de 166% (Figura 1).



Fonte: Adaptado de ANTF (2020).

Embora o crescimento do setor ferroviário tenha apresentado resultados significativos, a forte dependência do Brasil no transporte rodoviário implica diretamente no alto custo do transporte de cargas. Para Torres (2006), a partir de um estudo da logística de transporte de soja para os principais portos de escoamento do Brasil, a tonelada transportada por uma distância de 1.000 Km teria um custo de R\$ 100,00 pela rodovia, R\$ 65,00 pela ferrovia e de R\$ 40,00 por transporte hidroviário.

O Porto de Santos, segundo a Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP, 2015), movimentou 120 milhões de toneladas de carga (30% da exportação brasileira) no ano de 2015, como também obteve um aumento da participação do modal ferroviário em detrimento do modal rodoviário, mas ainda pouco significativo para a matriz de transporte do porto.

A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2015) expõe que a má qualidade das estradas rodoviárias utilizadas para o transporte de grãos de soja e milho aumentam o custo médio operacional do transporte em 30,5%.

Custos como esses podem ser minimizados quando aliados à integração modal. Ballou (2001) alerta que a ferrovia, quando isolada, perde muito seu potencial de transporte, necessitando de um serviço intermodal e de terminais de transbordo.

A construção e planejamento de um pátio ferroviário necessitam da análise de diversos fatores para que o investimento não seja em vão. Dentre os fatores, podemos citar as variáveis que limitam o carregamento como o número de linhas férreas no pátio, a quantidade de locomotivas e vagões a serem utilizados e, também, o número de plataformas de carregamento que irão realizar o carregamento dos vagões. Segundo Bodin e Levy (1994) e Hale (1999), as vantagens da simulação incluem realizar testes e simular eventos reais que, no caso, se caracterizam como a operação de carregamento ferroviária identificando possíveis reduções de custos de operação, que é o objetivo desta pesquisa, realizada no Terminal Portuário de Santos

As vantagens relacionadas a aplicação do modelo de simulação devem-se principalmente à atual facilidade de uso em diversos setores da indústria. Conforme Pegden (1990), a simulação pode ser entendida como um processo de moldar um modelo computacional de um sistema real, a fim de conduzir experimentos com o intuito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

Com o objetivo de simular a operação de carregamento ferroviária que no Porto de Santos, foi utilizado o *software* de modelagem *FlexSim*® para análise da simulação, visto que é o *software* orientado a objetos usados para desenvolver, modelar, simular, visualizar e monitorar atividades e sistemas de processos de fluxo dinâmico.

As vantagens do *FlexSim*® são a simulação dinâmica 3D, sendo uma plataforma de fácil manuseio e flexível para alterações. Então, aplicando a simulação na operação ferroviária de carregamento, objeto desta pesquisa, foi possível analisar

a viabilidade do projeto de construção do pátio ferroviário, podendo analisar diferentes cenários e identificando possíveis melhorias na operação.

Portanto, este trabalho busca simular e analisar as restrições do sistema relacionados à implantação do pátio e simular e analisar diferentes cenários com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão para o projeto de construção do pátio ferroviário de carregamento.

1.1 Objetivos

Neste trabalho propõe-se os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivo Geral

Construir um modelo de simulação com o *software FlexSim®* para analisar operação de carregamento do material rodante em um pátio ferroviário e propor melhorias no processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar um modelo computacional que represente a operação de carregamento em pátio ferroviário no Porto de Santos;
- b) Analisar o volume gerado no período de um ano;
- c) Definir o número de posições de carregamento;
- d) Analisa os possíveis benefícios da construção do pátio de carregamento ferroviário;
- e) Identificar pontos de melhorias para a operação de abastecimento dos vagões.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto de cinco capítulos. O primeiro introdutório, contextualizando, justificando e apresentando os objetivos e a problemática em estudo. O segundo capítulo traz a fundamentação teórica, apresenta os temas como matriz de transporte de cargas no Brasil, os principais modais de transporte de cargas,

importância dos pátios ferroviários e suas classificações, sincromodalidade e, por fim, os conceitos de modelagem e simulação, *softwares* de simulação existentes e informações sobre o *software FlexSim®* como conceito, vantagens e recursos da ferramenta. No terceiro capítulo apresenta-se as etapas da metodologia de desenvolvimento do trabalho e as etapas para construção da modelagem de simulação. E, no quarto capítulo descreve e analisa os resultados obtidos do modelo de simulação para os cenários de análise. Por último no quinto capítulo detalha-se as conclusões e considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica utilizada para a realização do estudo desenvolvido no presente trabalho. Assim, está dividido em quatro pontos principais, o primeiro apresenta uma breve descrição da matriz de transporte de carga no Brasil, o segundo caracteriza os pátios ferroviários quanto à sua importância, vantagens, limitações e as diferentes classificações. O terceiro detalha a definição e importância da sincromodalidade para o transporte de cargas e o último ponto aborda os conceitos da modelagem e simulação de sistemas e os *softwares* de simulação mais utilizados em simulação de eventos discretos.

2.1 Transporte de Cargas no Brasil

A matriz de transporte no Brasil é composta por diversos meios de transporte. Os modais ferroviário, rodoviário representam aproximadamente mais de 95% de toda a carga transportada no território nacional, ANTF (2020). Segundo a Secretaria Nacional de Trânsito (2020), o Brasil concentra aproximadamente 75% do total de carga transportada pelo modal rodoviário.

2.1.1 Transporte Rodoviário

Em um estudo realizado por Cordeiro (2010) afirma que o transporte rodoviário é o mais utilizado no Brasil, este modal apresenta um amplo custo-benefício para o setor logístico em produtos de valor médio ou alto, em curtas ou longas distâncias, além de apresentar maior facilidade de se chegar à maior parte do território nacional.

Segundo Bustamante (1999), o setor rodoviário caracteriza-se pela alta flexibilidade operacional e reduzidas restrições de acessibilidade provocadas normalmente por questões de segurança operacionais e/ou topográficas.

Segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) (2009), o Brasil possui 1.603.131 milhões de Km em rodovias, contando com apenas 196.279 Km pavimentados, representando aproximadamente 12,24% do total. De acordo com um estudo realizado pela CNT (2007), identificou-se que 74,9% da malha viária possui algum tipo de problema ou comprometimento, avaliando seu estado de conservação como péssimo, ruim ou deficiente.

De acordo com CNT (2016) a soma dos gastos com transporte, estoque, armazenagem e serviços administrativos no Brasil consomem cerca de 12,7% do PIB em custos logísticos. A maior parte destes custos é formada pelo transporte, o equivalente a 6,8% do PIB (R\$ 401 bilhões). Em segundo aparece o custo de estoque 4,5% do PIB, ou R\$ 268 bilhões; em seguida surge os custos com armazenagem 0,9% do PIB ou R\$ 53 bilhões; e por último o custo administrativo com 0,5% do PIB, ou R\$ 27 bilhões.

No ano de 2004 o Governo Federal estimou que o Brasil precisava retirar 40 milhões de toneladas das estradas, visto que as rodovias não estão mais suportando tal carga. Em conformidade, Rodrigues (2011) comenta que para o transporte acima de 500 Km, o modal rodoviário apresenta-se desvantajoso economicamente.

Deste modo, devido à excessiva utilização e a alta necessidade de manutenção, como também a falta de fiscalização do modal, este setor é bastante impactado, ocasionando em um fator determinante para a alta do custo de frete e para os prazos de entrega dos produtos.

2.1.2 Transporte Marítimo

O modal marítimo é responsável por menos de 10% da movimentação de cargas no Brasil, ANTF (2020). Entre as formas de navegação existentes como costeiro, de cabotagem ou de longo curso, a CNT (2013) mostra que a cabotagem possui um caráter estratégico para o desenvolvimento em função de seu aspecto logístico e da proteção ao meio ambiente.

A cabotagem apresenta diversas vantagens como a capacidade de transporte mais eficiente, maior eficiência energética, maior vida útil dos veículos e equipamento, maior segurança da carga, menor número de acidentes, menor custo operacional e menor impacto ambiental. Além das vantagens citadas, podemos notar que para as

características físicas brasileiras, a extensa costa para navegação propicia o grande uso da navegação de cabotagem para o país (CNT, 2013).

Para que a cabotagem ocorra, há a necessidade da existência dos portos. Segundo Andrade (2021), no Brasil existem cerca de 175 instalações portuárias (marítimas e fluviais), das quais 36 são portos mais profundos que podem receber navios maiores e de maior calado. O principal porto brasileiro é o de Santos (Figura 2), no Estado de São Paulo, que anualmente recebe milhares de navios nos seus cerca de 15 Km de cais.

Figura 2 - Porto de Santos.



Fonte: CNN Brasil Business (2021).

Localizado em uma área privilegiada, o Porto de Santos no ano de 2015 obteve uma movimentação de cargas de aproximadamente 120 milhões de toneladas, como também apresentou uma movimentação anual de contêineres de 3,8 milhões de TEUs, tornando-se responsável por cerca de 30% das exportações brasileiras (CODESP, 2015).

2.1.3 Transporte Ferroviário

O modal ferroviário, o modal mais antigo, surgiu a partir da necessidade de transportar pessoas e cargas para longas distâncias. Segundo a Agência Nacional de

Transporte Ferroviário (ANTF, 2020), atualmente as estradas ferroviárias brasileiras apresentam 29.320 Km, concentrando-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, e parte da região Centro-Oeste e Norte do país.

O modal apresenta vantagens como grande capacidade e alta flexibilidade de carga, velocidade, baixo nível de acidentes, poluição, furtos e roubos de carga, além de não gerarem congestionamentos. Dentre as principais desvantagens, destaca-se a necessidade de grande capital de investimento, frequência de serviço e disponibilidade de equipamentos (LAMBERT; STOCK; VALENTINE, 1998).

O modal ferroviário emite menos cerca de 85% dióxidos de carbono (CO₂) quando comparado ao modal rodoviário, conforme a ANTF (2020) uma composição ferroviária composta de 120 vagões é capaz de transportar o equivalente a 368 caminhões graneleiros o que ocasiona em uma redução considerável da emissão de dióxido de carbono. Segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) o transporte ferroviário de cargas foi responsável por aproximadamente 2,9% das emissões nacionais de oriundas do setor de transporte de carga no ano de 2020.

Com relação aos tipos de produtos transportados nas ferrovias do país o minério de ferro e soja são os produtos mais transportados. De acordo com a ANTF (2020), mais de 92% dos minérios que chegam aos portos brasileiros são transportados pelas linhas férreas. Com relação às exportações, o modal movimenta cerca de 46% dos granéis sólidos agrícolas e 42% de açúcar.

2.2 Pátios Ferroviários

No transporte ferroviário, os pátios ferroviários são os pontos de acessibilidade ao modal ferroviário. Como já citado anteriormente, este modal se caracteriza por apresentar tráfego limitado aos trilhos. Esta limitação deve-se ao fato de as movimentações das locomotivas e vagões serem realizadas apenas pelas vias férreas, que em sua grande maioria possuem caminhos traçados por vias permanentes.

Segundo a ANTF (2020), o pátio ferroviário classifica-se como uma área esplanada em que um conjunto de vias é organizado afim de realizar a formação de trens, cruzamento entre trens, manobras e servir como estacionamento do transporte

ferroviário. Por conseguinte, os pátios ferroviários contribuem positivamente por proporcionarem a flexibilidade, ainda que limitada, para este sistema pouco flexível (do ponto de vista operacional). Esta flexibilidade dos pátios – ainda que parcial – está sujeita as restrições da quantidade de linhas, extensão da via etc.

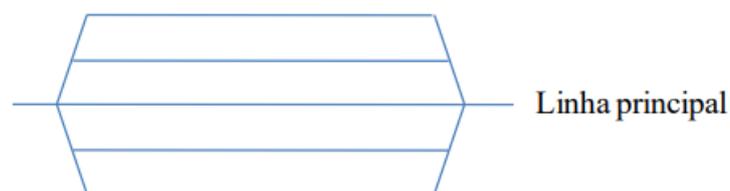
Segundo Dorneles (1990), os tipos de pátios que compõem a rede de transporte ferroviário são designados, normalmente, de acordo com as funções que desenvolvem. As principais funções podem ser de recepção de trens, de ultrapassagem, de classificação de vagões, de formação de trens, de transbordo ou pátios terminais.

Em relação ao sistema de transporte ferroviário de carga, os pátios de classificação de vagões possuem um importante papel, porque são nestas instalações que os trens são fracionados e organizados para futuramente serem engatados em uma locomotiva específica de acordo com o destino.

Segundo Petersen (1977) afirma que uma classificação conveniente para pátios é determinada pelo seu tamanho, estrutura e recursos e enfatiza que estes parâmetros são os elementos que causam congestionamento ou atrasos no progresso de vagões de carga ao longo do pátio. Assim, ainda citando Petersen (1977), os tipos de pátios ferroviários podem ser classificados conforme seu *layout* em cinco tipos principais, são eles:

- a) Pátio simples: apresentam recursos mais limitados e não possui separação estrutural entre linhas de recepção, classificação e de despacho;

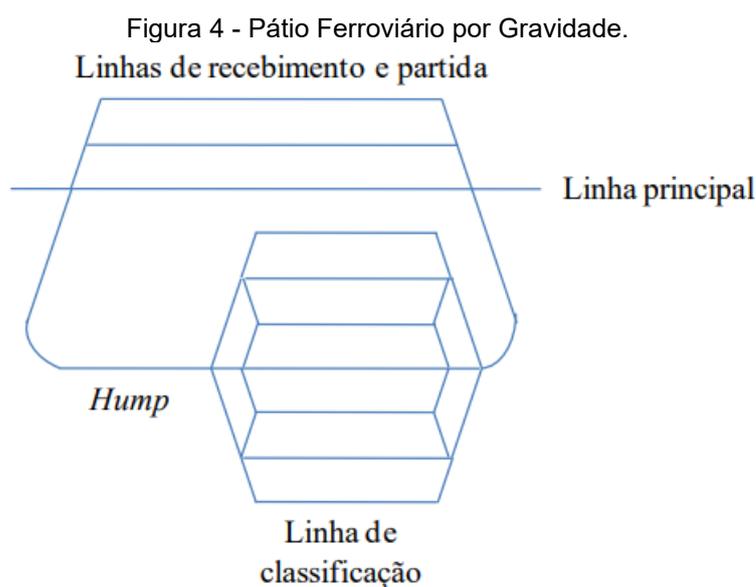
Figura 3 - Pátio Ferroviário Simples.



Fonte: Petersen (1977).

- b) Pátio em nível com uma saída: é o tipo mais simples de pátio, apresentando recursos de operação próprios. As vias de classificação apresentam linhas guias em apenas um dos lados e, desse modo, toda a operação precisa ser executada por uma mesma locomotiva do pátio em que, conseqüentemente,

- corta o lote recebido e encaminha os blocos para as outras linhas de classificação, resultando em uma forte dependência das operações.
- c) Pátio em nível com duas saídas: apresenta as operações de corte e depósito que podem ser realizadas por ambas as pontas das linhas de classificação. Normalmente, uma ponta é reservada para a classificação e a outra realiza a operação de montagem do trem de partida.
 - d) Pátio direcional ou com classificação orientada: é uma combinação dos pátios do tipo nível com uma saída e nível com duas saídas, em que apresentam áreas de classificação separadas para cada sentido de movimento e operam independentemente.
 - e) Pátio de classificação por gravidade (Figura 4): é o tipo de pátio mais eficaz de classificação, pois possuem alta taxa de produtividade na operação de classificação e podem ser altamente automatizados. No caso dos pátios planos (ou em nível), a locomotiva de pátio move os blocos de vagões para frente e para trás na linha guia com o auxílio de manobreadores, que sequencialmente operam as máquinas de chaves segundo os movimentos desejados, já em um pátio do tipo classificação por gravidade, isso é feito através da força da gravidade em que cada vagão é liberado a partir de um ponto elevado e automaticamente dirigido para a linha de classificação desejada.



Fonte: Petersen (1977).

2.3 Sincromodalidade

SteadieSeifi et al., (2014) cita que a sincromodalidade é definida como a evolução de conceitos do transporte intermodal e comodal, em que as partes interessadas da cadeia de transporte interagem ativamente dentro de uma rede cooperativa para planejar com flexibilidade os processos de transporte e poder alternar em tempo real entre os modos de transporte adaptados aos recursos disponíveis. Nienkotter et. Al (2015) diz que o conceito de sincromodalidade busca, por meio da operação dinâmica do Transporte Multimodal, a redução dos custos e o aumento da confiabilidade do serviço.

O embarcador determina antecipadamente apenas os requisitos básicos do transporte, como custos, duração e aspectos de sustentabilidade. Conforme Haller et al. (2015), os processos de transporte podem ser otimizados e os recursos disponíveis devem ser utilizados de forma sustentável.

Logo, o conceito de sincromodalidade promove este processo dinâmico de otimização logística. De acordo com Vilaça (2008), a utilização do transporte intermodal traz benefícios como o aumento da eficiência e produtividade da infraestrutura existente, tornando-se, portanto, ponto fundamental para o planejamento logístico.

Segundo Rodrigues (2011), a escolha adequada do modal de transporte utilizado depende das várias vantagens e desvantagens que ele oferece. Ballou (2001) alerta ao dizer que a ferrovia isolada perde muito seu potencial no transporte de cargas, necessitando de um serviço intermodal e terminais de transbordo.

Como exemplo, a ferrovia apresenta vantagens em relação ao quesito distância e desvantagens quanto ao serviço *gate-to-gate*, visto que a infraestrutura necessária para as locomotivas e linhas férreas é maior e menos flexível quando comparado aos automóveis Lambert, Stock e Vantine (1998).

Assim como já citado anteriormente, a alta utilização e dependência do modal rodoviário no transporte de cargas resulta em um dos custos de transporte de cargas mais altos do mundo, cerca de 60% dos custos de logística e limita o crescimento econômico do país, Cordeiro (2010).

Dessa forma, Vilaça (2008) explica que é necessário o crescimento da intermodalidade de transportes para que a infraestrutura de transporte no país seja mais barata e eficiente. A utilização do transporte intermodal tem como benefícios o aumento da eficiência e produtividade da infraestrutura existente de transporte, tornando-se ponto fundamental para o planejamento logístico.

Em um estudo realizado por Ambra (2019) o autor apresenta os benefícios do *digital twin* na modelagem e simulação. Nesse estudo, Ambra se utiliza da ferramenta de simulação no transporte de cargas a fim de testar a sincromodalidade. Alterando diferentes variáveis e originando diferentes cenários através do estudo, foi possível gerar análises com o objetivo de identificar a solução para o problema proposto. Em conclusão, o autor afirma que a ferramenta de *digital twin* é uma ótima opção para simular o transporte, visto a complexidade para a tomada de decisão.

No artigo publicado por Nienkotter (2015) o autor aplica conceitos de programação dinâmica e sincromodalidade em uma empresa madeireira com o intuito de prever a melhor rota e minimizar os custos de transportes baseados nos preços de frete praticados nos modais rodoviário, ferroviário e marítimo. A aplicação da programação dinâmica no modelo proposto indicou que as melhores rotas utilizadas foram o transporte rodoviário, aliado ao modal marítimo ou ferroviário para grandes distâncias. O estudo indicou ainda que a falta de infraestrutura no Brasil é um dos fatores que mais compromete os custos de frete.

2.4 Modelagem e Simulação de Sistemas

Segundo Miyagi (2006), a simulação pode ser entendida como a imitação de uma operação ou de um processo do mundo real. A simulação envolve a geração do modelo artificial da representação simplificada de uma parte da realidade observada para a análise de suas características operacionais.

Tal abordagem tem motivado sua utilização como ferramenta de suporte para a tomada de decisões no setor produtivo, uma vez que custos e tempo são reduzidos com a construção prévia de modelos virtuais para análise de diferentes cenários de produção antes da implementação real dos sistemas (SELEIM et al., 2012).

O modelo de simulação geralmente utiliza diversos parâmetros da operação, estocásticos ou determinísticos e, uma vez construído, modelado e validado, o modelo

pode ser usado para investigar uma grande variedade de questões sobre o sistema (MIYAGI, 2006).

Ainda segundo o autor acima, a simulação pode ser usada para estudar sistemas que estão fase de concepção, antes mesmo de ser efetivamente implementado. Consequentemente, a simulação pode ser aplicada como uma ferramenta para avaliar os efeitos das mudanças nos sistemas existentes e avaliar e validar o desempenho de novos sistemas, além de testar diferentes cenários e prever futuros impactos de maneira a identificar a solução que melhor atende as restrições operacionais consideradas.

Desta forma, a simulação objetiva preve o comportamento futuro dos sistemas usando modelos, ou seja, busca antecipar os efeitos produzidos por alterações ou pela aplicação de outros métodos nas operações. Ademais, segundo Toth e Vigo (2001) o uso de procedimentos computadorizados para o planejamento da logística de transportes pode trazer redução significativa dos custos globais.

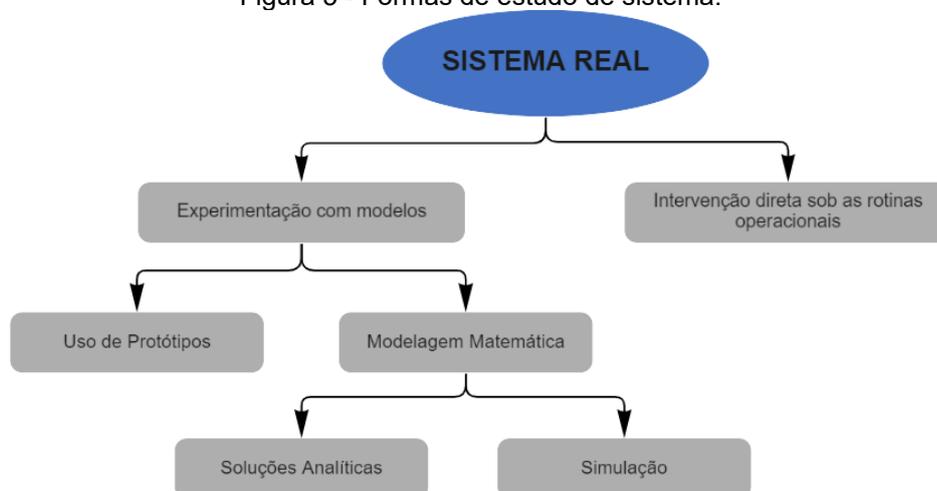
2.4.1 Simulação de Sistemas

Através do modelo de simulação é possível propor teorias e hipóteses considerando as observações realizadas através das respostas registradas pela simulação, permitindo aos modeladores obter um olhar mais crítico e detalhado, respondendo a questões como: “O que aconteceria se?”.

Pode-se citar também, conforme Moreira (2013) que a construção de um modelo computacional aproximado da realidade permite a operação do mesmo inúmeras vezes, analisando seus resultados com a finalidade que seja melhor compreendido, controlado e manipulado.

Segundo Law e Kelton (2000), as formas de estudos dos sistemas podem ser compreendidas conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 - Formas de estudo de sistema.



Fonte: Adaptado de Law e Kelton (2000).

Atualmente, diversos projetos de dimensionamento, reengenharia de sistemas ou avaliação de desempenho estão utilizando a simulação para:

- a) Sistemas de produção (manufatura e montagem, áreas de armazenagem, movimentação de peças e equipamentos, etc.);
- b) Sistemas computacionais (*websites*, servidores de redes, gerenciadores de base de dados, sistemas operacionais, etc.);
- c) Sistemas de prestação de serviços diretos ao público (bancos, hospitais, serviços de emergência, etc.);
- d) Sistemas de transporte e estocagem (redes de distribuição e logística, operações portuárias, transporte rodoviário e ferroviário, etc.).

Os modelos podem ser classificados em mentais, físicos ou simbólicos, conforme Gavira (2003). Os modelos mentais são heurísticos, podendo, então, serem confusos e imprecisos. Esses modelos baseiam-se em regras empíricas em que dada a solução do problema permite o avanço para outra solução mais elaborada. Por ser baseado no entendimento e interpretação do tomador de decisão, depende diretamente do grau de conhecimento do analista ao sistema de estudo.

Os modelos físicos são baseados em uma representação análoga (ou semelhante) do sistema real ou pelo uso de protótipos. Um exemplo de representação análoga é a representação de um circuito resistência, capacitância e indutância, citando protótipos como réplicas de um sistema real em que apresentam a mesma forma de funcionamento.

Os modelos simbólicos ou matemáticos baseia-se na suposição que as informações e variáveis relevantes podem ser quantificadas. Estes modelos podem ser de simulação ou otimização. Os modelos de simulação buscam a representação do mundo real com o objetivo de gerar análises de alternativas. Os modelos de otimização são estruturados para selecionar apenas uma alternativa, ou seja, não permitem flexibilidade para a escolha delas.

Como dito anteriormente, Miyagi (2006) afirma que o modelo de simulação pode ser entendido como uma réplica reduzida de um conjunto de variáveis do sistema real. Pode-se dizer, portanto, que a simulação é antes de tudo uma técnica experimental que permite avaliar o efeito da mudança de uma variável de entrada ou parâmetro no comportamento da variável controlada, também chamada de variável de saída do sistema.

Segundo Pegden (1995), a modelagem e simulação de sistemas são motivadas pelos propósitos:

- a) Proporcionar um melhor entendimento da operação de um sistema, visto que alguns sistemas são notoriamente complexos, o que dificulta a compreensão das operações e interações existentes entre elas;
- b) Estudar um sistema sem que afete a operação, uma vez que a modelagem e simulação permite a experimentação de sistemas sem afetar a operação;
- c) Desenvolver políticas operacionais para melhorar o desempenho de um sistema e, em razão disso, mesmo havendo o entendimento do sistema por parte do modelador, pode existir a necessidade de realizar melhorias e alterações;
- d) Testar novos sistemas antes de sua implementação efetiva, pois a simulação poderá indicar quais os benefícios do investimento, fornecendo também informações de como o novo sistema irá se comportar, o que proporciona redução de custos nos processos.

2.4.2 Vantagens e Desvantagens

Conforme Miyagi (2006) a simulação apresenta inúmeras vantagens e desvantagens que serão descritas a seguir.

Vantagens:

- a) Experimentação em curto espaço de tempo, que pode ser controlado. Permite reproduzir os processos de maneira lenta ou acelerada, visto que o modelo é simulado computacionalmente;
- b) Compreender melhor quais variáveis são mais relevantes em relação à performance e como elas mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema;
- c) Reusabilidade dos modelos, visto que as operações muitas das vezes são semelhantes para as mesmas circunstâncias, existindo pequenas alterações ou adições no processo das operações;
- d) Facilitar a identificação de gargalos.
- e) Surgimento de hipóteses acerca de determinados fenômenos.

Desvantagens:

- a) Necessidade de alto conhecimento prático e técnico por parte do modelador, para que ele reproduza fielmente o sistema;
- b) Os resultados da simulação são, muitas vezes, de difícil interpretação devido aos processos de aleatoriedade;
- c) Aplicação da coleta de dados, uma vez que ela deve estar bem representada e fiel ao processo, pois a má qualidade dos dados resulta diretamente nos resultados do projeto de simulação;
- d) Apenas com o uso da Simulação não se resolvem problemas, pois ela fornece ao tomador de decisão soluções potenciais, logo, compete ao modelador avaliar e implementar as mudanças propostas. Deste modo, é importante manterem as pessoas envolvidas com o andamento do projeto.

2.4.3 Simulação de Eventos Discretos

Conforme Rabelo (2014), a simulação de eventos discretos (DES) é o método de simulação mais utilizado globalmente para a representação de sistemas de manufatura, base para o desenvolvimento deste objeto de estudo. Entre as aplicações mais comuns são (KULKARNI et al., 2015; SELEIM et al., 2012):

- a) Simulação de sistemas durante a etapa de *design* a fim de avaliar suas características em termos de tempos de fluxo, produtividade e materiais necessários;
- b) Avaliação de desempenho do sistema quanto à utilização de máquinas, tempo de ociosidade de equipamentos e tempo de processo com diferentes *layouts* e cenários para operação;
- c) Avaliação do sistema para determinar a quantidade adequada de equipamentos, tamanho do estoque, etc.;
- d) Estudos de variabilidades dentro do processo.

Nesta modalidade de simulação, os objetos do modelo são componentes que contêm atributos específicos e variáveis, podendo ser alterados em resposta a múltiplos eventos do sistema – simultâneos ou não – com espaçamentos temporais variados durante a execução do modelo (SCHRIBER; BRUNNER; SMITH, 2009).

Como exemplo, em modelos de manufatura, as máquinas e operadores são os objetos, enquanto que suas disponibilidades e tempos de processos são seus atributos. Conforme Pollacia (1989), os eventos podem ser a chegada de ordens de produção a distribuição de itens pelo sistema, ou a pausa/parada das operações.

Segundo Rabelo (2004), a simulação discreta computadorizada como modo de simulação tem sido mais empregada atualmente pela indústria de manufatura devido principalmente à facilidade de uso e a disponibilidade de *softwares* comerciais com interfaces mais intuitivas de fácil entendimento. Outro fator relevante é a possibilidade de retirada de informações de difícil coleta em sistemas reais.

Entretanto, diversas limitações têm sido relatadas, pois enquanto os sistemas reais são dinâmicos e sofrem constantes alterações, a simulação é comparativamente sólida quanto aos parâmetros e sua estrutura, exigindo atenção dos analistas em relação à sua validade no decorrer de longos períodos de tempo.

Ademais, outro fator limitante se deve ao fato que os processos complexos exigem simulações de alto desempenho, no qual necessitam de uma grande capacidade computacional e computadores de custo elevado.

2.4.4 Softwares de Simulação

Conforme Castro Neto (2006), softwares de simulação podem ser basicamente agrupados em duas grandes categorias: linguagens de simulação e simuladores. As linguagens de simulação dependem de uma linguagem computacional para programá-las. São capazes de simular diversos tipos de operação de manufatura, contudo, necessitam de conhecimentos bastante específicos de programação para a construção de modelos mais complexos e um longo período de tempo para finalização.

Em contrapartida, os simuladores possuem elementos gráficos que facilitam a implementação, demandando menor tempo e conhecimentos técnicos de programação, mas apresentam menor flexibilidade para representar os detalhes do sistema real e as restrições para controlar os experimentos sob condições mais específicas.

Na Tabela 1 ilustram-se alguns exemplos de *softwares* de simulação de eventos discretos que permitem a criação da lógica de modo mais intuitivo e visual, indicando a empresa fabricante do *software*.

Os *softwares* como Anylogic e FlexSim permitem a modelagem de problemas através da conexão de objetos localizados na biblioteca de recursos, permitindo também o desenvolvimento de animações bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) o que, conseqüentemente, facilita a visualização e interpretação lógica do sistema.

O software Arena trabalha através da criação de lógicas em ambiente bidimensional, em que a construção se dá através da adição de blocos semelhante a construção de fluxogramas, no entanto com a inserção de comandos e dados de entrada.

Tabela 1 - *Softwares* de Simulação.

SOFTWARES DE SIMULAÇÃO	DESENVOLVEDOR
ANYLOGIC	<i>AnyLogic Company</i>
ARENA	<i>Arena Rockwell Automation</i>
FLEXSIM	<i>FlexSim Software Products</i>

Fonte: Autor (2022).

2.4.5 Modelagem e Simulação utilizando o *FlexSim*®

A modelagem e simulação deste estudo foi realizada com a aplicação do *software FlexSim*®. Como já dito anteriormente, o *software* desenvolvido pela *FlexSim Software Production* nos Estados Unidos (EUA), consiste em uma plataforma comercial voltada para a modelagem e simulação de eventos discretos aplicada para a construção de modelos virtuais completos de sistemas de produção e logística industriais.

O *software FlexSim*® realiza experimentos de simulação para auxiliar na tomada de decisão do sistema, modelar os dados de entrada ajudando na identificação dos gargalos e de recursos ociosos (QINGTIAN, 2014; ZHU et al., 2014). Além disso, dispõe de diversas opções de ferramentas para o auxiliar o desenvolvimento e apresentação de modelos computacionais, tais como (SIMÓN-MARMOLEJO et al., 2013):

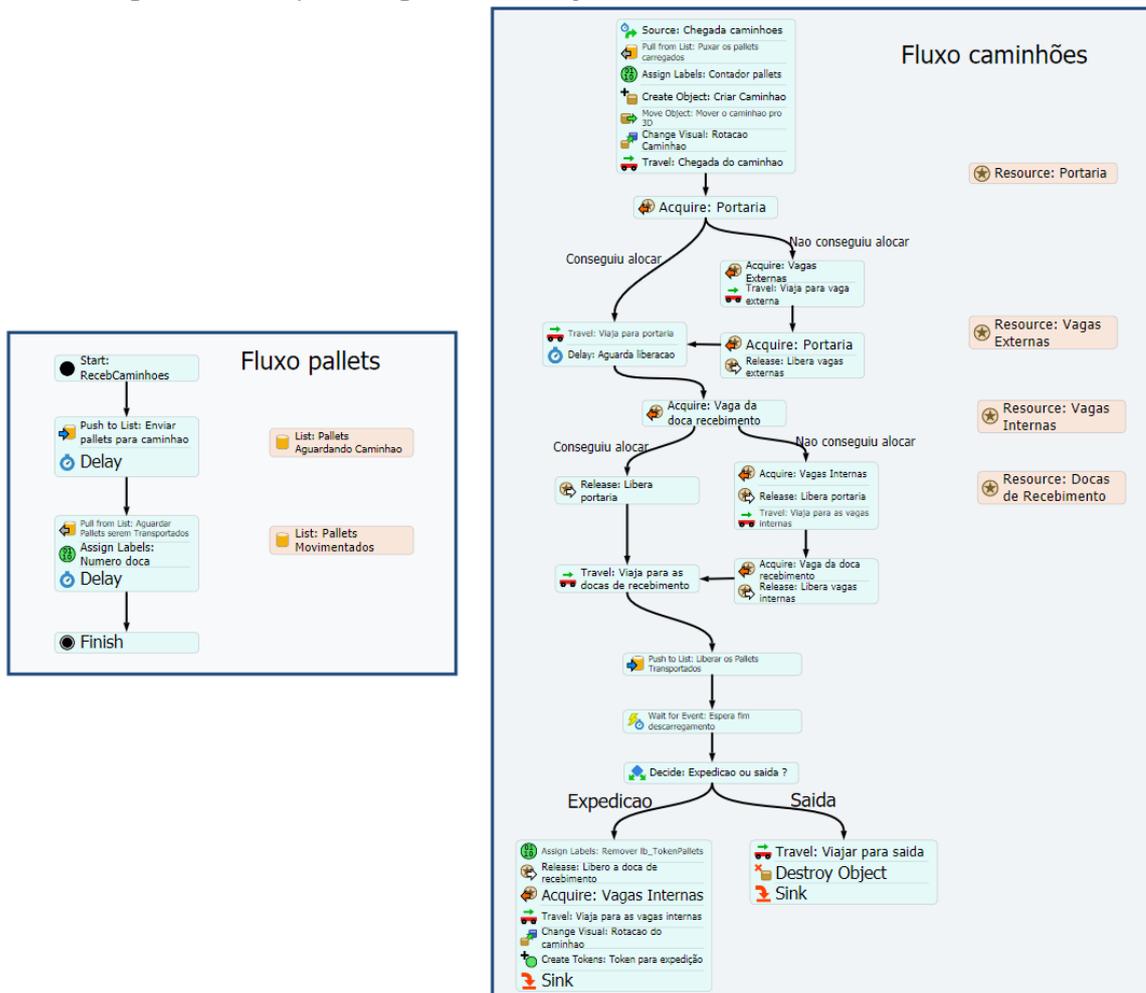
- a) Possibilita a simulação de sistemas discretos, como também aceita o processamento de modelos híbridos e contínuos;
- b) Possui simulação orientada a objetos, auxiliando a melhor visualização dos fluxos de produção;
- c) Ambiente para a visualização 3D dinâmico da simulação que pode ser utilizado para acompanhamento em tempo real;
- d) Permite integração com plataformas CAD, como também importação de objetos tridimensionais em extensões como: .3ds, dwg e .dae;
- e) Possui uma biblioteca própria que possibilita e facilita aplicar a situações complexas sem a necessidade de construir e editar códigos com programações computacionais complexas;
- f) Integra ferramentas de otimização e estatística para a avaliação rápida de novas condições e cenários;
- g) Os tempos utilizados pelo *software* podem ser expressos por meio de distribuições de probabilidade;
- h) Construção de *dashboards* através da coleta dos dados, podendo ser visualizados ao mesmo tempo em que a execução do modelo acontece.

O *software* oferece o módulo integrado de programação em *Process Flow* que possibilita a construção da lógica semelhante a um fluxograma conforme ilustrada na Figura 6. Com o auxílio deste módulo, a lógica se mostra mais intuitiva, pois a execução das atividades é realizada em conformidade com a sequência lógica em que as atividades são inseridas no módulo.

A ferramenta *Process Flow* permite a substituição de forma simplificada e eficiente da programação e/ou edição de grandes códigos computacionais, em que muitas vezes podem ser bastante complexos para a construção e validação do código computacional construído.

Segundo Cueva (2016), a introdução deste recurso, o qual pode ser aplicado de modo isolado ou aliado ao modelo 3D, possibilita a customização de modelos computacionais, tornando-os mais precisos e dinâmicos.

Figura 6 - Exemplo da lógica de simulação construída no módulo *Process Flow*.



Fonte: Autor (2022).

Outro recurso bastante utilizado é o *Global Table*, pois esta ferramenta é capaz de armazenar diversos tipos de dados como números, *strings*, ponteiros, vetores, *FlexScript* (linguagem computacional utilizada no *software*), *bundles* ou variáveis rastreadas (*tracked variables*).

O recurso *Global Table* consiste em um conjunto de tabelas de controle geral do modelo, possibilitando a apresentação sintética todos os valores aplicados para o modelo na simulação, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo da *Global Table*.

	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7
Row 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Row 18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Numbers	12.00	34.00	56.00	78.00	910.00	1112.00	1314.00
Strings	A	B	C	D	E	F	G
Pointers	/Source1	/Queue1	/Processor1	/Separator1	/Combiner1	/Operator1	/Sink1
Arrays	Array[3]: {1, 2, 3}						
Bundles	1 entries, [Col 0]						
Tracked Variables	0	0	0	0	0	0	0
Table Data	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: *FlexSim*.

A principal vantagem de utilização deste recurso baseia-se no fato de facilitar a alteração de valores de parâmetros e dados de entradas do modelo, não sendo necessário alterar os valores em todos os objetos do modelo relacionados.

Após a execução do modelo de simulação, os resultados podem ser consultados nos *dashboards* disponíveis no *software*, facilitando assim a análise dos resultados. Nos *dashboards* também é possível visualizar e acompanhar simultaneamente vários indicadores de interesse, explicitando informações como dados percentuais de utilização de recursos, de distribuição de componentes entre atividades, de formação de gargalos em etapas específicas no processo, tempos de processamento locais e gerais, entre outros.

No *dashboard* apresentado na Figura 8, ilustram-se os indicadores: tempos de processamento dos recursos; informação correspondente ao total de entradas e

saídas; período de utilização dos recursos; formação de filas e identificação de gargalos.

Figura 8 - Exemplo de *dashboard* no modelo de simulação.



Fonte: FlexSim®.

Outro recurso disponível no FlexSim® é o módulo *ExpertFit*. Este módulo possibilita utilizar de forma mais robusta a simulação com modelos estocásticos/probabilístico e possibilita integração com o módulo *ExpertFit*.

O módulo *ExpertFit* permite o processamento de dados tabulados e facilita a determinação da melhor distribuição de probabilidade para representação destes, bem como a definição de valores de parâmetros a serem inseridos na programação do modelo computacional. Ademais, este recurso permite a inserção de curvas de distribuição de probabilidades em diversas atividades associadas ao modelo, fazendo-se, portanto, uma representação virtual mais fiel à realidade (AVERILL M. LAW & ASSOCIATES, 2018).

Além vantagens apresentadas com o uso do FlexSim® aqui indicadas, a escolha do *software* para realizar a simulação neste trabalho deu-se, também, ao fato de que a plataforma possui todas as ferramentas em um único espaço de trabalho de fácil manuseio e fácil construção da lógica, não necessitando de linguagem computacional, e recursos de animação 3D, que têm sido de grande importância para o emprego do mesmo e por fim aplicar os conhecimentos obtidos durante o período de estágio.

No próximo capítulo detalham-se as etapas metodológicas utilizadas para a construção do modelo de simulação aplicado no estudo de caso considerado neste trabalho.

3. METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Neste capítulo apresenta-se o detalhamento da metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo de caso considerado neste trabalho.

3.1 Metodologia

A metodologia de pesquisa segundo Prodanov e Freitas (2013) pode ser classificada de acordo com três variáveis, isto é, quanto à sua natureza, aos objetivos e aos procedimentos técnicos adotados. O presente estudo pode ser definido de natureza aplicada, pois, segundo Prodanov e Freitas (2013), o estudo fornece conhecimentos para aplicação prática a fim de gerar soluções relacionadas à problemática.

Em relação ao objetivo, a pesquisa se caracteriza pelo modo explicativo, que segundo Gil (2002), busca procurar e explicar a problemática através de registros, abordar diversas análises e classificações com o intuito de interpretar os acontecimentos observados.

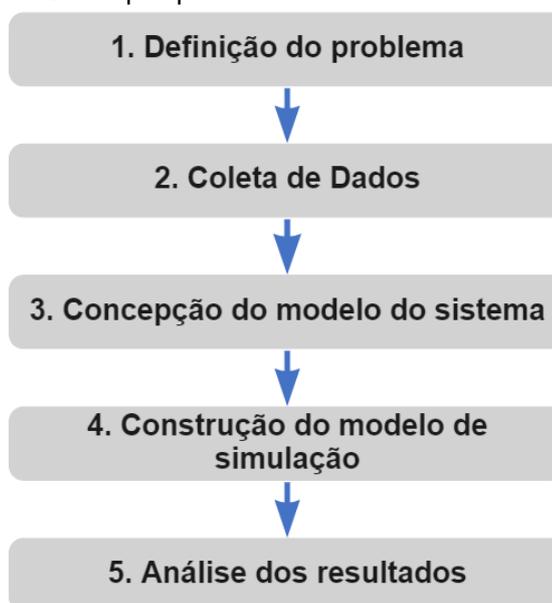
O presente estudo é definido como um estudo de caso em relação aos procedimentos técnicos, pois conforme Prodanov e Freitas (2013), o estudo de caso se caracteriza pelo fato de ser aplicado a uma problemática com a finalidade de gerar aplicações práticas de conhecimento para solucionar o tema em questão.

O estudo de caso apresentado neste trabalho foi desenvolvido a partir de um projeto realizado durante o estágio na empresa FlexSim Brasil. Este projeto teve como foco utilizar ferramenta de simulação para realizar a análise da implementação de uma proposta de construção de um pátio ferroviário de carregamento e descarregamento no porto de Santos. As análises levam em consideração as operações de carregamento e descarregamento, atendendo às restrições do sistema em diferentes cenários propostos.

3.2 Etapas de Desenvolvimento do Trabalho

A metodologia de desenvolvimento a ser seguida neste trabalho foi dividida nas seis etapas ilustradas na Figura 9, como sugerido por Zhu et al. (2014). Estas etapas foram fundamentais para a realização do estudo, bem como alcançar os objetivos propostos. Nas seções 3.2.1 Definição do Problema a 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES, detalham-se cada uma dessas etapas.

Figura 9 - Etapas para o desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2014).

3.2.1 Definição do Problema

Conforme Andrade (2021), o Porto de Santos é o porto mais importante do Brasil, visto que a movimentação de cargas é a maior entre todos os outros portos brasileiros. No entorno do porto ocorrem muitas operações de carregamento e descarregamento de cargas em trens. Essas operações geralmente ocorrem em pátios ferroviários.

A construção de pátios ferroviários é de extrema importância para o desenvolvimento do Brasil, uma vez que a maioria das cargas transportadas são matérias primas consequentemente, toda a economia brasileira é impactada positivamente. Além do impacto na economia outros fatores que devem ser levados em conta são:

- a) Redução do número de caminhões;
- b) Diminuição do risco de acidentes na região portuária;
- c) Rapidez e velocidade para o envio da carga;
- d) Redução no custo de frete;
- e) Redução da poluição;
- f) Redução de congestionamentos nas proximidades do Porto;
- g) Aumento da quantidade de carga transportada.

A operação atual ocorre por meio do transporte rodoviário, ou seja, atualmente a empresa abastece inúmeros caminhões diariamente. Deste modo a empresa encarece os custos associados ao produto, como também geram filas, congestionamentos e atrasos na operação de carregamento dos caminhões. Através do pátio ferroviário busca-se melhorar a operação de carregamento de modo a atender o aumento de demanda ao longo dos anos e reduzir as movimentações rodoviárias visto que encarecem bastante nos custos.

Os benefícios oferecidos pela utilização do pátio ferroviário, bem como as vantagens apresentada do modal ferroviário e a maior utilização da sincromodalidade, contribuem para a implantação do pátio ferroviário.

Desta maneira, o pátio ferroviário do nosso objeto de estudo classificado como pátio simples (Figura 3), apresenta a função de manobrar pequenos grupos de vagões devido à alta limitação determinada pelo *layout* das linhas ferroviárias. Este tipo de pátio estruturalmente não possui áreas separadas para recebimento, classificação e partida, e devido ao caráter de dependência e interferência entre as atividades de pátio e a operação de transporte apresentam os maiores tempos de operação.

Nesse contexto, este trabalho considera a implantação de um pátio ferroviário no entorno do Porto de Santos. A área em que o pátio será construído se encontra em uma área limitada e muito movimentada, devido à sua proximidade com as rodovias e as movimentações geradas pelo Porto de Santos.

Agravadas pelas limitações que ocorrem próximo à área, a construção dos pátios ferroviários torna-se ainda mais restritiva devido ao alto fluxo de cargas e as conexões intermodais existentes e, também, à limitação da infraestrutura por estar localizada em uma pequena área destinada para a construção da ferrovia necessária para a movimentação de locomotivas e vagões no pátio.

A Figura 10 busca ilustrar a chegada da composição ferroviária para o abastecimento no pátio ferroviário.

Figura 10 - Chegada da composição ferroviária.



Fonte: Johannes Smit (2017).

As análises realizadas com os resultados do modelo de simulação permitirão definir, por exemplo, a quantidade de posições de carregamento, como ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Posições de carregamento de vagões tanque do pátio ferroviário.



Fonte: Carbis Solutions (2022).

A Figura 12 ilustra o processo de carregamento dos vagões, onde cada posição de carregamento é alocada para cada vagão.

Figura 12 - Processo de carregamento dos vagões.



Fonte: Carbis Solutions (2022).

A Figura 13 ilustra o ordenamento dos vagões para seu abastecimento dos vagões nas posições de carregamento do pátio ferroviário.

Figura 13 - Sequenciamento dos vagões nas posições de carregamento.



Fonte: Carbis Solutions (2022).

Com a construção do pátio ferroviário, a empresa busca aumentar o volume de carga movimentada e, sobretudo, priorizar o uso do modal ferroviário. Dessa maneira, este estudo utiliza a aplicação da simulação como forma de analisar o volume movimentado acumulado para o período de um ano com a construção do pátio de

carregamento ferroviário próximo ao porto, avaliar diferentes cenários e propor um plano de sugestões e melhorias para a implantação e operação no pátio ferroviário.

3.2.2 Coleta e Tratamento de Dados

Devido ao pátio ferroviário se apresentar em fase de análise de implementação e construção, foram utilizadas premissas apresentadas na Tabela 2 para o desenvolvimento do modelo. Estes dados foram fornecidos durante o período em que foi realizado o projeto de simulação do pátio ferroviário. As premissas utilizadas neste trabalho foram multiplicadas por um fator de ajuste com a finalidade de manter sigilo quanto às informações da empresa.

Destaca-se que os parâmetros considerados na Tabela 2 foram levantados por especialistas da empresa contratante, no qual se utilizou dados de outro pátio ferroviário durante um período de 12 meses no ano de 2021, sendo um ano acometido de uma pandemia, mas que, no entanto, exigiu grandes demandas, segundo informações.

O tempo de engate foi representada por uma distribuição triangular com valores de mínimo, moda e máximo, indicados pelo especialista responsável pela programação da operação de engate.

Tabela 2 - Premissas consideradas no estudo.

Indicador	Quantidade
Capacidade Volumétrica dos Vagões (m ³)	106
Número de Posições de Carregamento	8
Número de Vagões no Comboio Completo	60
Tempo de Engate Locomotiva - Vagão (minutos)	triangular (5.35,10.7,7.79)
Tempo de Carga dos Vagões (minutos)	96,3
Frequência de Chegada do Comboio Completo (minutos)	1440
Velocidade da Locomotiva Sem Vagão (Km/h)	5,35
Velocidade da Locomotiva Com Vagão Cheio (Km/h)	3,21
Velocidade da Locomotiva Com Vagão Vazio (Km/h)	5,35
Taxa de Falha da Locomotiva (%)	5,35

Fonte: Autor (2022).

As premissas foram incluídas na *Global Table* “gt_Input”, utilizada para o controle dos dados de entrada para o modelo de simulação. A utilização desse recurso teve como principal vantagem a facilidade de análise de diversos cenários, devido à

possibilidade de alteração dos tempos de operação, quantidades de vagões no comboio completo e das posições de carregamento, velocidade, entre outros parâmetros.

Para representar as paradas e/ou manutenções da locomotiva no modelo de simulação foi determinada uma taxa de falhas da locomotiva no qual ela também foi fornecida pelos especialistas.

Para o tempo de engate, foi utilizado uma distribuição triangular, visto que não houve registros suficientes para determinar a melhor distribuição estatística. Conforme Leuangthong et al. (2008), essas propriedades tornam a distribuição triangular adequada quando não há dados suficientes para gerar a distribuição e se conhece apenas o valor mínimo e máximo e a moda.

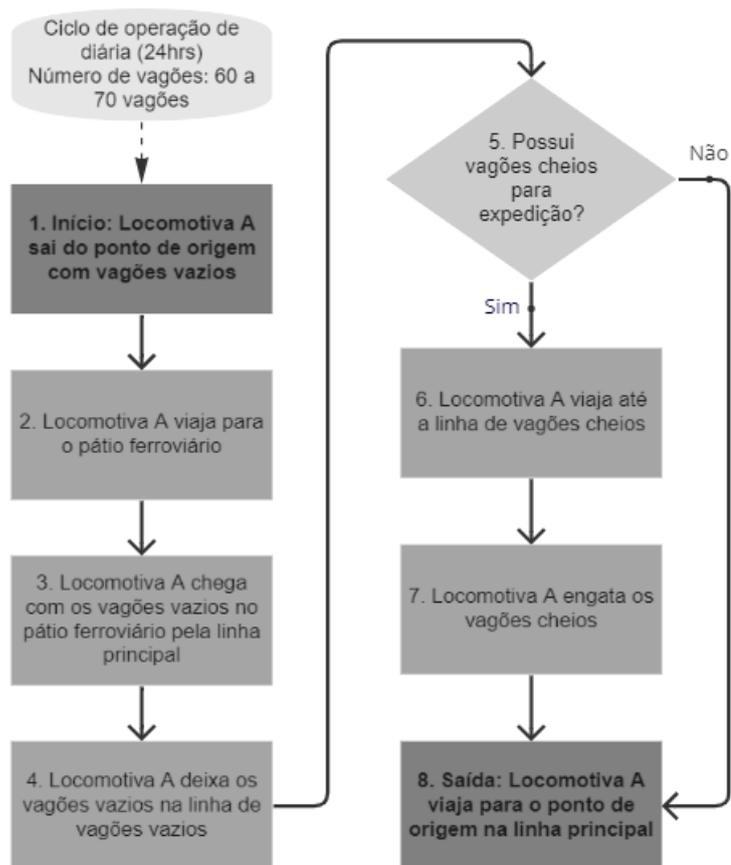
3.2.3 Concepção do Modelo do Sistema

Nesta seção apresenta-se o detalhamento das operações consideradas no pátio ferroviário, objeto de estudo.

A operação de carregamento dos vagões no pátio ferroviário conta com duas locomotivas que são operadas para realizar as movimentações dos vagões, e aqui denominadas “Locomotiva A” e “Locomotiva B”. A Locomotiva A é responsável por chegar com os vagões vazios e sair com os vagões carregados (vagões cheios) e, a Locomotiva B, é responsável por realizar o processo de carregamento de vagões vazios.

Na Figura 14 e na Figura 15 são ilustrados os modelos conceituais para cada uma das locomotivas. Logo, os modelos conceituais são elaborados com o objetivo de fornecer um melhor entendimento ao leitor, porque nele são detalhadas as principais etapas das movimentações que geralmente são realizadas no pátio ferroviário. Os modelos conceituais foram construídos com base nas informações passadas pelos especialistas e validados após a construção.

Figura 14 - Modelo conceitual para operações de Locomotiva A.



Fonte: Autor (2022).

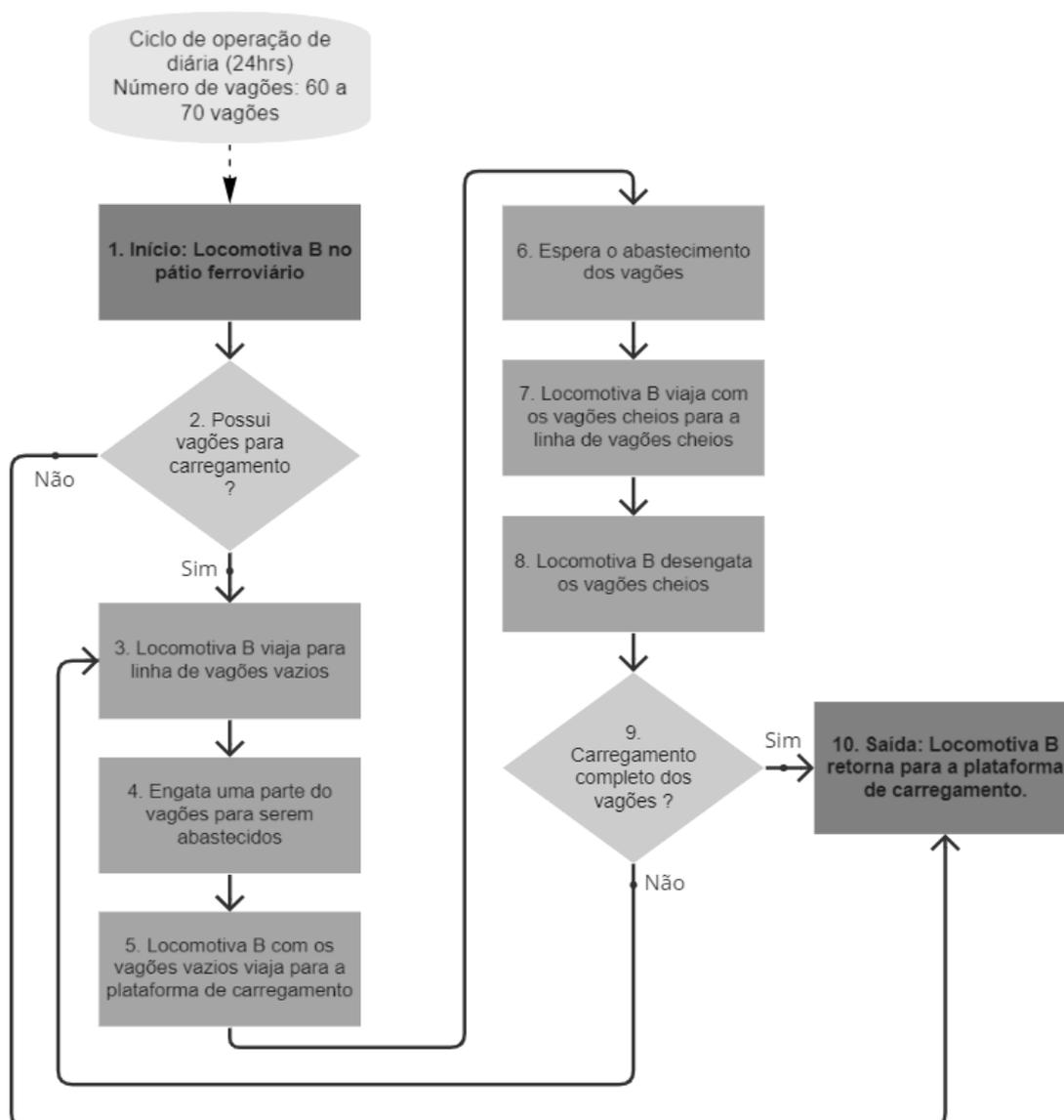
Considerando um horizonte de movimentação de 24 horas, e as premissas indicadas na Tabela 2, as operações são iniciadas para realizar a movimentação de abastecimento de 60 a 70 vagões.

Desta forma, ao iniciar a operação, a Locomotiva A sai do ponto de origem e viaja com os vagões vazios para o pátio ferroviário, onde os vagões serão abastecidos, como ilustrado nos Passos 1 a 3 da Figura 14. Ao chegar no pátio, a Locomotiva A se direciona para a linha de vagões vazios, onde os vagões são desengatados e, posteriormente, abastecidos (Passo 4 - Figura 14).

Após o desengate dos vagões, a Locomotiva A verifica se possui vagões carregados para serem a expedição (Passo 5 - Figura 14), caso tenha vagões abastecidos, a Locomotiva B viaja para a linha de vagões carregados e realiza o engate dos vagões. Por último, viaja com os vagões carregados para o ponto de origem onde os vagões serão expedidos (Passos 6 a 8 - Figura 14).

Para o caso em que não existam vagões carregados para a expedição, a Locomotiva A retorna para o ponto de origem (Passo 5 e Passo 8 da Figura 14). O processo de carregamento dos vagões realizados pela Locomotiva B é ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Modelo conceitual da Locomotiva B.



Fonte: Autor (2022).

A operação de carregamento dos vagões é iniciada após a chegada da Locomotiva A com os vagões vazios para serem abastecidos. Ou seja, a Locomotiva B aguarda a chegada dos vagões vazios no pátio ferroviário (Passo 1 - Figura 15).

Após a chegada dos vagões vazios trazidos pela Locomotiva A, a Locomotiva B viaja para o ponto em que estão os vagões vazios e realiza o processo de engate de um lote de vagões vazios (Passos 2 a 3 - Figura 15). Este lote é determinado pelo número de posições de carregamento, de forma que em cada posição seja alocada um vagão para abastecimento, exemplo: em caso de 6 posições de carregamento no pátio 6 vagões serão abastecidos simultaneamente.

A quantidade de vagões que são engatados e levados para as plataformas de carregamento varia conforme o número de posições de carregamento existentes. E, o impacto dessa variação na operação será o objeto de estudo deste trabalho (Passo 4 - Figura 15). Isto é, a simulação deverá indicar o número de posições de carregamento no pátio que melhor se adequa a operação a ser realizada de forma a atender as restrições do sistema a médio e longo prazo.

Continuando a operação (Passos 5 e 6 da Figura 15), após a chegada da Locomotiva B na plataforma de carregamento com os vagões vazios, é iniciado o processo de carregamento dos vagões e a Locomotiva B aguarda o carregamento. Quando o processo é finalizado, a Locomotiva B segue com os vagões já carregados para a linha de vagões carregados e realiza o desengate dos mesmos (Passos 6 a 8 - Figura 15).

Após o desengate, é verificado se ainda existem mais vagões para serem carregados (Passo 9 - Figura 15). Em caso afirmativo, a Locomotiva B segue para a linha dos vagões vazios, realiza o engate destes vagões e segue novamente para a plataforma de carregamento. Por conseguinte, este ciclo de movimentação da Locomotiva B para o carregamento dos vagões é finalizado quando todos os vagões estiverem carregados. Ou seja, os Passos 3 a 9 se repetem até o abastecimento completo dos vagões.

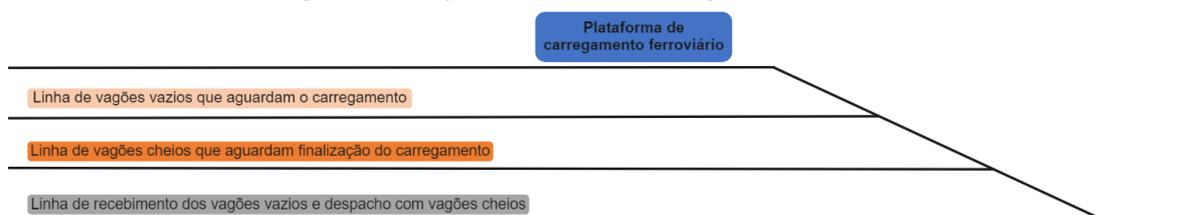
Completado o carregamento do lote completo de vagões, a Locomotiva B retorna para a plataforma de carregamento e o ciclo de carregamento é finalizado. O ciclo se reinicia com a Locomotiva B aguardando a chegada de novos vagões para serem carregados.

A movimentações dos trens ocorrem em quatro linhas férreas. A linha principal é utilizada pela Locomotiva A para a chegada dos vagões vazios e saída com os vagões carregados. As duas linhas de classificação são utilizadas pela Locomotiva B

para realizar as movimentações dos vagões. Já a quarta linha férrea é onde se encontra a plataforma de carregamento do pátio ferroviário.

Ou seja, a primeira linha é utilizada para a chegada dos vagões, a segunda linha para alocar os vagões vazios e a terceira linha para realizar o carregamento dos vagões nas plataformas de carregamento do pátio. Na Figura 16 ilustra-se o *layout* do pátio ferroviário a ser construído, detalhando o posicionamento das linhas.

Figura 16 - Layout do pátio de carregamento ferroviário.



Fonte: Autor (2022).

3.2.4 Modelo de Simulação

Nesta seção, descreve-se as etapas da construção da lógica utilizada no modelo de simulação para representar virtualmente cada um dos processos considerados na Figura 14 e Figura 15, segundo a lógica e sequência em que são realizadas no sistema real, ou seja, de forma a representar as movimentações no pátio ferroviário em estudo.

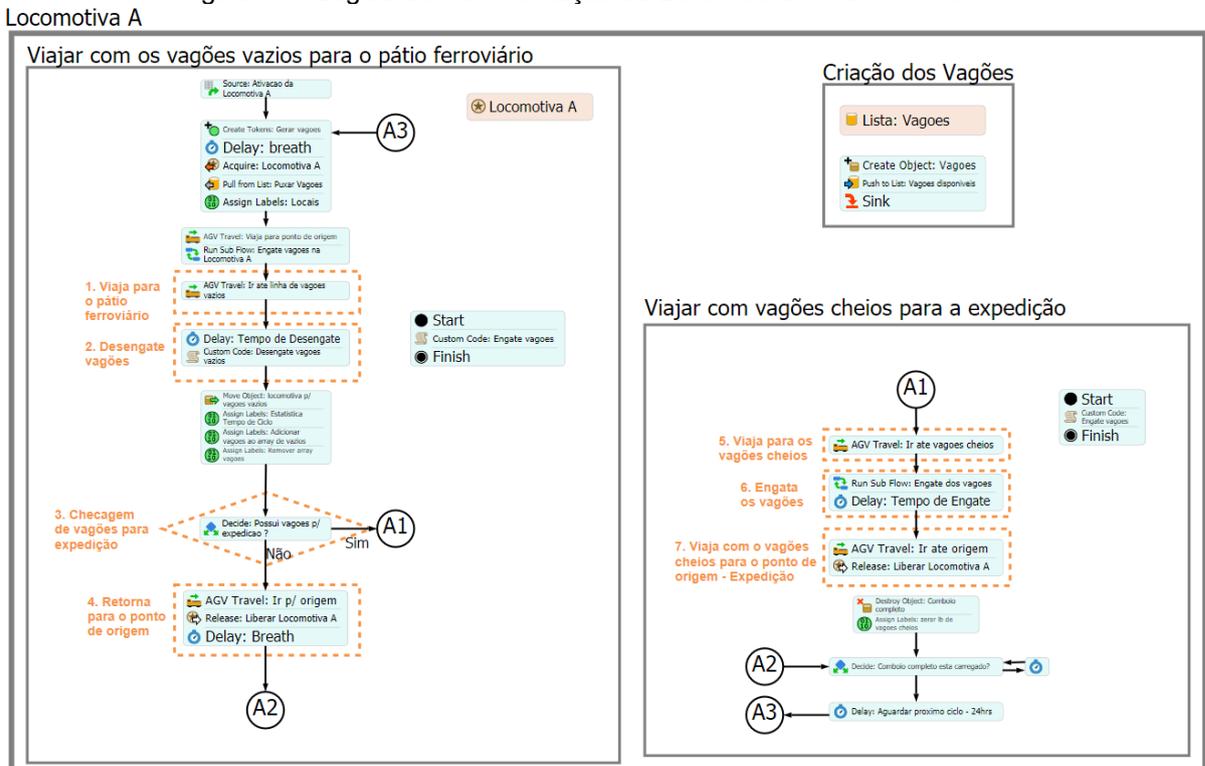
Assim, os modelos conceituais representados nos fluxogramas na Figura 14 e Figura 15 são fundamentais para facilitar a programação da lógica no modelo computacional de simulação, pois fornecem a base para representar as características necessárias a serem expostas e reproduzidas no modelo computacional, os processos e operações, a definição de recursos e entidades necessários para a concepção do modelo em questão.

Tendo em vista a compatibilidade do modelo do sistema com a utilização de ferramentas computacionais de modelagem e simulação de eventos discretos, bem como as vantagens apresentadas na seção 2.4.2 Vantagens e Desvantagens, o *software* de simulação *FlexSim*® foi selecionado para o desenvolvimento deste estudo, tendo como base três recursos principais oferecidos pelo *software*: *Global Table*, *Process Flow* e Ambiente 3D de simulação, como detalhados a seguir.

O recurso *Process Flow* é um dos módulos integrados disponíveis no *software FlexSim®*, o qual aliada a esses fluxogramas facilita a visualização, representação e a estruturação da sequência lógica das atividades e processos, visto que possibilita a modelagem de processos por meio da construção de diagramas de processo. O *Process Flow* utiliza entidades virtuais denominadas fichas, as quais representam quantidades em trânsito no modelo. Portanto, cada atividade compreende um bloco de códigos que pode ser modificado conforme o objetivo da lógica.

Ressalta-se que o *Process Flow* atua simultaneamente com o modelo 3D, o qual representará a execução de toda as movimentações aplicadas aos recursos/objetos do modelo. Para o desenvolvimento do modelo de simulação do pátio de carregamento, considerou-se duas lógicas de movimentação: a primeira lógica foi construída para a representar as operações realizadas pela “Locomotiva A”, como ilustrado na Figura 17, e a segunda lógica representar as operações realizadas pela “Locomotiva B”, como ilustrado na Figura 18.

Figura 17 - Lógica de movimentação da Locomotiva A no *Process Flow*.



Fonte: Autor (2022).

A Locomotiva A realiza a movimentação de chegada com os vagões vazios e saída com os vagões carregados. Logo, foi necessário criar a locomotiva no modelo 3D, ligando-a ao caminho que ela irá percorrer e, por meio do *Process Flow*, indicar as movimentações que ela deve realizar.

A quantidade de vagões vazios é criada na lógica no bloco “Criação de vagões” com base no valor informado na linha “Número de Vagões no Comboio Completo” da *Global Table* (Tabela 2). Desse modo, o modelo se torna mais flexível para ser analisado ao se aplicar diferentes valores e cenários de análise.

Após a criação dos vagões, a locomotiva está pronta para iniciar a operação. A Locomotiva A viaja com os vagões vazios para a linha férrea de vagões vazios no pátio ferroviário (Passo 1 Figura 17). No local denominado de “cp_vazios” do ambiente 3D. Realiza-se o desengate dos vagões, o qual é representado pela atividade tempo de desengate (Passo 2 Figura 17), cujo tempo de engate ou desengate é determinado na Tabela 2 linha “Tempo de engate dos vagões”.

Este tempo foi um dado adotado como premissa, pois não há registros suficientes para descrever a melhor distribuição. Desta forma, foi-se utilizado uma distribuição triangular (5.35,10.7,7.79), frequentemente utilizada, visto que sua função densidade de probabilidade é definida dentro dos limites inferior e superior (LEUANGTHONG et al., 2008).

Após o desengate dos vagões, é verificado na ficha “Decide: Possui vagões p/ expedição” (Passo 3 Figura 17) se possuem lote completo de vagões abastecidos a serem expedidos. Caso existam a lógica, segue o fluxo A1 (indicado pela seta e ilustrado na Figura 17) e, dessa maneira, a Locomotiva A viaja para a linha onde os vagões se encontram e realiza o engate dos vagões cheios (Passos 5 e 6 - Figura 17).

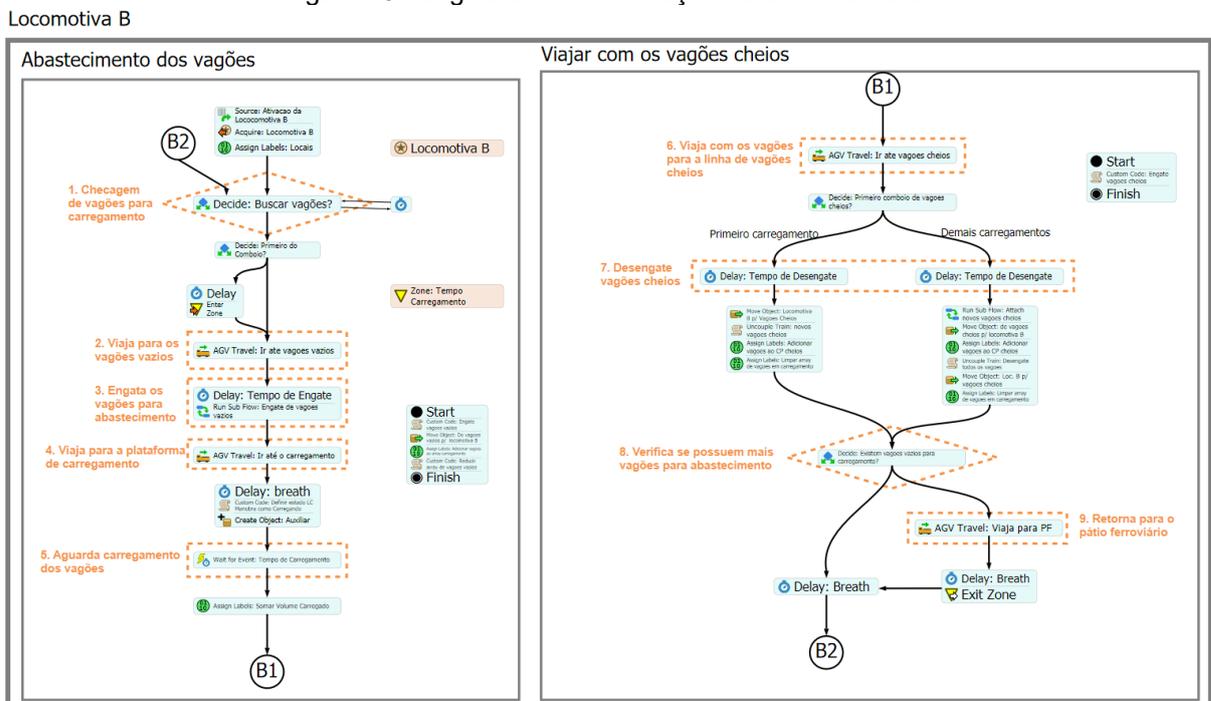
Ao final, a Locomotiva A viaja para o ponto de origem na linha principal, no qual a locomotiva irá levar os vagões para a expedição, local não informado devido a irrelevância para o estudo de caso. Caso não existam mais vagões, continua-se o fluxo da lógica na Figura 17 (Passos 3 e 4) e, então, a Locomotiva A retorna para o ponto de origem na linha principal, porém sem vagões cheios.

Após a saída da Locomotiva A para o ponto de origem, o ciclo de carregamento dos vagões começa novamente. A Locomotiva A sai do ponto de origem com os vagões vazios para abastecimento e saem com os vagões cheios, caso existam.

Assim como a operação acontece, a lógica começa a executar um ciclo contínuo diário de 24 horas, no qual se repete todos os dias da semana. O modelo de simulação é finalizado conforme o período de simulação determinado, que para o nosso estudo o período é de 1 ano.

A lógica que representa a operação da Locomotiva B considera a movimentação dos vagões vazios nas plataformas de carregamento e a movimentação dos vagões carregados para a linha de vagões carregados, em que o local a ser desengatado foi denominado “cp_cheios”.

Figura 18 - Lógica de movimentação da Locomotiva B.



Fonte: Autor (2022).

Então, a lógica que representa a da Locomotiva B ocorre após a checagem da chegada dos vagões vazios no local denominado de “cp_vazios” do ambiente 3D (Passo 1 Figura 18). Com a ativação da lógica, a Locomotiva B viaja para a linha férrea onde os vagões vazios se encontram (Passo 2 Figura 18) e realiza o processo de engate dos vagões (Passo 3 Figura 18).

O tempo de engate corresponde ao valor definido determinado na *Global Table* (Tabela 2). A quantidade de vagões a serem engatados e movimentados para a plataforma de carregamento também se apresenta de forma flexível na *Global Table*

(Tabela 2) e sua fácil alteração permite a criação de cenários, podendo variar entre 8 a 10 posições de carregamento.

Ao finalizar o engate dos vagões, a Locomotiva B viaja com os vagões vazios para as plataformas de carregamento (Passo 4 Figura 18). Ao chegar nas plataformas de carregamento, a Locomotiva B aguarda o tempo de carregamento dos vagões (Passo 5 Figura 18), também determinado na *Global Table* (Tabela 2).

Após finalizar o carregamento do primeiro lote de vagões, a Locomotiva B, com os vagões carregados, viaja para o local da linha dos vagões carregados, denominada de “cp_cheios” (Passo 6 Figura 18) e realiza o processo de desengate dos vagões (Passo 7 Figura 18).

Ao desengatar os vagões, a Locomotiva B verifica se possui mais vagões para serem abastecidos (Passo 8 Figura 18) e ao verificar a necessidade de carregamento do restante de vagões vazios, a Locomotiva B viaja novamente para o local onde os vagões vazios se encontram.

O ciclo de movimentação dos vagões vazios a serem carregados se repete até a finalização completa do carregamento dos vagões. Após a finalização do abastecimento dos vagões, a Locomotiva B retorna ao pátio de carregamento (Passo 9 Figura 18).

Desta maneira, após o período de 24 horas, a operação de carregamento começa novamente e a Locomotiva A retorna ao pátio de carregamento com o comboio de vagões vazios a serem carregados, desengata os vagões vazios no “cp_vazios” e viaja para a o “cp_cheios”, onde ocorre o engate dos vagões carregados para serem expedidos.

3.2.4.1 Modelo 3D da Simulação

O modelo foi construído com escalas proporcionais às medidas reais do pátio. As imagens das Figura 19, 20 e 21 foram obtidas com capturas de telas realizadas no *software FlexSim®*, através da visualização 3D, facilitando a visualização dos processos analisados.

Figura 19 - Local de chegada Locomotiva A.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 19 apresenta a Locomotiva A no ponto de início da operação e o pátio ferroviário no modelo de simulação.

Figura 20 - Locomotiva B na plataforma de carregamento.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 20 refere-se a Locomotiva B realizando o carregamento dos vagões nas plataformas de abastecimento.

Figura 21 - Linhas férreas do pátio ferroviário.



Fonte: Autor (2022).

Por último a Figura 21 exhibe as linhas férreas onde as locomotivas irão realizar as movimentações.

Na próxima seção explica-se os resultados obtidos do modelo computacional para os cenários de análise através da mudança de parâmetros como o número de posições de carregamento e o número de vagões a serem carregados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de simulação implementado tem como objetivo avaliar a operação ferroviária considerando alterações para o dimensionamento do pátio ferroviário. As rodadas de simulação foram programadas para gerar indicadores que pudessem representar o real funcionamento do sistema, permitindo fazer uma comparação quantitativa dos diferentes cenários avaliados.

Os principais indicadores analisados foram:

- a) Número de vagões para abastecimento (60 a 70 vagões);
- b) Número de posições de carregamento (8 a 10);
- c) Tempo de carregamento da operação ferroviária.

Para a execução do modelo, buscou-se avaliar o comportamento dos resultados para o período de 1 ano, frente às variações possíveis dos parâmetros estabelecidos nos cenários, como número de posições de carregamento e número de vagões para abastecimento no pátio.

Com relação a utilização das taxas de falhas da locomotiva e posterior análise dos estados que a locomotiva apresenta, segue-se a definição para cada estado:

- *Loading*: tempo que a Locomotiva A aguarda os vagões na plataforma de carregamento;
- *TravelLoaded*: tempo que a Locomotiva A viaja com vagões (cheios ou vazios);
- *TravelEmpty*: tempo que a Locomotiva A viaja sem vagões;
- *Idle*: tempo que a Locomotiva A está ociosa;
- *Breakdown*: tempo a Locomotiva A se encontra em estado de falha;

Desta forma, foram considerados 9 cenários, como ilustrado na Tabela 3, aplicando-se as possíveis alterações nas variáveis analisadas alterando número de vagões e número de posições.

Tabela 3 - Cenários de análise.

Cenário	Número de vagões	Número de posições
Cenário 1	60	8
Cenário 2	65	8
Cenário 3	70	8
Cenário 4	60	9
Cenário 5	65	9
Cenário 6	70	9
Cenário 7	60	10
Cenário 8	65	10
Cenário 9	70	10

Fonte: Autor (2022).

Para a obtenção dos resultados, foi utilizado as premissas definidas na Tabela 2 com as alterações dos parâmetros para cada cenário como ilustrado na Tabela 3. Após a execução do modelo para o período de 1 ano foi gerada a Tabela 4, no qual apresentam-se as variáveis de análise como também os indicadores a fim de determinar o melhor dimensionamento para o pátio ferroviário.

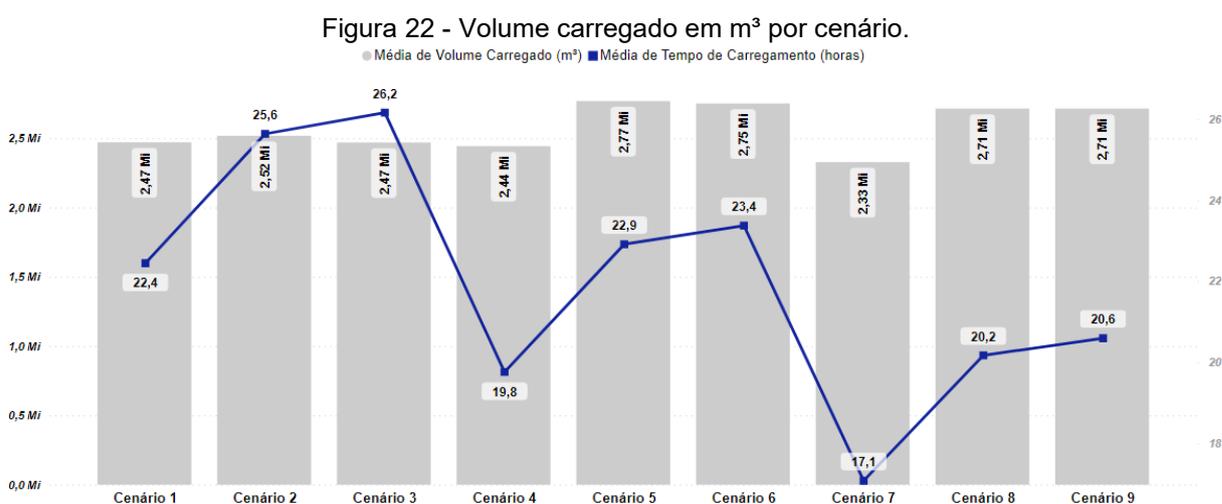
Tabela 4 - Resultados dos cenários

Cenário	Nº de vagões	Nº de posições	Tempo de Carregamento (horas)	Tempo de Ciclo (horas)	Volume Carregado (m³)
Cenário 1	60	8	22,44	23,98	2.470.893,92
Cenário 2	65	8	25,64	26,47	2.517.949,44
Cenário 3	70	8	26,16	26,99	2.469.359,04
Cenário 4	60	9	19,76	23,88	2.443.184,46
Cenário 5	65	9	22,91	24,08	2.768.298,12
Cenário 6	70	9	23,37	24,23	2.750.963,94
Cenário 7	60	10	17,07	23,88	2.327.738,8
Cenário 8	65	10	20,17	23,88	2.714.585,8
Cenário 9	70	10	20,59	23,89	2.714.426,8

Fonte: Autor (2022).

Analisando os resultados obtidos da simulação, podemos observar que os cenários 1, 4, 7, 8 e 9 atenderam ao tempo de ciclo determinado de 24 horas e os cenários 2, 3, 5 e 6 apresentaram tempo de ciclo superior ao máximo determinado.

É importante ressaltar que a tabela de resultados apresenta o volume carregado em m³ para o período de 1 ano. Assim como a Figura 22, busca enfatizar a média do volume carregado em m³ em relação ao tempo médio de carregamento para cada cenário.



Fonte: Autor (2022).

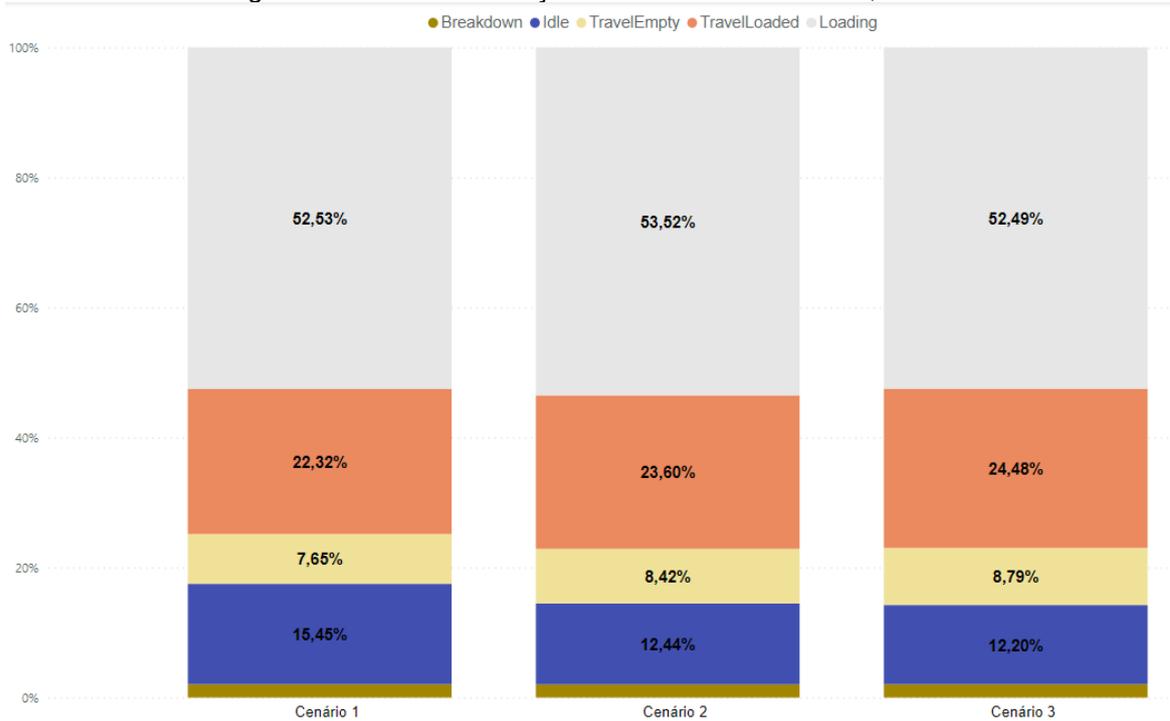
Como ilustrado na Tabela 3, as análises realizadas a seguir foram agrupadas em três grupos de análise, com o critério de possuir o mesmo número de posições de carregamento, facilitando o entendimento para cada cenário discretizado.

- Cenários 1, 2 e 3: Com 8 posições de carregamento.

Para os cenários com 8 posições de carregamento, conforme dados ilustrados na Tabela 4, os tempos de ciclo das operações foram iguais ou superiores ao tempo de ciclo máximo determinado, que era de 24 horas.

Quanto a utilização do Locomotiva B, não houve grandes variações quanto aos estados. No entanto ressalta-se que para o cenário 1 houve uma maior ociosidade da locomotiva, devido ao fato que por apresentar um tempo de carregamento igual a 22,4 horas, inferior ao tempo de carregamento do cenário 2 e 3, conseqüentemente ela teve que aguardar um tempo maior de parada para que a operação de carregamento iniciasse novamente.

Figura 23 - Taxa de utilização da locomotiva cenário 1, 2 e 3.



Fonte: Autor (2022).

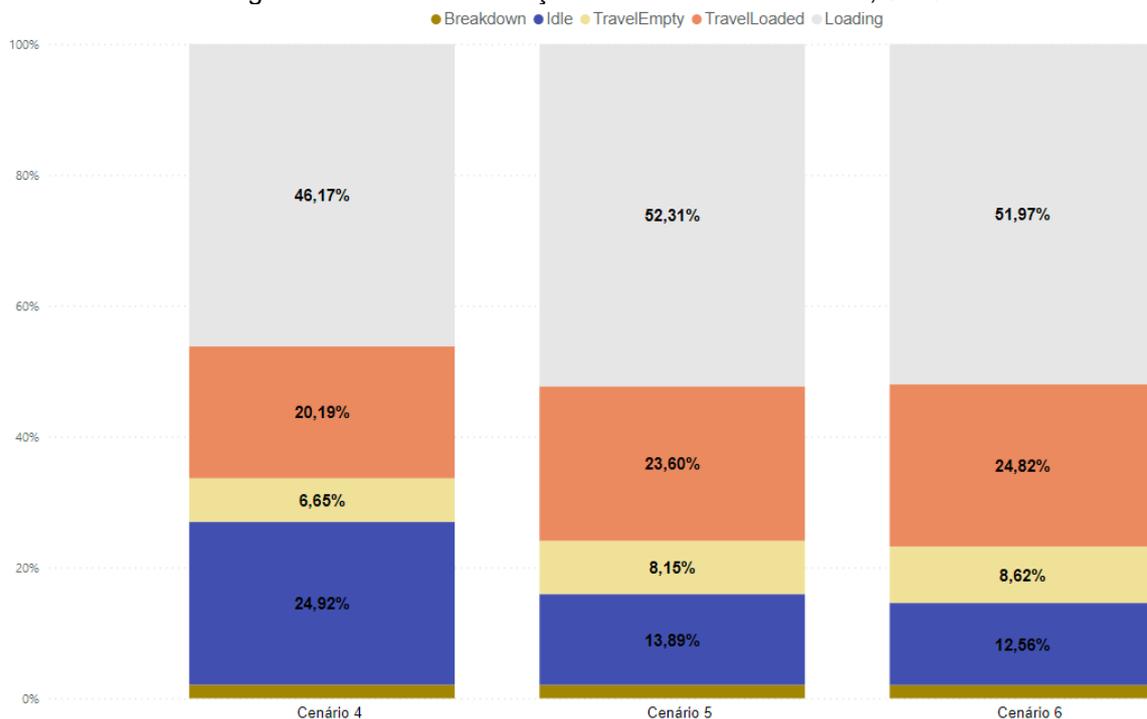
- Cenários 4,5 e 6: Com 9 posições de carregamento.

Para os cenários com 9 posições de carregamento, foi observado que apenas o cenário 4 atendeu a restrição do tempo de ciclo de 24 horas. Este apresentou o tempo de ciclo com 23,88 horas, inferior ao tempo máximo de ciclo estipulada. O tempo médio de ciclo do carregamento de 19,74 horas. Ou seja em 82,66% do tempo de ciclo a Locomotiva B se encontra realizando a operação de carregamento dos vagões e abastecendo cerca de 2,4 milhões de m³ por ano.

No entanto para o cenário 4 ao construir uma plataforma de carregamento com 9 posições de carregamento é importante observar que caso o volume carregado aumente, será necessário aumentar o número de vagões carregados. Desta maneira o tempo de ciclo pode não atender, ou pode se tornar bem próximo do período máximo estipulado como demonstra os resultados do cenário 5 e 6.

Outro ponto a ser destacado é em relação aos estados da locomotiva. O cenário 4 apresentou maior tempo de ociosidade, devido ao mesmo fator analisado no cenário 1, atende ao tempo de ciclo como também necessita aguardar um tempo maior na plataforma para o próximo carregamento.

Figura 24 - Taxa de utilização da locomotiva cenário 4, 5 e 6.



Fonte: Autor (2022).

Com relação aos cenários 5 e 6, devido o tempo médio de ciclo se aproximar bastante do tempo de ciclo máximo que a operação deve ocorrer, é de extrema importância adotar melhorias na operação para que o tempo de carregamento e o tempo de engate (Tabela 2) se reduza, visto que o volume carregado (superior a 2,75 milhões de m³) foram os maiores apresentados dentre todos os cenários analisados.

- Cenários 7,8 e 9: 10 posições de carregamento.

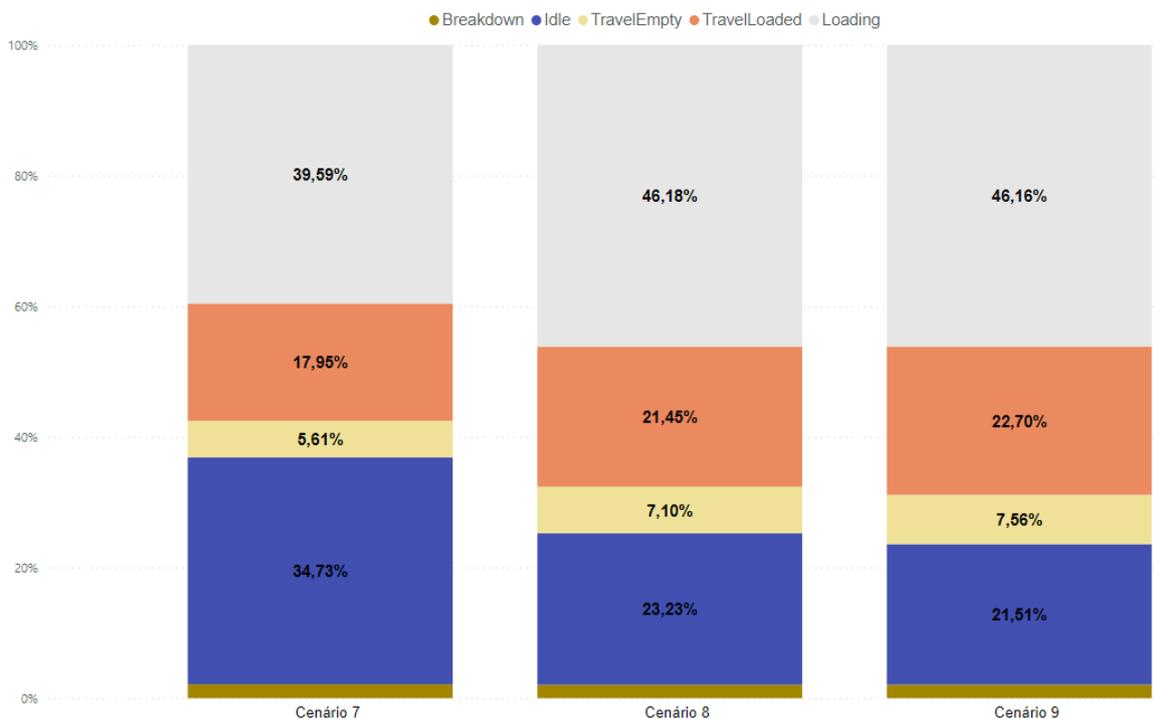
Todos os cenários com 10 posições de carregamento atendem a restrição do tempo máximo de ciclo. O cenário 7, com 60 vagões e 10 posições de carregamento apresentou o menor média de tempo de carregamento com 17,07 horas movimentando cerca de 2.327.738,8 de m³ nos vagões.

O cenário 8, com 65 vagões e 10 posições de carregamento, apresenta o segundo maior volume de carregamento com 2.714.585,8 m³, representado um aumento de 8,3% de volume carregado e de vagões carregados anualmente em relação ao cenário 7. O cenário 9, com 70 vagões e 10 posições de carregamento,

atingiu o maior volume carregado 2.714.426,8 de m³, ou seja, um aumento percentual de 16,67% volume carregado também em relação ao cenário 7.

Desta maneira, o cenário 7 com 10 posições de carregamento, atende bem ao dimensionamento do pátio ferroviário visto que pode haver um aumento de demanda de até 16,67% do volume carregado ao longo dos anos.

Figura 25 - Taxa de utilização da locomotiva cenário 7, 8 e 9.



Fonte: Autor (2022).

Com relação aos estados da locomotiva, o cenário 7 apresentou o maior tempo de ociosidade em relação aos cenários 8 e 9, pois como o tempo de médio de ciclo foi de 17,1 horas consequentemente necessitou de uma maior espera para o início do próximo carregamento.

Para os cenários 8 e 9 por mais que o tempo de ciclo tenha atendido, o tempo de carregamento do cenário 9 foi superior, como também obteve um menor volume carregado, pode-se dizer que devido ao tempo de carregamento ser maior, o cenário 9 provavelmente não completou toda a operação de carregamento do último dia, visto que a utilização da locomotiva para os estados de *travelloaded* e *travelempty* foi superior ao cenário 8. Assim como o tempo de ociosidade foi menor no cenário 9.

Devido ao fato dos cenários 7,8 e 9 atenderem ao tempo de ciclo da operação, foi gerado um cenário extra onde se manteve 10 posições de carregamento e alterou o número de vagões de modo a analisar se este cenário extra atenderia a restrição do tempo de ciclo para a operação caso haja um aumento de demanda ao longo dos anos.

Tabela 5 - Resultado cenário extra.

Cenário	Nº de vagões	Nº de posições	Tempo de Ciclo (horas)	Tempo de Carregamento (horas)
Cenário Extra	75	10	24,63	23,78

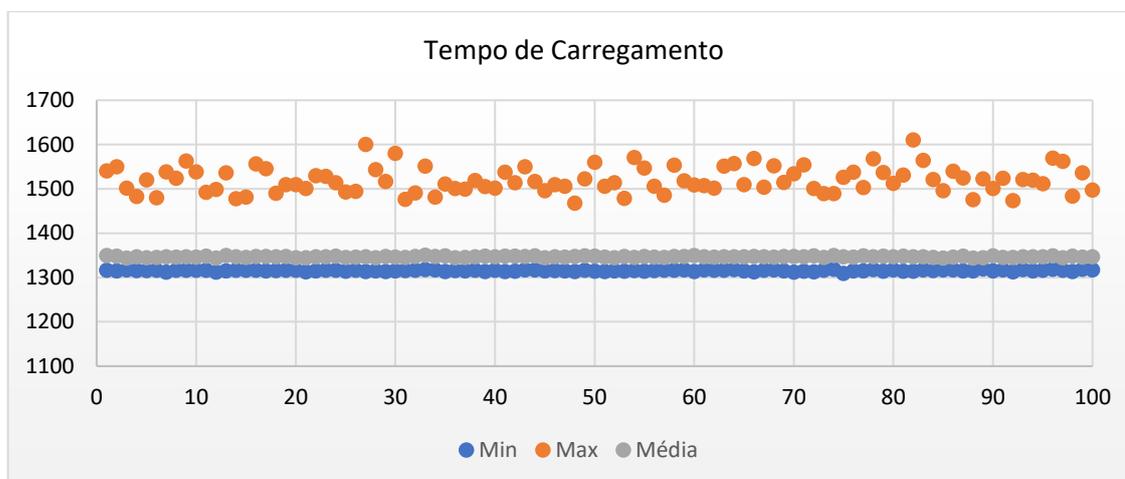
Fonte: Autor (2022).

Conforme ilustrada na Tabela 5, para 10 posições de carregamento e uma movimentação de 75 vagões diariamente, o tempo de ciclo extrapolou o limite máximo estabelecido. Ou seja, caso haja um aumento de demanda, será necessário realizar melhorias na operação para que o tempo de ciclo atenda o limite máximo.

Portanto, os cenários com 10 posições, o número de vagões para abastecimento respeitando o tempo de ciclo se aproxima dos 70 vagões diários. Todavia caso sejam realizadas melhorias quanto ao tempo de carregamento e tempo de engate o número de vagões para abastecimento, será possível aumentar o número de vagões abastecidos para o cenário com 10 posições.

Para termos em vista uma estimativa mais precisa devemos aumentar as repetições até que tenhamos um intervalo de confiança adequado. Para cada cenário foram aplicadas 100 replicações, buscando verificar se o número de réplicas não implicaria na aleatoriedade dos resultados. Dessa forma ao analisar o tempo mínimo, tempo máximo e a o tempo médio de carregamento (em minutos) obtido de cada réplica do cenário 1 no período de 1 ano, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 6 - Tempos de carregamento das réplicas de simulações do cenário 1.



Fonte: Autor (2022).

O resultado do tempo mínimo se refere ao tempo mínimo de carregamento apresentado no período de 1 ano, desta maneira para cada réplica obteve um tempo mínimo de carregamento. Da mesma forma, o tempo máximo e o tempo médio se referem aos tempos obtidos na simulação para o período de 1 ano para cada réplica.

Desta maneira foi realizado o cálculo da média, variância e o desvio padrão dos tempos mínimos, máximos e médios para todas as réplicas, como ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Média, variância e desvio padrão.

Média			Variância			Desvio Padrão		
Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média
1315,44	1520,28	1346,61	2,84	843,19	2,14	1,69	29,04	1,46

Fonte: Autor (2022).

Conforme a tabela acima com os resultados de média, variância e desvio padrão, observa-se que apesar do desvio padrão do tempo médio de carregamento ser 1,46 minutos, esse valor se torna pequeno quando comparada aos 1346,61 minutos em relação à média do tempo médio de carregamento das réplicas. Observa-se que os dados variaram pouco, com a taxa de 0,108% nos valores obtidos da média e desvio padrão encontrados.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se um modelo de simulação de eventos discretos representando a planta de um pátio ferroviário próximo ao porto de Santos. O modelo virtual teve como objetivo principal fornecer uma base inicial para avaliar a capacidade de carregamento de vagões de produtos químicos em diferentes cenários, respeitando as restrições impostas ao carregamento, como tempos de ciclo de carregamento e de atendimento de demanda.

O modelo de simulação é uma importante ferramenta de análise e planejamento auxiliando na tomada de decisão. Através deste tipo de ferramenta foi possível analisar os ganhos de capacidade em investimentos e recursos como as posições de carregamento nos pátios ferroviários em diferentes cenários que influenciam na operação ferroviária.

O modelo de simulação foi implementado no software FlexSim® e através dos cenários analisados foi possível identificar diferentes proposições de layout para o dimensionamento operacional para o pátio ferroviário.

Os resultados apresentados, conforme os dados apresentados na Tabela 5, os cenários 7, 8 e 9 atenderam bem aos requisitos e as restrições do estudo. Prevê-se que, com a construção do pátio ferroviário, a melhor opção dentre as analisadas foram a de construir 10 posições de carregamento, tendo como valor máximo de 70 vagões, aproximadamente, para abastecimento. Porém, é importante observar que caso sejam realizadas melhorias quanto ao tempo de carregamento e o tempo de engate, o número de vagões para abastecimento pode aumentar para além de 70 vagões.

Após analisar os ganhos que cada cenário oferece com a construção do pátio ferroviário (dentre os parâmetros analisados), é importante lembrar também que ao utilizar os vagões de carga que possuem uma capacidade maior de transporte, há a redução do número de caminhões que transitam próximo a região do Porto de Santos.

Conforme a ANTF (2022), um vagão é capaz de movimentar aproximadamente o volume de quase quatro caminhões. Para o nosso estudo, o carregamento de 60, 65 ou 70 vagões por dia seriam equivalentes a 240, 260 e 280 caminhões por dia,

respectivamente. Ainda segundo a ANTF (2022), as questões ambientais são um dos principais diferenciais das ferrovias frente aos outros modais, pois as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO) dos trens de carga são muito inferiores aos dos caminhões.

E, assim como o meio ambiente é altamente beneficiado com a construção do pátio ferroviário, o Porto de Santos também é, uma vez que, ao reduzir o giro de caminhões na maior região portuária do Brasil, conseqüentemente, há a redução do custo de frete, redução do número de caminhões, redução do risco de acidentes, a redução de congestionamentos e, principalmente, aumento da sincromodalidade, das redes de meios de transporte, da eficiência da operação de carregamento e por último o aumento de volume carregado através do pátio.

Para a validação de dados, devido à falta de dados de entrada para a validação do modelo não foi possível estar realizando a etapa de validação da simulação. Desta forma este estudo buscou apenas analisar as operações que ocorrem no carregamento dos vagões.

Este estudo de caso foi aplicado para a construção de um pátio ferroviário, realizando análises quanto ao melhor dimensionamento para a construção da plataforma ferroviária. Assim, para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação da simulação para o estudo contendo dados reais para que seja feito um melhor tratamento e validação dos dados de todos os tempos que envolvem a operação de carregamento dos vagões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO. **Informações gerais**. Disponível em: < <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/> >. Acesso em: 15 dez. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO. **Histórico**. Disponível em: < <https://www.antf.org.br/historico/> >. Acesso em: 15 dez. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO. **O meio ambiente agradece**. Disponível em: < <https://www.antf.org.br/releases/o-meio-ambiente-agradece/#:~:text=Um%20vag%C3%A3o%20transporta%20100%20toneladas,100%20vag%C3%B5es%20substitui%20357%20caminh%C3%B5es> >. Acesso em: 06 jul. 2022.

AMBRA, T. *The digital twin concept and its role in reducing uncertainty in synchromodal transport*. In: *THE 6th INTERNATIONAL PHYSICAL INTERNET*, 6., 2019, Westminster, London. **Anais...** IPIC: *Mobility, Logistics & Automotive Technology Research Centre*, 2019.

ANDRADE, B.; BIAZON, T. O transporte marítimo e o uso sustentável do oceano. **Jornal da USP**, 2021. Disponível em: < <https://jornal.usp.br/artigos/o-transporte-maritimo-e-o-uso-sustentavel-do-oceano/> >. Acesso em: 20 jan. 2022.

BALCI, O. *Quality assessment, verification, and validation of modeling and simulation application*. In: *PROCEEDINGS OF WINTER SIMULATION CONFERENCES*, 2014, DC, EUA. **Anais...** Estados Unidos, 2004. p. 122-129.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: planejamento, organização e logística empresarial. 4. ed. São Paulo: Bookman, 2001.

BANKS J. et al. **Discrete event system simulation**. 3 Ed. Englewood Cliffs, 2000.

BODIN, L.; LEVY, L. *Visualization in vehicle routing and scheduling problems*. **Journal on computing**, v. 6, n. 3, p. 261-269, 1994.

BUSTAMANTE, J. C. **Capacidade dos modos de transporte**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1999.

CASTRO NETO, L. R. **Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas Logísticos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**: teoria e aplicações. 3. Ed. São Paulo: Edição Autor, 2010.

COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Comunicado à Imprensa. **Porto de Santos**, 2015. Disponível em: < <http://www.portodesantos.com.br/pressRelease.php?idRelease=917> >. Acesso em: 04 jan. 2022.

COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Panorama do Porto de Santos. **Porto de Santos**, 2015. Disponível em: < http://www.portodesantos.com.br/down/imprensa/panorama_porto.pdf >. Acesso em: 15 mai. 2022.

Comprehensive safety solutions for your liquid rail cars. **Sam Carbis Solution Group LCC**, 2022. Disponível em: < <https://www.carbissolutions.com/solution/liquid-tank-cars/> >. Acesso em: 14 jul. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Transportes de carga no Brasil**. Rio de Janeiro: CNT/COPPEAD, 2003.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT do transporte aquaviário - cabotagem 2013**. Brasília: CNT, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Relatório gerencial: pesquisa rodoviária**. Brasília: CNT, (2015).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Custo logístico consome 12,7% do PIB do Brasil**. CNT, 2016. Disponível em: < <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/custo-logistico-consome-12-do-pib-do-brasil> >. Acesso em: 14 jul. 2022.

CORDEIRO, M. R. **Intermodalidade: integração rodoferroviária e alternativas de centros logísticos para Santa Catarina**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CUEVA, M. *Next generation simulation modeling with Process Flow*. **FlexSim**, 2016. Disponível em: < <https://www.FlexSim.com/general/next-generation-simulation-modeling-with-process-flow/> >. Acesso em: 20 jun. 2022.

ExpertFit: The leading distribution-fitting software since 1983. **AVERILL M. LAW & ASSOCIATES**, 2018. Disponível em: < <http://www.averill-law.com/distribution-fitting/> >. Acesso em: 20 jun. 2022.

FLEXSIM®. Disponível em: < <https://www.FlexSim®.com/pt/FlexSim®/> >. Acesso em: 15 dez. 2022.

Flickr. Disponível em: < <https://www.flickr.com/photos/johannes-j-smit/3804666410%20%E2%80%93%20referencia%20de%20uma%20foto> >. Acesso em: 14 jul. 2022.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GOVERNO FEDERAL. **Transporte Rodoviário de Cargas - TRC**. Governo Federal, 2020. Disponível em: < <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/transporte-rodoviario-de-cargas> >. Acesso em: 15 jul. 2022.

HALE, B. *Logistics perspectives for the new millennium*. **Journal of Business Logistics**, v. 20, n. 1, p. 5-8, 1999. Disponível em: < <https://trid.trb.org/view/512542> >. Acesso em: 15 jun. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Presença do estado no Brasil**: Federação, suas unidades e municipalidades. Brasília, 2009. Disponível em: < https://www.ipea.gov.br/presenca/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=19 >. Acesso em: 20 jan. 2022.

KULKARNI, N. S. **A Modular Approach for Modelling Active Pharmaceutical Ingredient Manufacturing Plant**: A Case Study. In: Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. Huntington Beach, p. 2260-2271, 2015.

LADIER, A-L.; ALPAN, G. *Robust cross-dock scheduling with time Windows*. **Computers & Industrial Engineering**, v. 99, p. 16-28, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.003> >. Acesso em: 20 jun. 2022.

LAMBERT, D. M.; STOCK, J. R.; VANTINE, J. G. **Administração estratégica da logística**. São Paulo: Vantine Consultoria, 1998. 912 p.

LAW, A. **Simulation modeling and analysis**. Boston: McGraw-Hill Education, 2015.

LEUANGTHONG, O.; KHAN, K.D.; DEUTSCH, C. V. **Solved problems in geostatistics**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 208p.

LINWEI, X.; LI, Z. X. *Simulation and optimization of logistics collaborative operation based on FlexSim®*. **Mechanical Engineering and Technology**, v. 125, p. 543-457, 2012.

MALAR, J. P. Governo leiloará 50 ativos em 2022, com R\$165 bi em investimentos, diz ministro. **CNN Brasil**, 2021. Disponível em: < <https://www.cnnbrasil.com.br/business/governo-leiloara-50-ativos-em-2022-com-r-165-bi-em-investimentos-diz-ministro/> >. Acesso em: 22 jun. 2022.

MIYAGI, P. E. **Introdução à simulação discreta**. São Paulo: USP, 2006.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional**: Curso Introdutório. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

NIENKOTTER, M. A.; MARANGONI, L.; NOGUEIRA, C. W.; TAGLIALENHA, S. L. S. Programação dinâmica como ferramenta para sincromodalidade. *In: XXII SIMPEP - Simpósio Brasileiro de Engenharia de Produção*, 22., 2015, Bauru. **Anais...** Bauru, São Paulo: UNESP, 2015.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. **Introduction to simulation using SIMAN**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1995.

PETERSEN, E. R. *Railyard Modeling: part II – the effect of yard facilities on congestion*. **Transportation Science**, v. 11, n. 1, 1977. Disponível em: < <https://www.jstor.org/stable/25767857> >. Acesso em: 10 mai. 2022.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico** (2nd ed.). Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

QINGTIAN, H. Research on Simulation of Modern Storage System with Flexsim. **Advanced Materials Research**. Vols. 989-994, p. 1477-1480, 2014.

RABELO, L.; HELAL, M.; YOUNG-JUN, S.; JONES, A.; MIN, J.; DESHMUKH, A. A hybrid approach to manufacturing enterprise simulation. **Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference**, v. 2, p. 1125 - 1133, 2004.

RODRIGUES, A. S. **Um estudo sobre o futuro corredor ferroviário leste-oeste de Santa Catarina: a Ferrovia do Frango**. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional**. 4 Ed. São Paulo: Aduaneiras, 2011.

SARGENT, R. G. *Verification and validation of simulation models*. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 12-24, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20> >. Acesso em: 05 jul. 2022.

SCHRIBER, T.J., BRUNNER, D.T., SMITH, J. Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters. **Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference**, 13-16 dez, 2009.

SELEIM, A.; AZAB, A.; ALGEDDAWY, T. Simulation Methods for Changeable Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 179-184, 2012.

SIMÓN-MARMOLEJO, I. et al. *La simulación con FlexSim®: una fuente alternativa para la toma de decisiones en las operaciones de un sistema híbrido*. **Científica**, v.17, n. 1, p. 39- 49, 2013. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/316242875_La_simulacion_con_FlexSim_u_na_fuente_alternativa_para_la_toma_de_decisiones_en_las_operaciones_de_un_si_stema_hibrido >. Acesso em: 05 jul. 2022.

- STEADIESEIFI, M. et al. *Multimodal freight transportation planning: a literature review*. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 1, p. 1–15, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.055> >. Acesso em: 12 mai. 2022.
- TORRES, C. L., **O Intermodal a Passos largos.**, São Paulo: Valor Setorial Ferrovias, 2006. p. 8-10.
- TOTH, P.; VIGO, D. **The vehicle routing problem**. SIAM, 2001.
- VASCONCELOS, A. D. **Metodologia para Localização de Terminais Concentradores em Redes de Transportes sob Gerenciamento Descentralizado**. 211 f. Dissertação (Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- VILAÇA, R. Importância do setor ferroviário no cenário logístico e econômico do país. **Jornal Fique por Dentro da CNT**, v. 3, n. 10, p. 05, 2005.
- VILAÇA, R. **Transporte para o comércio e a integração regional: setor ferroviário de cargas**. Brasília: Seminário CNI e BID, 2008.
- ZHU, X. et al. *A FlexSim®-based optimization for the operation process of cold-chain logistics distribution centre*, **Journal of Applied Research and Technology**, v. 12, n. 2, p. 270-278, 2014. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)72343-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1665-6423(14)72343-0) >. Acesso em: 03 jul. 2022.