UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

PEDRO PICCOLO ANAUATE

**Avaliação da influência das regras de priorização de lotes ferroviários no
desempenho de um terminal portuário**

São Paulo
2020

PEDRO PICCOLO ANAUATE

**Avaliação da influência das regras de priorização de lotes ferroviários no
desempenho de um terminal portuário**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 08 de dezembro de 2020

Assinatura do autor:

Pedro P. Anauate

Assinatura do orientador:

Rui Botelho

Catálogo-na-publicação

Anauate, Pedro

Avaliação da influência das regras de priorização de lotes ferroviários no desempenho de um terminal portuário / P. Anauate -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

98 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Terminais marítimos 2.Simulação 3.Descarga de vagões 4.Regra de despacho I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Nome: Pedro Piccolo Anauate

Título: Avaliação da influência das regras de priorização de lotes ferroviários no desempenho de um terminal portuário

Dissertação apresentada ao departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Aos meus pais, Milton e Sonia, que
sempre me apoiaram em tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Prof. Dr. Rui Carlos Botter pela indispensável orientação durante a execução deste trabalho e pela disponibilidade em ajudar e aconselhar sobre qualquer assunto, sempre que necessário. Agradeço também pelo valioso aprendizado que obtive ao trabalhar em diversos projetos com o senhor.

Não menos importante foi o apoio do professor, orientador e amigo Daniel Mota, que me acompanha desde a graduação e me proporcionou diversas oportunidades de aprendizado e desenvolvimento pessoal e profissional, dentre elas o ingresso neste programa de mestrado. Agradeço também por sempre estar disponível para aconselhamento e discussão sobre os mais diversos assuntos.

À toda a equipe do CILIP (Centro de Inovação em Logística e Infraestrutura Portuária), especialmente o Prof. Dr. João Netto por me ajudar a compreender o universo dos terminais portuários e pelas importantes sugestões e críticas construtivas a este trabalho. Agradeço à Suelen, do CILIP e a Lânia, da Secretaria de Pós-Graduação da Engenharia Naval, que me ajudaram imensamente na resolução de todas as questões burocráticas envolvidas na jornada de um mestrando.

Agradeço aos meus pais, Milton e Sonia, que me proporcionaram uma vida privilegiada e todas as oportunidades que tive para chegar até aqui, incluindo educação, saúde, lazer e amor incondicional. Obrigado por sempre me apoiarem nas decisões que tomei e por comemorarem todas as conquistas ao meu lado. Além disso, agradeço os meus amigos de Sorocaba e da Mauá, que sempre estiveram ao meu lado e tornaram a minha vida mais leve e feliz, não só durante a pós-graduação, mas por todo o tempo que nos conhecemos.

Por fim, ressalto que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço a esta instituição e ao departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP pela confiança depositada em mim ao conceder a minha bolsa de mestrado.

“Aquele que para de aprender é velho, seja aos vinte ou aos oitenta anos. Aquele que continua aprendendo permanece jovem”

Henry Ford

RESUMO

ANAUATE, P. P. Avaliação da influência das regras de priorização de lotes ferroviários no desempenho de um terminal portuário. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

A expressiva e crescente demanda por minérios de ferro e grãos alimentícios produzidos no Brasil, aliada à grande dificuldade (ou até impossibilidade) de expansão dos sistemas portuários existentes, torna favorável a construção de novos terminais, com o intuito de reduzir o desequilíbrio entre a oferta e demanda destes produtos. Mesmo assim, no planejamento de um novo sistema portuário, é necessário estudar e definir as condições operacionais de modo que se obtenha maior eficiência nas operações portuárias e, conseqüentemente, melhor nível de serviço ao cliente. Assim, buscou-se neste trabalho analisar diferentes regras de priorização no atendimento de lotes em fila para descarga em um terminal portuário, observando o impacto que elas causam no desempenho do sistema, avaliado por meio de indicadores como tempo médio de fila, ocupação de equipamento e atendimento da demanda. Para isto, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional, capaz de representar detalhadamente as operações realizadas no porto, desde o subsistema de descarga de trens até o carregamento dos navios com os produtos. As análises foram realizadas por meio da comparação de cenários, testando múltiplas regras de despacho em diferentes níveis de demanda. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a seleção de uma regra de priorização adequada pode reduzir em até 5% o tempo médio em fila dos trens e que não há uma regra única que seja melhor para produtos com diferentes demandas. Por fim, desenvolveu-se uma regra híbrida, a qual considera a melhor lógica de priorização para cada tipo de produto, com base nos resultados das análises anteriores. Com isto, observou-se que esta abordagem híbrida resultou no menor tempo médio de fila dos trens em comparação com as demais regras aplicadas separadamente. A simulação computacional se mostrou uma ferramenta eficaz e adequada para a condução do estudo proposto.

Palavras-chave: Simulação. Terminal portuário. Regra de despacho. Descarga de vagões.

ABSTRACT

ANAUATE, P. P. Avaliação da influência das regras de priorização de lotes ferroviários no desempenho de um terminal portuário. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

The expressive and growing demand for iron ores and food grains produced in Brazil, combined with the great difficulty (or even impossibility) of expanding the existing port systems, makes the construction of new terminals favorable, in order to reduce the imbalance between supply and demand for these products. Even so, when planning a new port system, it is necessary to study and define operational conditions so that greater efficiency in port operations is achieved and, consequently, a better level of customer service. Thus, it was sought in this work to analyze different rules of prioritization of trains waiting to be unloaded at a port terminal, observing the impact that they have on the performance of the system, evaluated through indicators such as queueing times, equipment occupation levels and percentage of demand met. For this, a computer simulation model was developed, capable of representing the port operations in detail, from the train unloading subsystem to the loading of the ships with the products. The analyses were carried out through the comparison of scenarios, testing multiple dispatch rules at different levels of demand. From the results obtained, it was concluded that the selection of an adequate prioritization rule can reduce by 5% the average time in queue for trains and that there is no unique rule that works best for products with different demands. Finally, a hybrid rule was developed, which considers the best prioritization rule for each product, based on the results from the previous analyses. With this, it was observed that this hybrid approach resulted in the smallest average time in queue for trains, when compared to the other rules applied separately. Simulation modeling proved to be an effective and adequate tool to carry out the proposed study.

Keywords: Simulation. Port terminal. Dispatching rule. Wagon discharge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exportação de minério de ferro em milhões de dólares.	16
Figura 2 - Evolução da área de plantio de grãos no Brasil nos últimos 23 anos	17
Figura 3 - Evolução da produtividade de grãos no Brasil desde 2004	18
Figura 4 – Etapas de um projeto de simulação	21
Figura 5 - Visão integrada do porto.	26
Figura 6 - Visão geral do Porto de Tubarão	28
Figura 7 - Etapas da cadeia produtiva do minério de ferro.....	29
Figura 8 - Composição do trem de minério	31
Figura 9 - Área de recepção do TFPM.....	31
Figura 10 - Área de aproximação dos viradores.....	32
Figura 11 - Etapas e atividades de um estudo de simulação	34
Figura 12 - Representação de ambientes de manufatura	41
Figura 13 - Área de estocagem de contêineres.....	47
Figura 14 - Fluxo simplificado do terminal.....	49
Figura 15 - Esquematização da antecedência dos lotes ferroviários	51
Figura 16 - Processamento de um lote ferroviário.....	54
Figura 17 - Representação de um terminal portuário	57
Figura 18 - Processamento de um navio.....	60
Figura 19 - Delimitação do estudo.....	61
Figura 20 - Elementos básicos do SIMUL8	64
Figura 21 - Modelagem da recepção ferroviária e marítima.....	66
Figura 22 - Modelagem da descarga de lotes ferroviários	66
Figura 23 - Modelagem do atendimento dos navios (parte 1)	67
Figura 24 - Modelagem do atendimento dos navios (parte 2)	68
Figura 25 - Processo de modelagem simplificado.....	69
Figura 26 - Aba "Parâmetros" da interface	72
Figura 27 - Configuração da aba "Pátios"	74
Figura 28 - Configuração da aba "Demanda"	75
Figura 29 - Definições de perfis de sazonalidade para os grãos.....	76
Figura 30 - Definição de DWT dos tipos de navios	76
Figura 31 - Configuração da aba "Frota"	77
Figura 32 - Configuração dos trens na aba "Demanda Trens"	77

Figura 33 - Configuração dos tempos de manobra ferroviária.	78
Figura 34 - Definição dos tempos de manobra de atracação e saída	78
Figura 35 - Definição dos tempos de pré e pós-operação.....	79
Figura 36 - Status de pátios e associações com equipamentos de descarga	79
Figura 37 - Configurações gerais de equipamentos de empilhamento	80
Figura 38 - Configurações gerais de carregadores de navios	81
Figura 39 - Exemplo de registro da saída de navios/trens	82
Figura 40 - Trecho da aba “Estatísticas”	82
Figura 41 - Resultados dos cenários	90
Figura 42 - Resultados com a regra híbrida	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das classificações da pesquisa	23
Tabela 2 - Principais regras de priorização	45
Tabela 3 - Capacidades em quilotoneladas (kt) dos navios por tipo	51
Tabela 4 - Parâmetros binários	71
Tabela 5 - Relação entre valores e distribuições de probabilidade	71
Tabela 6 - Resumo dos dados de entrada	85
Tabela 7 - Valores de demanda e tipos de navios	86
Tabela 8 - Sazonalidade dos grãos.....	87

LISTA DE SIGLAS

CCO	Centro de Controle Operacional
CODESP	Companhia Docas do Estado de São Paulo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CN	Carregador de Navios
DWT	<i>Deadweight Tonnage</i>
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
ER	Empilhadeira-Recuperadora
MDIC	Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MTPA	Milhões de Toneladas por Ano
OEC	<i>Observatory of Economic Complexity</i>
TFPM	Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira
TMPM	Terminal Marítimo de Ponta da Madeira
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VV	Virador de Vagões

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	OBJETIVO	19
1.2.	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	20
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2.	METODOLOGIA DE PESQUISA	22
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1.	OPERAÇÕES EM TERMINAIS PORTUÁRIOS DE MINÉRIO DE FERRO E GRANÉIS AGRÍCOLAS.....	25
3.1.1.	Caracterização do subsistema de descarga de trens	29
3.2.	SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS.....	32
3.2.1.	Uso de simulação em terminais portuários de minério de ferro	36
3.3.	PROGRAMAÇÃO DE TAREFAS	39
3.3.1.	Classificação de problemas de programação de tarefas.....	40
3.3.1.1.	Ambientes de manufatura	40
3.3.1.2.	Características e restrições do processo.....	42
3.3.1.3.	Objetivos do problema.....	42
3.3.2.	Regras de priorização de tarefas	43
3.3.3.	Aplicação em terminais portuários	46
4.	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	49
4.1.	LÓGICA DE GERAÇÃO DE NAVIOS E TRENS	49
4.2.	SUBSISTEMA DE DESCARGA DE TRENS	52
4.3.	SUBSISTEMA DE ARMAZENAMENTO.....	54
4.4.	SUBSISTEMA DE CARREGAMENTO DE NAVIOS	58
4.5.	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	60
5.	MODELAGEM DO SISTEMA.....	63

5.1.	MODELO COMPUTACIONAL.....	63
5.1.1.	Validação e verificação	68
5.2.	INTERFACE DO MODELO	71
5.2.1.	Aba “Parâmetros”	72
5.2.2.	Aba “Pátios”	73
5.2.3.	Abas “Demanda”, “Sazonalidade” e “Frota”	74
5.2.4.	Aba “Demanda Trens”	77
5.2.5.	Aba “Tempos Navios”	78
5.2.6.	Aba “Operacional”	79
5.2.7.	Aba “Estatísticas”	81
6.	EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO.....	84
6.1.	DADOS DE ENTRADA.....	84
6.2.	CENÁRIOS.....	87
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
	REFERÊNCIAS.....	95

1. INTRODUÇÃO

De acordo com MDIC (2019), em um relatório que demonstra volumes de exportação brasileira classificados por fator agregado e produtos, contabilizados pelo Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços, o minério de ferro e seus concentrados representam o terceiro maior valor, em dólares, no cenário da exportação brasileira dos últimos 10 anos. Os valores absolutos de minério de ferro exportado neste período são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Exportação de minério de ferro em milhões de dólares.

Fonte: MDIC (2019)

A observação destes valores revela uma forte oscilação na última década, apresentando um pico no ano de 2011, seguido de uma queda acentuada até o ano de 2016. A partir de 2017, observa-se um aumento nos números, sendo que no ano de 2019 o valor atingiu 22,18 milhões de dólares, o que representa um aumento de aproximadamente 10% em relação ao ano anterior.

Ainda, segundo OEC (2019), os dois maiores produtores de minério de ferro no mundo, Austrália e Brasil, apresentaram problemas no fornecimento da *commodity* em 2019. O primeiro devido a problemas climáticos e cortes na produção e o segundo devido ao rompimento da barragem de Brumadinho, em Minas Gerais, que prejudicou fortemente sua oferta de minério.

Contudo, em direção contrária ao declínio da oferta de minério nos principais produtores, a demanda pelo produto na China, que é o maior fabricante mundial de

aço, deve permanecer alta nos próximos anos, configurando um impasse no comércio internacional de minério de ferro, que necessita de soluções rápidas e eficazes.

Em relação à exportação de grãos alimentícios, CONAB (2019) mostra, em um Boletim de Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, um forte crescimento do setor nos últimos 15 anos, refletido pelo aumento das áreas dedicadas ao plantio destes grãos, medidas em milhões de hectares (Figura 2) e, consequentemente, da produtividade, medida em kg por hectare (Figura 3).

No contexto internacional, de acordo com USDA (2020), nos últimos 2 anos, a produção de soja brasileira ultrapassou a dos Estados Unidos, sendo que no ano de 2019 a quantidade produzida de soja no Brasil foi a maior do mundo, atingindo o valor de 126 milhões de toneladas. A segunda maior produção neste mesmo ano foi a dos Estados Unidos, no valor de 96.7 milhões de toneladas (Mt). Para o ano de 2020, até o mês de outubro, a produção de soja brasileira atingiu o valor de 133 Mt, enquanto a americana foi de 116.2 Mt.

Fonte: CONAB (2019)

As oscilações na produção dos grãos ao longo dos anos são causadas principalmente por fatores climáticos, uma vez que estes têm forte influência no crescimento e na qualidade das safras. A redução observada entre as safras de 2016/17 e 2017/18, por exemplo, de acordo com CONAB (2019), foi causada por reduções nas precipitações pluviométricas.

No entanto, apesar destas flutuações, a produção dos grãos é numerosa (aproximadamente 228 mil toneladas em 2017/18) e de grande relevância para o mercado brasileiro, visto que, conforme MDIC (2019), a soja e o milho representam o primeiro e segundo grãos mais exportados pelo Brasil em 2019, respectivamente, em dólares.

Figura 3 - Evolução da produtividade de grãos no Brasil desde 2004

Fonte: CONAB (2019)

Diante da contextualização apresentada, a relevância de se estudar os granéis sólidos mencionados é justificada pela alta demanda de exportação dos mesmos, constatada em MDIC (2019). Dentre os 5 produtos mais exportados em dólares, não serão analisados neste trabalho o 2º e 4º lugar, que correspondem, respectivamente, aos óleos brutos de petróleo e à celulose, pois não são classificados como granéis sólidos e requerem outros tipos de estruturas portuárias para sua movimentação. Assim, visto que o sistema estudado ainda é inexistente e está em fase de projeto, há uma grande probabilidade de que os produtos a serem movimentados pelo terminal sejam minérios de ferro, soja e milho.

Ademais, os terminais portuários brasileiros, que são sistemas complexos, à medida que são constituídos por diversos subsistemas interrelacionados e, segundo CODESP (2019), movimentam centenas de milhões de toneladas de carga anualmente, devem buscar nos próximos anos maiores níveis de produtividade e eficiência, visando impulsionar a oferta de minério de ferro e grãos alimentícios para o mercado internacional, o que se traduz, dada a situação econômica atual do país, na busca por alternativas que maximizem a utilização de seus equipamentos e de toda a infraestrutura existente, sem que haja a necessidade de investimento na ampliação de estruturas e ativos.

Inserido nesta conjuntura, este trabalho buscou analisar indicadores de desempenho de um terminal portuário, tais como tempo médio de fila, ocupação de equipamento e nível de serviço ao cliente, diante de diferentes regras de priorização no atendimento de lotes ferroviários em fila no subsistema de descarga. Para conduzir as análises necessárias, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional capaz de

representar detalhadamente as operações futuras do terminal portuário, desde a recepção dos minérios e grãos transportados pelos trens até o carregamento dos navios para a exportação dos produtos.

Antes do início da modelagem, segundo Gualda (1995), é de extrema importância a definição adequada do sistema a ser estudado e seus componentes, sendo que no presente trabalho foi feita uma abordagem sistêmica do terminal, dividindo-o em três subsistemas: descarga, armazenamento e carregamento (NETTO; BOTTER; MEDINA, 2015). Mesmo sendo o principal enfoque do estudo o subsistema de descarga, a modelagem completa do sistema é necessária para que se possa observar os efeitos das diferentes regras de priorização de lotes ferroviários.

A produção de grãos alimentícios é caracterizada por forte sazonalidade, sendo que há um pico na oferta destes produtos em determinados meses do ano, o que pode causar congestionamentos no sistema portuário, à medida que a movimentação destes produtos, somada à dos minérios de ferro nestes períodos pode ultrapassar a capacidade instalada do sistema. Portanto, a escolha do subsistema de recepção ferroviária para realizar as análises baseou-se não só na aplicabilidade de regras de priorização de filas, mas também no fato de que o desempenho do mesmo é crucial para a totalidade das operações, uma vez que o modal ferroviário é a única fonte de suprimento do terminal, o que torna este subsistema responsável pelo abastecimento dos pátios de estocagem e, conseqüentemente, dos navios.

1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes regras de despacho de trens no desempenho de um terminal portuário, avaliando indicadores como tempo médio de fila, ocupação de equipamento e nível de serviço ao cliente para determinar as melhores práticas do subsistema de descarga ferroviária.

Como objetivos secundários pode-se citar: (1) o desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de representar integral e detalhadamente as operações de um terminal portuário e (2) contribuição para o estado da arte na área de estudo, à medida que se disponibiliza um estudo de regras de priorização de tarefas, que são comumente encontradas em ambientes de manufatura, aplicadas a um contexto portuário.

1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

De acordo com Mota (2016), na operação portuária, caracterizada pela sequência de processamentos em série, a ocorrência de falhas ou ineficiências em alguma etapa do processo pode acarretar interrupções no sistema e causar grande impacto no fluxo de produtos. Assim, evidencia-se o caráter crítico inerente a qualquer estágio do sistema. O autor afirma também que o alto custo da infraestrutura portuária torna inviável a existência de equipamentos redundantes, que possam conferir ao sistema maior disponibilidade. Por isto, a melhoria no desempenho de qualquer um dos subsistemas tem o potencial de impactar positivamente todo o sistema.

A motivação para o desenvolvimento deste estudo baseou-se na constatação desta dificuldade de aumento da produtividade em terminais portuários com os quais o autor teve contato ao longo dos anos. Com isso, decidiu-se estudar possibilidades de melhoria aplicadas em um sistema real, que fossem consoantes com a área de pesquisa e interesse do autor.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A sequência de etapas de um projeto de simulação, proposta por Chwif e Medina (2014) e apresentada na Figura 4, foi utilizada como referência na condução deste estudo. Optou-se, então, por seguir a mesma ordem proposta pelos autores na apresentação deste trabalho.

Assim, a organização do trabalho é a seguinte: inicia-se com o capítulo de introdução, no qual apresenta-se uma contextualização do tema proposto, os objetivos principais e secundários, a motivação e a justificativa da pesquisa. Logo após, é feita uma descrição acerca da metodologia de pesquisa deste estudo, na qual se classifica a pesquisa quanto à sua finalidade, contexto, tipo, natureza, temporalidade, método e técnica. No terceiro capítulo, em que se encontra a revisão bibliográfica, são identificados os principais trabalhos correlatos ao tema proposto, com o intuito de apresentar o conteúdo existente na literatura atual e fornecer um embasamento teórico para o estudo. Em seguida, é feita uma descrição detalhada do sistema, que corresponde à etapa de concepção de um projeto de simulação, ilustrada na Figura 4, na qual são descritos os principais subsistemas, lógicas e restrições existentes. A seguir, utilizando como base a revisão da literatura realizada anteriormente, o quinto

capítulo expõe a modelagem computacional do sistema, descrevendo não só o modelo, mas também sua interface de configuração. O conteúdo deste capítulo corresponde à etapa de implementação na sequência representada na Figura 4.

Figura 4 – Etapas de um projeto de simulação

Fonte: Chwif e Medina (2014)

Logo após, apresenta-se os dados de entrada utilizados no modelo e os cenários de experimentação que foram testados, seguidos dos resultados das análises conduzidas e de uma discussão a respeito dos valores obtidos.

Por fim, o último capítulo traz uma conclusão a respeito do trabalho, retomando o seu objetivo, a metodologia empregada, as análises e resultados obtidos e as recomendações para trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

Baseando-se em obras disponíveis na literatura, como Gil (2010) e Silveira e Córdova (2009), será apresentada neste capítulo uma classificação da pesquisa realizada em relação a 7 critérios, sendo eles: finalidade, contexto, tipo, natureza, temporalidade, método e técnica de pesquisa.

Primeiramente, quanto à finalidade, os autores Silveira e Córdova (2009) classificam uma pesquisa como básica ou aplicada, sendo que o presente estudo se adequa às características de uma pesquisa aplicada, uma vez que visa a geração de conhecimentos dirigidos à solução de problemas específicos em aplicações práticas.

O contexto da pesquisa diz respeito ao ambiente em que o estudo foi realizado. De acordo com Fontelles et al. (2009), a pesquisa laboratorial é realizada em ambiente controlado e adota ferramentas de simulação para reproduzir o sistema estudado, o que indica a caracterização desta pesquisa como laboratorial.

Quanto ao tipo, a pesquisa realizada é classificada como exploratória, visto que, segundo Gil (2010), busca proporcionar maior familiaridade com o problema, a fim de torná-lo mais explícito e construir hipóteses a seu respeito. Além disso, o autor afirma que estas pesquisas envolvem etapas como levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que possuem experiência prática na área de pesquisa e análise de exemplos que estimulem a compreensão do sistema.

A natureza pode ser classificada como axiomática quantitativa. Tal afirmação é embasada pela definição de Bertrand e Fransoo (2002) de que este tipo de pesquisa se inicia com uma descrição condensada das características do processo operacional a ser estudado, o que corresponde à modelagem conceitual do problema. Os mesmos autores ainda descrevem dois tipos de contribuição à literatura, sendo: (1) o estudo de uma nova variante de um processo, utilizando técnicas de solução amplamente conhecidas e (2) o estudo de um processo ou problema que já tenha sido estudado, mas que necessita de novas e/ou melhores soluções. Vale ressaltar que, de acordo com este raciocínio, a pesquisa realizada neste estudo se enquadra na segunda definição apresentada, visto que foram analisadas possibilidades de melhorias à um tipo de processo já estudado na literatura.

A pesquisa também pode ser classificada como longitudinal prospectiva quanto à sua temporalidade, uma vez que, para Fontelles et al. (2009), os estudos deste tipo são conduzidos a partir do momento presente e caminham em direção ao futuro.

O método utilizado nesse trabalho foi o Estudo de Caso, que segundo Gil (2010) é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de modo que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento. O autor afirma, ainda, que a maior utilidade do estudo de caso pode ser verificada nas pesquisas exploratórias, sendo que este é recomendado em fases iniciais de investigações sobre temas complexos, para construir hipóteses ou reformular o problema. Para Fonseca (2002), o estudo de caso visa conhecer em profundidade o como e o porquê de uma determinada situação, supostamente única em muitos aspectos, procurando descobrir o que há nela de mais essencial e característico. Na Tabela 1 observa-se um resumo das classificações da pesquisa apresentadas neste capítulo.

Tabela 1 - Resumo das classificações da pesquisa

Critério	Classificação	Justificativa
Finalidade	Aplicada	Soluciona problemas em aplicações práticas
Contexto	Laboratorial	Adota ambiente de simulação para reproduzir o sistema estudado
Tipo	Exploratória	Explicita o problema e constrói hipóteses a seu respeito
Natureza	Axiomática Quantitativa	Inicia com o desenvolvimento de modelo conceitual
Temporalidade	Longitudinal Prospectiva	Parte do presente e caminha em direção ao futuro
Método	Estudo de Caso	Estuda de maneira aprofundada um objeto para ampliar e detalhar o conhecimento
Técnica	Análise Documental e Entrevista Semiestruturada	Analisa documentos referentes ao projeto do terminal e realiza entrevistas para obtenção de dados

Fonte: Bertrand e Fransoo (2002), Gil (2008, 2010), Fonseca (2002), Fontelles et al. (2009) e Silveira e Córdova (2009).

Por fim, a principal técnica de pesquisa utilizada foi a análise de documentos, que, segundo Gil (2008), são capazes de fornecer ao pesquisador dados com a qualidade

e a quantidade necessárias para se conduzir o estudo. Os principais documentos analisados foram o memorial descritivo e a planta geral do futuro terminal, fornecidos em caráter confidencial pela empresa proprietária do empreendimento.

Além disso, uma outra técnica empregada nesta pesquisa foi a entrevista, que ainda segundo Gil (2008), consiste na formulação de perguntas a serem feitas pelo pesquisador ao entrevistado, com o objetivo de obter os dados que lhe são necessários. As entrevistas conduzidas neste estudo podem ser classificadas quanto ao seu nível de estruturação como entrevistas por pautas, nas quais o entrevistador explora pontos de interesse, mas permite que o entrevistado fale livremente conforme as pautas lhe são apresentadas.

Pela definição proposta por Silveira e Cordova (2009), as entrevistas realizadas são classificadas como semiestruturadas, que consistem na elaboração de uma série de questões que devem ser respondidas pelo entrevistado, o qual pode discorrer sobre assuntos originados de desdobramentos do tema principal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se, de maneira consolidada, os conteúdos relevantes ao assunto abordado neste trabalho encontrados na pesquisa bibliográfica realizada na literatura existente. Inicia-se com a descrição e a contextualização das operações relacionadas a sistemas portuários, apresentando, para isto, trabalhos correlatos publicados, que constituem um embasamento científico para a realização deste estudo. Logo após, discute-se a teoria e aplicação da simulação de eventos discretos em terminais portuários, seguida do detalhamento teórico do problema de programação de tarefas e as diferentes regras de priorização utilizadas em publicações relativas a problemas deste tipo.

3.1. OPERAÇÕES EM TERMINAIS PORTUÁRIOS DE MINÉRIO DE FERRO E GRANÉIS AGRÍCOLAS

Considerando-se a relevância dos terminais portuários de minério de ferro no contexto econômico brasileiro e mundial discutida anteriormente, é esperado que haja diversos estudos acerca destes sistemas na literatura existente. Assim, por meio de uma revisão bibliográfica, foi possível identificar trabalhos que estudaram terminais diferentes, mas que apresentam grande semelhança em sua composição física e fluxo de movimentação de produtos, diferenciando-se muitas vezes apenas pela quantidade de recursos disponíveis e tipos de produtos movimentados.

Pereira et al. (2017) apresentam uma abordagem sistêmica dos terminais portuários de minério de ferro, a qual, segundo os autores, auxilia no projeto destes sistemas à medida que possibilita uma análise detalhada de cada subsistema e componente que os constituem, facilitando, por exemplo, a identificação de gargalos ou pontos de ineficiência no processo geral.

Em sua tese de livre-docência, Gualda (1995) afirma que identificação de um sistema e seus componentes, bem como os recursos existentes e as restrições a serem consideradas dependem do problema abordado. O autor exemplifica que um terminal pode ser considerado parte de um grande sistema de terminais em um estudo, mas em outros pode ser o próprio sistema estudado, ou ainda um subsistema constituinte deste terminal pode ser considerado como sistema em outro trabalho, uma vez que este delineamento depende, conforme afirma o autor, do problema em questão.

Ainda, Meredith et al.¹ (1973, apud GUALDA, 1995) descrevem as principais características que são inerentes a um sistema: (1) existe um propósito a ser satisfeito ou função a ser realizada; (2) há pelo menos dois componentes que integram o problema e possuem atributos que permitem a sua descrição; (3) a relação entre os componentes ocorre de maneira consistente, obedecendo a natureza da interface entre eles e (4) o comportamento e a resposta individual de cada componente são limitados por restrições existentes.

A abordagem sistêmica descrita possibilita a divisão de um terminal portuário em três principais subsistemas, sendo eles o de descarga de trens, de armazenamento de produtos e de carregamento de navios. Mota (2016) apresenta ainda uma visão integrada do porto, a qual considera a interação destes subsistemas descritos com outros subsistemas externos às operações do terminal, mas de grande importância para o funcionamento integral do sistema. Estas relações são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Visão integrada do porto.

Fonte: o autor (adaptado de MOTA, 2016 e PEREIRA et al., 2017)

Vale ressaltar que na literatura existem diversos trabalhos que têm como escopo as relações entre os subsistemas principais (parte central do diagrama da Figura 5) e os

¹ MEREDITH, D. D.; WONG, K. W.; WOODHEAD, R. W.; WORTMAN, R. H. **Design and Planning of Engineering Systems**. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1973.

externos (partes laterais do mesmo diagrama). No entanto, por critério de adequação ao tema do presente trabalho, serão analisados apenas os subsistemas principais e os estudos relacionados aos mesmos.

Ademais, serão discutidas a seguir as operações realizadas nos subsistemas principais, bem como as relações entre eles. Para fornecer um embasamento teórico mais pertinente a este estudo, será dada ênfase ao detalhamento do subsistema de descarga de trens, apresentando o fluxo operacional, os principais recursos, os agentes envolvidos nas operações e as regras que governam as relações entre eles.

Conforme descrito por Pereira et al. (2017) e Netto, Botter e Medina (2015), sob o enfoque sistêmico o subsistema de carregamento é composto por berços de atracação, localizados nos píeres dos terminais, nos quais os navios atracam/desatracam e por equipamentos denominados carregadores de navios (CN) e recuperadoras (ou empilhadeiras-recuperadoras, dependendo do terminal).

Cabe ressaltar que, dependendo do sistema estudado, podem haver variações no processo descrito, como por exemplo a utilização de um CN adicional ou a alocação de duas recuperadoras no processo de carregamento para obter ganho de produtividade, além de condições operacionais particulares ao terminal em questão, como impossibilidade de acesso do CN ou restrição de tipos de navios que podem ser atendidos em um berço.

O subsistema de armazenamento é composto basicamente por pátios de estocagem, que são divididos em partições, nas quais os produtos são dispostos em pilhas. Os equipamentos que operam neste subsistema são as empilhadeiras e recuperadoras, sendo que as primeiras têm a função de movimentar e organizar os produtos que foram descarregados dos trens e transportados para a área de estocagem nas partições, formando assim as pilhas mencionadas anteriormente. Pela natureza das operações nele realizadas, o armazenamento é considerado uma interface entre os subsistemas, visto que ocorrem interações contínuas, devido ao compartilhamento de equipamentos, tanto com o carregamento de navios, quanto com a descarga de trens. Neste subsistema também pode haver particularidades inerentes ao terminal estudado, sendo que as principais delas são a quantidade de pátios de estocagem e equipamentos disponíveis, bem como o critério de alocação de produtos e equipamentos aos pátios.

Conforme indicado na Figura 5 por meio de setas, existe uma relação entre os sistemas de carregamento e descarga, que é o embarque direto, o qual é realizado em alguns terminais e consiste na movimentação de produtos diretamente dos trens para os carregadores de navios. A possibilidade deste tipo de embarque está sujeita ao atendimento de condições, tais como a existência de infraestrutura que a permita (linha de transporte direta entre os subsistemas) e a disponibilidade imediata da quantidade necessária do produto demandado pelo navio no momento da operação. Além disso, possui menor taxa de produtividade, o que a torna menos atrativa que o processamento comum dos produtos.

A operação de graneis agrícolas, ou grãos, em terminais portuários é similar à operação de minério de ferro, diferindo principalmente nos equipamentos que são utilizados para a movimentação e armazenamento dos produtos. Camargo (2010) realizou um estudo das operações de grãos no Porto de Tubarão, em Vitória, no Espírito Santo, no qual é possível observar estas diferenças (Figura 12).

Figura 6 - Visão geral do Porto de Tubarão

Fonte: Camargo (2010)

Primeiramente, os vagões possuem uma abertura em sua parte inferior e a descarga é feita em moegas por meio desta abertura, portanto não se utilizam viradores de vagões nesta operação. Além disso, a armazenagem dos grãos é feita por meio de silos ou armazéns ao invés de pátios de estocagem. Assim como nas operações de

minérios, são necessárias linhas de transporte entre as moegas e os silos e entre os silos e os carregadores de navios, sendo que esta movimentação é usualmente feita por meio de esteiras transportadoras.

É importante observar na Figura 6 que os espaços de armazenagem dos diferentes produtos estão localizados em áreas distintas do terminal, assim como os píeres onde atracam os navios de cada produto, caracterizando a independência entre as operações destes produtos, as quais têm em comum apenas a recepção de lotes ferroviários, que permanecem em fila no pátio até a alocação de um equipamento de descarga e um pátio ou silo.

3.1.1. Caracterização do subsistema de descarga de trens

Dado que a atuação deste estudo concentra-se principalmente no subsistema de descarga ferroviária, serão descritas a seguir as principais etapas constituintes da cadeia produtiva do minério de ferro, as quais podem ser observadas na Figura 7, adaptada de Meireles (2010), que terá como função direcionar o detalhamento das operações do subsistema de descarga de trens.

Figura 7 - Etapas da cadeia produtiva do minério de ferro

Fonte: adaptado de Meireles (2010)

A cadeia produtiva tem início na extração do minério de ferro, seguida das etapas de estocagem nas minas, beneficiamento e transporte para a ferrovia. Os trens são carregados em terminais de carregamento e são transportados ao longo das ferrovias em direção aos terminais portuários. Em seguida, o minério ferro é descarregado nos viradores de vagões, estocado e carregado nos navios, enquanto os trens vazios retornam às minas para um novo ciclo.

Para os grãos agrícolas, a estrutura geral da cadeia produtiva é a mesma, diferindo em alguns aspectos. Conforme descrito em Pontes, Do Carmo e Porto (2009), o transporte de soja, por exemplo, no Brasil, ainda possui forte dependência do modal rodoviário, que apresenta condições precárias no país. Assim, diferentemente da cadeia do minério, que é carregado nos trens diretamente a partir das minas, os grãos alimentícios passam, em sua maioria, por uma etapa a mais de transporte, sendo movimentados por caminhões dos locais de plantio até os postos de carregamento de trens ou diretamente ao próprio terminal portuário. Este processo, no entanto, segundo os autores, gera grande filas de caminhões devido à desorganização e ineficiência dos sistemas ferroviário e portuário.

Para descrever as etapas da operação de descarga de trens, desde a chegada até a saída do terminal, será utilizada como referência a monografia de pós-graduação de Carneiro (2008), que apresentou em seu estudo os processos envolvidos no circuito do minério do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira (TFPM), pertencente à Vale e localizado no Maranhão.

O processo se inicia com a chegada de trens carregados em uma linha singela, que segundo Meireles (2010) é uma linha férrea na qual a circulação dos trens é permitida apenas em um único sentido por vez, o que impede que a entrada e saída de trens no terminal ocorra de maneira simultânea. Após a entrada dos trens neste trecho, controlado pelo CCO (Centro de controle operacional), eles têm que percorrer mais 500 m até a chegada no pátio de recepção. O trem de minério considerado no estudo é composto por 330 vagões, divididos em um lote de 110 e outro de 220 vagões, ambos tracionados por 2 locomotivas cada, conforme Figura 8.

Figura 8 - Composição do trem de minério

Fonte: Carneiro (2008)

Em seguida, os trens carregados são divididos em lotes de 110 vagões. Neste momento, se houver um virador de vagões disponível e compatível com o produto contido no trem, o primeiro lote é direcionado ao virador, enquanto os outros lotes aguardam na área de recepção (Figura 9). Caso o virador esteja ocupado, todos os lotes permanecem na área de recepção até que o recurso seja liberado. A autora afirma que os lotes são geralmente levados ao virador por ordem de chegada. No TFPM, a área de recepção possui cinco linhas, sendo que duas têm capacidade para 330 vagões e três têm capacidade para 220 vagões.

Figura 9 - Área de recepção do TFPM

Fonte: Carneiro (2008)

Um lote que está aguardando na área de recepção deve se direcionar ao virador somente quando restarem no mínimo 18 vagões do lote anterior, que está sendo atendido pelo virador.

A área de aproximação dos viradores possui três linhas com capacidade para 110 vagões, as quais podem ser acessadas por qualquer uma das 5 linhas da área de aproximação, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Área de aproximação dos viradores.

Fonte: Carneiro (2008)

Nos viradores, os vagões são descarregados dois a dois, sendo que após a operação a dupla de vagões passa por uma inspeção visual para verificar se algum necessita de manutenção. Os vagões que estiverem avariados são removidos do lote, enquanto os que estão intactos são levados para a área de classificação, que possui três linhas com capacidade de 110 vagões cada. Os lotes seguem então para a área de formação, onde são formados novamente os trens com a composição inicial, agora com vagões vazios.

Por fim, os trens seguem em direção à saída do terminal. Caso algum trem carregado esteja utilizando a linha de aproximação do terminal, que é singela, o trem vazio aguarda até que a linha esteja livre.

3.2. SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Banks (1998) define simulação como a imitação das operações de um processo ou sistema real ao longo do tempo. Ela envolve a geração de situações artificiais (cenários) e a observação destas situações para realizar inferências acerca das características operacionais do sistema real representado. Pidd (2003), em uma discussão sobre ciência da gestão, aponta que o propósito de um modelo é entender,

modificar, gerenciar e controlar a realidade. Com base nesta definição, Robinson (2014) define o objetivo de uma simulação como sendo a obtenção de um melhor entendimento e/ou identificação de melhorias em um sistema.

A simulação computacional pode ser dividida em três categorias, de acordo com Chwif e Medina (2014), sendo a primeira delas a Simulação de Monte Carlo, que utiliza a geração de números aleatórios para simular sistemas, sem considerar o tempo como uma variável. Já a Simulação Contínua abrange as mudanças de estado do sistema no decorrer do tempo e é aplicada na modelagem de sistemas cujo estado varia continuamente no tempo. Por fim, a Simulação de Eventos Discretos, que também considera os estados do sistema no tempo, é utilizada na modelagem de sistemas cujas mudanças de estado das variáveis ocorrem em pontos discretos no tempo e são ocasionadas por eventos, que de acordo com Law e Kelton (2000), são definidos como ocorrências instantâneas que podem alterar o estado do sistema.

Tendo em vista as categorias de simulação apresentadas, a técnica adotada para a realização deste estudo foi a Simulação de Eventos Discretos, uma vez que as mudanças de estado das variáveis envolvidas na descarga de trens em um terminal portuário se adequam à classificação descrita. Além disso, a técnica apresenta diversas vantagens em relação às outras existentes, como por exemplo: (1) a facilidade de se testar diversos cenários ou estratégias propostas de maneira rápida e virtual; (2) a possibilidade de se representar as operações de sistemas complexos detalhadamente e com alta confiabilidade, por meio da avaliação dos impactos das relações de interdependência entre os subsistemas e suas variáveis no desempenho do sistema.

Robinson (2014) afirma que existem diversos diagramas e descrições acerca das principais atividades ou etapas de um estudo de simulação, sendo que cada autor apresenta de maneira diferente sua abordagem em relação a modelos de simulação. No entanto, uma inspeção detalhada destas explicações mostra que são, na verdade, muito similares, à medida que diferem apenas na nomenclatura utilizada para as etapas e o número de subatividades em que o estudo é dividido.

O mesmo autor propõe um diagrama que representa os estágios de um estudo de simulação, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Etapas e atividades de um estudo de simulação

Fonte: traduzido de Robinson (2014)

A motivação para um estudo de simulação, segundo o autor, é o reconhecimento da existência de algum problema no mundo real, podendo ser em um sistema existente ou uma preocupação acerca de um sistema proposto. O papel do modelador é, então, entender a natureza deste problema e propor um modelo adequado para resolvê-lo. Assim, a modelagem conceitual consiste nas seguintes subatividades: (1) entender o problema e seu contexto; (2) determinar os objetivos da modelagem; e (3) desenvolver o modelo conceitual, delineando os *inputs*, *outputs* e o conteúdo do modelo.

A coleta e a análise de dados devem estar alinhadas à modelagem conceitual, uma vez que é importante a obtenção de dados preliminares ou contextuais para o entendimento inicial do problema. Além disso, os dados detalhados que serão necessários ao modelo computacional são identificados no modelo conceitual, o que contribui para a importância desta etapa no projeto.

A conversão do modelo conceitual para o computacional consiste no desenvolvimento do modelo em *softwares* especializados em simulação, tais como Arena, SIMUL8, AnyLogic, dentre outros, sendo que a escolha do programa a ser utilizado depende de variáveis como disponibilidade de licença de uso, familiaridade do modelador ou ainda exigência de clientes.

Uma vez que o modelo computacional foi desenvolvido, inicia-se a fase de experimentação, na qual diferentes cenários são testados a fim de entender e/ou

propor melhorias ao sistema real. Este é um processo de análise *what-if*, ou seja, realiza-se mudanças nos dados de entrada do modelo e obtém-se resultados que serão analisados para extrair conclusões e/ou identificar padrões no comportamento do sistema. Com o aprendizado obtido ao estudar os resultados, pode-se testar novos cenários, repetindo o ciclo até que as necessidades de análise sejam satisfeitas.

Por fim, o estágio de implementação, ainda de acordo com Robinson (2014), pode ocorrer de três maneiras distintas: (1) implementar as descobertas da simulação no mundo real, ou seja, colocar em prática propostas de melhoria identificadas no estudo; (2) implementação do modelo, que consiste em entregar o modelo ao cliente para que o mesmo possa testar cenários periodicamente a fim de obter informações que auxiliem em tomadas de decisão; e (3) como aprendizado, em que se utiliza o estudo para melhor entendimento das características e comportamento do sistema, podendo implementar soluções práticas futuramente.

No que diz respeito às possíveis áreas de aplicação da simulação de eventos discretos, Chwif e Medina (2014) afirmam que são muitas, podendo ser divididas em duas grandes categorias, sendo elas serviços e manufatura. Na primeira, os autores fornecem exemplos de aplicações em aeroportos, bancos, *call centers*, escritórios, hospitais e até terminais portuários, sendo que em cada um destes a simulação pode ser utilizada com diferentes finalidades, tais como determinação da quantidade de equipamentos, dimensionamento de sistemas de transporte, proposição de melhores arranjos físicos ou fluxos de processos, dentre outras. Na área de manufatura, a simulação também pode ser aplicada em diversos segmentos, como sistemas de movimentação e armazenagem de materiais, linhas de montagem, problemas de programação da produção e análise de estoques.

Assim, a revisão da literatura foi essencial para a identificação de estudos de simulação realizados em terminais portuários de minério de ferro sob diferentes enfoques e com diferentes objetivos. Os trabalhos mais relevantes encontrados são apresentados de maneira sucinta na seção terciária seguinte.

3.2.1. Uso de simulação em terminais portuários de minério de ferro

Conforme discutido, os terminais portuários são sistemas que propiciam a aplicabilidade de simulação de eventos discretos. Sendo assim, existem diversos estudos destes sistemas na literatura, com escopos, objetivos e embasamentos metodológicos diferentes. São apresentados a seguir trabalhos que foram considerados significativos e que abordam este assunto sob diferentes enfoques. A ordem de apresentação destes trabalhos é baseada no escopo do estudo, abrangendo desde a chegada de navios no canal de acesso até a descarga de minério nos trens. Por fim, são apresentados os trabalhos com escopo mais amplo, que visam estudar a produtividade do sistema em sua totalidade.

Como exemplo de uso da otimização em conjunto com a simulação, Mota (2016) apresentou em sua tese de doutorado um estudo realizado no Porto de Santos, cujo objetivo foi propor um método de programação da entrada de navios no canal de acesso, com o objetivo final de se obter um aumento de capacidade do terminal. Para isto, o autor utilizou dados disponíveis do sistema para desenvolver e solucionar um modelo matemático por meio de métodos de otimização e heurísticas. As soluções obtidas foram então testadas em um modelo de simulação de eventos discretos, construído para que as incertezas inerentes aos processos fossem consideradas. O estudo obteve resultados satisfatórios, uma vez que demonstrou que a aplicação da técnica proposta poderia resultar em uma redução de 5,5% no tempo diário de operação dos navios.

Camelo et al. (2010) realizaram um estudo de aplicação de teoria de filas e simulação para dimensionar e avaliar o impacto da instalação de um novo píer no sistema de embarque de minério de ferro e manganês do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), um porto privado da mineradora Vale localizado na Ilha de São Luís, no nordeste do Brasil. Os autores utilizaram a teoria de filas para classificar o problema em questão e definir as principais medidas de desempenho e os parâmetros operacionais que seriam testados na simulação. Os resultados do estudo mostraram que a introdução de um novo píer seria suficiente para atender à crescente demanda, respeitando níveis de capacidade e ocupação determinados com base em píeres semelhantes já existentes no sistema.

Neto (2006) teve como objetivo de sua dissertação de mestrado o desenvolvimento de um modelo de simulação para representar as operações de um sistema produtivo de minério de ferro, bem como avaliar o comportamento deste sistema diante de alterações em parâmetros operacionais, como sequência de programação da produção, nível de estoque de segurança dos produtos e quantidade de equipamentos disponíveis (berços de atracação e carregadores de navios). O principal indicador analisado foi a somatória dos custos de manutenção de estoques, vendas perdidas e multa por sobre-estadia dos navios. O autor concluiu que o modelo de simulação é uma ferramenta de grande utilidade para o processo de tomada de decisões na gestão de sistemas produtivos.

No contexto de áreas de estocagem, Vianen, Ottjes e Lodewijks (2014) propuseram uma metodologia analítica para dimensionar o estoque de um terminal portuário e o desenvolvimento de um modelo de simulação para que o caráter estocástico das variáveis envolvidas no processo fosse considerado no estudo. Para determinar os parâmetros que afetam o tamanho necessário dos pátios de estocagem, um fator de estoque foi derivado analiticamente. Este fator tem como função definir a razão entre a quantidade anual produzida no terminal e o nível de estocagem necessário. O estudo de caso apresentado utilizou dados reais da operação de um terminal para alimentar o modelo de simulação. Com a metodologia proposta, os autores obtiveram sucesso em dimensionar a área de estocagem do terminal. No entanto, eles reconheceram que há desvios significativos entre o sistema real e o modelo, uma vez que no modelo as pilhas são sempre estocadas até a altura máxima, o que não acontece na realidade.

Os mesmos autores realizaram um estudo no ano seguinte, porém com enfoque diferente do anterior. Vianen, Ottjes e Lodewijks (2015) buscaram utilizar um modelo de simulação para reprogramar as empilhadeiras-recuperadoras (ER) durante as operações, com o intuito de reduzir o tempo que os trens ficam no porto, garantindo que o tempo de permanência estabelecido dos navios seja respeitado e, conseqüentemente, obtenha-se um aumento no desempenho do terminal. Os autores desenvolveram um algoritmo a ser implementado no modelo de simulação, de modo que a operação de empilhamento pudesse ser interrompida para priorizar a recuperação contanto que determinadas condições fossem atendidas, tais como a disponibilidade de equipamentos, existência de linhas de transporte compatíveis e

número máximo de interrupções por navio. Os autores verificaram que a reprogramação das ERs reduziu o tempo de permanência dos trens no sistema, mas ocasionou um pequeno aumento no tempo de permanência dos navios.

Meireles (2010) desenvolveu sua dissertação de mestrado com base na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), na qual propôs a construção de um modelo de simulação no *software* Arena para analisar diferentes cenários e obter informações que auxiliem no processo de tomada de decisão a curto e longo prazo. O autor realizou uma análise do tipo *what-if*, variando parâmetros como o tamanho dos trens de minério, quantidade de trens disponíveis na malha, peso médio dos vagões, número de pontos de carregamento e horários de operação. A metodologia aplicada neste estudo pode ser amplamente encontrada na literatura, pois consiste em desenvolver um modelo que represente um sistema real e realizar experimentações com as variáveis de processo a fim de se obter informações relevantes e planejar tomadas de decisões.

Uma aplicação semelhante da simulação foi feita por Carneiro (2008), que desenvolveu um modelo representativo do TFPM para identificar gargalos e ociosidades em sua operação. Para isto, a autora baseou a construção do modelo nas características operacionais e infraestrutura existentes no momento da realização do estudo. Como resultados, foi possível identificar que tanto no cenário atual, quanto nos cenários alternativos testados, os quais consistiam no aumento da taxa de chegada dos trens, os gargalos eram os viradores de vagões e o pátio de recepção. Para o cenário atual, estes gargalos obtiveram níveis de ocupação aceitáveis, enquanto para os cenários alternativos estes valores ultrapassariam o máximo estabelecido, indicando a necessidade de se aumentar o número de recursos na recepção dos trens e nos viradores de vagões.

Sob uma perspectiva mais abrangente de um terminal portuário, Zampirolli (2016) apresentou em sua dissertação de mestrado um modelo de simulação do Terminal Portuário de Minério de Ferro de Tubarão, localizado em Vitória, no Espírito Santo. O principal objetivo do estudo foi o aumento da capacidade do sistema sem que houvesse a necessidade de investimentos na infraestrutura do porto. A autora estudou o impacto da substituição de alguns produtos movimentados no terminal por um produto único, denominado produto padrão. Para isto, foram testados dois cenários principais, um com o produto padrão e outro sem, além de cenários alternativos de

sensibilidade, nos quais foram testadas variações na priorização de embarque por classe de navio e na quantidade inicial demandada dos produtos. Ela evidenciou em sua conclusão que a ferramenta de simulação foi essencial para testar estes cenários e prever a viabilidade das alternativas propostas.

Por fim, Pereira et al. (2017) propuseram uma metodologia, seguida de sua aplicação em um estudo de caso, para dimensionar e avaliar a capacidade de terminais portuários utilizando como principal ferramenta a simulação computacional. Os autores apresentam o conceito de capacidade associado ao nível de serviço do sistema, isto é, a capacidade do terminal é definida por meio da determinação do nível máximo de demanda que pode ser atendida sem que níveis de serviço estabelecidos sejam violados. Os valores máximos considerados aceitáveis neste estudo foram: 240h ou 10 dias de tempo médio de fila e 85% de ocupação dos equipamentos e dos berços de atracação. Os resultados obtidos demonstraram que ao aumentar a demanda de minério de ferro, os únicos recursos que atingiram o limite de ocupação predeterminado foram os berços de atracação, identificados como gargalos do sistema. Neste ponto, pode-se dizer que o terminal atingiu a sua capacidade máxima atual de movimentação de minério.

3.3. PROGRAMAÇÃO DE TAREFAS

A programação de tarefas, conforme apresentado por Wight (1974), surgiu como uma técnica utilizada no gerenciamento da produção e do estoque em sistemas industriais, sendo que, para o autor, os dois principais problemas neste contexto são: prioridade e capacidade, isto é, definir qual material é necessário e em que momento, além de manter estas informações atualizadas. A capacidade, nesta definição, diz respeito ao dimensionamento do número de operários e equipamentos necessários para cumprir a programação proposta.

Conway, Maxwell e Miller (2003), com uma visão mais ampla, afirmam que os problemas de programação, ou sequenciamento, são muito comuns e ocorrem sempre que houver uma escolha a respeito da ordem em que uma certa quantidade de tarefas deve ser realizada. Estes problemas podem ser, por exemplo: tarefas em uma planta de manufatura, aeronaves aguardando autorização para pousar, clientes em fila aguardando para serem atendidos no banco, programas a serem executados em um computador ou até tarefas domésticas em um final de semana.

A questão apontada pelos autores é que muitas vezes estes problemas são resolvidos automaticamente, sem que haja ao menos o reconhecimento da existência de um problema. No entanto, a solução que é adequada para a fila do banco, pode não ser para as tarefas em uma fábrica, ressaltando a importância de se estudar e classificar formalmente estes problemas.

3.3.1. Classificação de problemas de programação de tarefas

Para Pinedo (2012), o sequenciamento é um processo de decisão que consiste na alocação de recursos para a execução de tarefas ao longo de determinados períodos com o propósito de otimizar um ou mais objetivos. Cada tarefa pode ter um certo nível de prioridade, um tempo mínimo de início e um prazo para ser finalizada. Os objetivos também podem assumir diferentes formas, podendo ser a minimização do tempo de término da última tarefa ou do número de tarefas completadas após o prazo, por exemplo.

Segundo o autor, um problema de sequenciamento, ou *scheduling*, é descrito por um terno, composto por parâmetros $\alpha | \beta | \gamma$, no qual o parâmetro α representa o ambiente de manufatura, o β representa detalhes acerca das características e restrições do processo e γ diz respeito ao objetivo do problema em questão. As possibilidades para o preenchimento dos parâmetros descritos são muitas, portanto serão descritos a seguir os principais exemplos de cada um, selecionados de acordo com o critério de adequação ao tema deste trabalho.

3.3.1.1. Ambientes de manufatura

Os primeiros ambientes de manufatura (α) apresentados são os de máquinas simples, ou seja, aqueles que consideram a situação em que uma tarefa deve ser atendida por uma máquina, sem preocupação com etapas antecedentes ou posteriores. Os principais ambientes de máquinas simples são apresentados a seguir, sendo que as abreviações entre parênteses são os valores que o parâmetro α pode assumir:

- a) máquina singular (1):** o caso mais simples possível, no qual há apenas uma máquina para atender as tarefas;
- b) máquinas idênticas em paralelo (P_m):** em que há um número de máquinas idênticas em paralelo e a tarefa pode ser executada em qualquer uma delas.

c) máquinas idênticas com diferentes velocidades (Qm): também descrito como máquinas uniformes, é o ambiente em que as máquinas têm diferentes velocidades de operação, isto é, o tempo de execução da tarefa depende apenas da máquina que a executar.

d) máquinas em paralelo não-relacionadas (Rm): é uma generalização do caso anterior, no qual a velocidade da máquina depende da tarefa a ser executada, ou seja, o tempo de execução depende não só da máquina alocada, mas também da tarefa que será executada.

Ambientes de manufatura mais complexos, como *flow shops* e *job shops*, que consistem em diversos estágios consecutivos de máquinas, não serão apresentados neste documento. No entanto, recomenda-se ao leitor interessado a consulta a Pinedo (2012), em que o assunto de programação de tarefas é descrito de maneira completa e detalhada.

Na Figura 12 é apresentada uma exemplificação de diversos ambientes de manufatura. As máquinas em diferentes estágios são ilustradas com a notação M_{ij} , interpretada como máquina i do estágio j . Na figura são exemplificados até ambientes mais complexos, como *flow shops* e *job shops*, nos quais as tarefas passam por diversos estágios até chegarem ao fim de seu processamento.

Figura 12 - Representação de ambientes de manufatura

Fonte: traduzido de Marichelvam, Prabaharam e Yang (2014)

Para ambientes simples, como os descritos neste capítulo, considera-se apenas um estágio de máquinas em paralelo, que na Figura 12 corresponde à primeira coluna de máquinas M_{i1} , com exceção do ambiente da máquina singular, no qual considera-se apenas a primeira e única máquina M_{11} .

3.3.1.2. Características e restrições do processo

Existem diversos tipos de restrições e características que podem ser aplicadas ao problema de sequenciamento. A seguir são apresentadas as principais, consideradas as mais relevantes para este estudo:

- a) momento de liberação (r_j):** esta restrição implica que uma tarefa j não pode iniciar seu processamento antes do momento de liberação r_j , ou seja, indica que a tarefa estará disponível para processamento somente a partir de um dado instante.
- b) restrição de elegibilidade de máquinas (M_j):** este símbolo pode aparecer no terno do problema quando há m máquinas em paralelo, mas nem todas elas podem processar uma tarefa j , ou seja, há tarefas que podem ser processadas apenas em máquinas específicas.

3.3.1.3. Objetivos do problema

Ainda segundo definições de Pinedo (2012), o objetivo de um problema de sequenciamento é sempre uma função do tempo de conclusão das tarefas, os quais dependem da programação realizada. O momento de conclusão de uma tarefa j em uma máquina i é identificado como C_{ij} , enquanto o momento em que uma tarefa deixa o sistema, isto é, o momento em que ela é processada na última máquina de seu roteiro, é denotado como C_j .

Um dos principais objetivos utilizados é o de minimização do *makespan* (C_{max}), que é o instante em que a última tarefa é executada, ou seja, é um parâmetro que indica o tempo total de operação do sistema considerado, desde o início da primeira até o término da última tarefa, sendo que, para o autor, a obtenção de um *makespan* mínimo sugere uma utilização eficiente das máquinas.

Outros objetivos existentes estão relacionados à minimização do atraso na execução das tarefas ou ainda na quantidade de tarefas atrasadas e podem ser utilizados para

minimizar multas por sobre-estadia de navios ou quaisquer outras penalidades associadas ao término da execução das tarefas em momentos diferentes dos previstos.

O problema apresentado neste estudo poderia ser classificado, de acordo com as definições apresentadas neste capítulo, com o terno $Qm \mid r_j \mid M_j / \sum w_j U_j$. Vale ressaltar que esta classificação só é válida ao analisar o subsistema de descarga ferroviária isoladamente, considerando os viradores de vagões e moegas como máquinas em paralelo que operam com velocidades diferentes (Qm) e apresentam restrição de elegibilidade (M_j), isto é, os viradores não podem atender os lotes de grãos alimentícios, assim como as moegas não podem atender os lotes de minério de ferro.

A presença da notação r_j deve-se ao fato de que os lotes ferroviários (tarefas) só podem ser atendidos a partir do momento que chegam ao terminal (*release date*). A ausência deste parâmetro indicaria que todos os lotes previstos poderiam ser atendidos a qualquer momento, o que seria incompatível com a realidade do sistema proposto.

Em relação ao objetivo de minimização, indicado na terceira parte do terno apresentado, é difícil classificar o problema ao analisar isoladamente o subsistema de descarga ferroviária, uma vez que na realidade as operações de todos os subsistemas ocorrem de maneira conjunta e simultânea. No entanto, o objetivo encontrado na literatura, mais precisamente em Pinedo (2012), mais adequado a este problema seria o *Weighted number of tardy jobs* ($\sum w_j U_j$), que visa minimizar o número de tarefas completadas após o prazo, ou seja, o número de trens atendidos após o prazo máximo estipulado (antecedência mínima à chegada do navio de referência).

3.3.2. Regras de priorização de tarefas

Os problemas de programação de tarefas são extensamente pesquisados atualmente, devido à vasta gama de métodos que podem ser aplicados na busca por soluções. Não há um consenso na literatura acerca de qual método é mais adequado, uma vez que existem muitas variantes do problema, o que torna difícil a seleção de um único método que forneça a melhor solução para todas elas.

Gupta e Sivakumar (2006) em sua pesquisa, identificaram que as abordagens mais comuns para o problema de sequenciamento de tarefas podem ser classificadas em

quatro categorias: (1) regras de priorização/despacho; (2) técnicas de programação matemática; (3) métodos de busca local; e (4) técnicas de inteligência artificial. Serão abordadas com detalhe nesta revisão apenas as regras de priorização ou despacho, uma vez que são objeto de estudo deste trabalho.

As técnicas de programação matemática, segundo os mesmos autores, são amplamente aplicadas em problemas de sequenciamento, formulando-os por meio de programação inteira, mista ou ainda dinâmica. A solução destes métodos exige alto esforço computacional devido à sua caracterização como NP-difíceis, que de acordo com Papadimitriou e Steiglitz (1998) são problemas que não podem ser resolvidos por meio de nenhum algoritmo polinomial. O leitor que desejar se aprofundar neste conceito, que é extenso e relevante, é convidado a ler a referência apresentada.

Os métodos de busca local fornecem boas soluções e apresentam a possibilidade de melhorias quando combinados com outras heurísticas. Conceitualmente, estas técnicas consistem em realizar pequenas alterações na programação até que não sejam observadas melhorias na função objetivo. Um procedimento baseado em busca local não garante uma solução ótima, mas procura obter uma solução melhor que a atual dentro de sua vizinhança.

A inteligência artificial oferece um meio de combinar diversos conhecimentos como o uso da inteligência humana incorporada ao sistema e apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos. No entanto, as desvantagens são grandes, tais como: alto consumo de tempo, dificuldade de se manter e realizar alterações e a falta de sistemas genéricos acessíveis de inteligência artificial.

As regras de priorização são extensamente aplicadas em problemas de sequenciamento de tarefas, uma vez que, segundo Kaban, Othman e Rohmah (2012), fornecem boas soluções para problemas complexos em um ambiente de produção em tempo real. Os autores ainda afirmam que os impactos gerados pela disciplina de priorização de tarefas são muito difíceis de serem explicados utilizando métodos analíticos. No entanto, o estudo de sequenciamento dinâmico teve um rápido progresso com o advento da simulação computacional, que permitiu que diversas regras fossem comparadas utilizando modelos computacionais.

Panwalkar e Iskander (1977) apresentaram em seu estudo a classificação de mais de 100 regras de despacho observadas em uma revisão extensa da literatura. As regras

de priorização podem ser classificadas em duas categorias: estáticas e dinâmicas, sendo que as estáticas são aquelas em que a prioridade de uma tarefa não é alterada em função da passagem do tempo, enquanto que as dinâmicas são caracterizadas por serem dependentes do tempo, isto é, as prioridades das tarefas são diferentes em dados momentos.

Os autores apresentam diversas regras de priorização de tarefas, classificadas de acordo com a informação com a qual estão relacionadas, sendo elas: tempo de processamento, prazo para término, número de operações, custos, tempos de *setup* e chegada, além de combinações existentes entre as regras descritas. As regras mais presentes na literatura relacionada ao tema deste estudo são resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais regras de priorização

Sigla	Nome da regra	Descrição
SPT	<i>Shortest Processing Time</i>	Prioriza a tarefa com o menor tempo de processamento
EDD	<i>Earliest Due Date</i>	Prioriza a tarefa com o prazo de término mais próximo
ERD	<i>Earliest Release Date</i>	Prioriza a tarefa com o menor momento de liberação
FIFO	<i>First In First Out</i>	Prioriza a tarefa com data de chegada mais antiga
SPS	<i>Shortest Process Sequence</i>	Prioriza a tarefa com sequência de processos mais curta
CR	<i>Critical Ratio</i>	Prioriza a tarefa com menor razão entre o tempo disponível e o tempo necessário para cumprimento das operações
SIRO	<i>Service in Random Order</i>	Seleciona as tarefas de maneira aleatória
WINQ	<i>Work in Next Queue</i>	Prioriza a tarefa cuja fila para a próxima etapa seja menor
S-1	<i>Shortest Slack</i>	Prioriza a tarefa com a menor “folga” (tempo disponível até o prazo de término) para realizar o restante das operações

Fonte: Panwalkar e Iskander (1977)

Rajendran e Holthaus (1999) desenvolveram um estudo para avaliar o desempenho de diferentes regras de despacho em ambientes produtivos de fluxo contínuo, mais especificamente *flow shops* e *job shops* dinâmicos, o que, de acordo com os autores, torna a análise mais interessante e reveladora, à medida que o roteiro seguido pelas

tarefas influencia no desempenho relativo das regras de despacho. Um total de 13 regras foram avaliadas, sendo três delas novas regras propostas pelos autores para este estudo. A análise de desempenho foi conduzida sob os objetivos de minimização do tempo de atravessamento, número de tarefas atrasadas, média de atraso, dentre outros. Os estudos de simulação utilizados na condução das análises revelaram que o desempenho das regras de despacho varia de acordo com o objetivo do problema, isto é, para cada função objetivo, uma regra diferente apresentou melhores resultados.

Em um estudo mais recente, Hildebrandt, Heger e Scholz-Reiter (2010), assumem como premissa algo que foi obtido como conclusão em Rajendran e Holthaus (1999): não há uma regra geral que atenda diferentes cenários e objetivos. Assim, os autores buscaram aprimorar regras de despacho existentes utilizando programação genética. Um fato interessante é que os autores tomaram como referência para comparar as regras geradas pelo algoritmo genético quatro regras muito conhecidas na literatura (FIFO, ERD, SPT e WINQ) e duas regras desenvolvidas pelos autores Rajendran e Holthaus em seus estudos anteriores. Os cenários testados variaram a utilização do sistema (80% e 95%) e a presença ou não da obrigatoriedade de as tarefas passarem por todos os estágios.

3.3.3. Aplicação em terminais portuários

A aplicação de problemas de programação e/ou priorização de tarefas em terminais portuários pode ser encontrada na literatura em grande quantidade. No entanto, a maioria dos estudos publicados focam em otimizar a programação de máquinas, como veículos autônomos e gruas em terminais de contêineres ou então buscam avaliar possibilidades de melhoria nas operações portuárias de maneira integrada, por meio da modelagem analítica do sistema. A seguir são apresentados trabalhos com diferentes objetivos e ambientes de pesquisa, mas nos quais o conceito de que diferentes regras de priorização de tarefas resultam em diferentes níveis de desempenho operacional é objeto de estudo.

Liu e Ioannou (2002) estudaram diferentes regras de despacho de veículos autônomos ou AGV (*Automated Guided Vehicles*) em um terminal automatizado de contêineres. A justificativa para a pesquisa foi o surgimento de navios muito grandes somado à escassez de áreas disponíveis para expansão dos portos, tornando necessária a busca por maior eficiência operacional.

Os autores utilizaram um modelo de simulação para testar quatro regras de despacho: (1) maior distância a ser percorrida, na qual prioriza-se o contêiner cuja distância calculada do AGV é maior; (2) menor distância a ser percorrida, que é o oposto da regra anterior; (3) aleatório, em que a alocação do próximo contêiner ao AGV é feita de maneira aleatória e (4) menor fila de AGVs na grua, na qual prioriza-se qualquer um dos contêineres que seja atendido pela grua com o menor número de AGVs em fila. Os resultados apresentados mostraram que a utilização de diferentes regras de despacho, mantendo o cenário operacional, ocasionou variações no desempenho do terminal, sendo que a regra mais favorável foi a de menor fila de AGVs na grua.

Guo et al. (2020) estudaram diferentes regras de priorização em um ambiente no qual duas gruas acessam áreas exclusivas à cada uma, mas compartilham um espaço que é utilizado quando é necessário realizar uma tarefa composta, isto é, que uma grua deposite um contêiner que será então coletado pela outra para completar o trajeto estabelecido (Figura 13). As regras testadas variaram a priorização de tarefas (simples ou compostas) e gruas (1 ou 2), bem como a possibilidade de que uma grua realize a coleta de um contêiner logo após depositar outro na área comum.

Figura 13 - Área de estocagem de contêineres

Fonte: Guo et al. (2019)

Os resultados foram obtidos por meio de um modelo de simulação computacional, no qual foram aplicadas todas as regras em diversos cenários, variando também as proporções de tarefas simples e compostas em relação ao total de tarefas. A regra de maior desempenho foi a C2-OH, na qual a grua 2 prioriza tarefas simples, na área comum prioriza as tarefas mais próximas e quando as duas gruas são acionadas

simultaneamente para irem à área comum, a grua 2 não pode realizar uma coleta seguida de um depósito.

Por fim, Babu et al. (2015) buscaram reduzir o tempo médio sobre-estadia dos navios em um terminal de importação de carvão por meio de uma abordagem integrada, considerando simultaneamente a programação de navios e trens, bem como o planejamento da área de estocagem. Os autores classificam o problema como NP-difícil e justificam a aplicação de heurísticas de construção gulosas (*greedy construction heuristic algorithms*) para obter soluções devido à maior facilidade de implementação quando comparadas a métodos de otimização tradicionais.

Duas heurísticas foram consideradas, as quais diferem apenas na programação da chegada de navios, sendo que uma prioriza os navios com menor tempo estimado de chegada e a outra considera uma combinação linear deste mesmo parâmetro e do tempo necessário para disponibilizar o espaço em pátio requerido pelo navio. A segunda heurística obteve melhor desempenho após a aplicação de ambas em duas bases de dados históricos e a comparação com tempos médios reais de sobre-estadia dos navios.

Os trabalhos apresentados nesta seção mostram que as regras de priorização ou programação de tarefas em terminais portuários podem afetar diretamente a eficiência das operações e são considerados como respaldo teórico para o presente estudo. Apesar da escassez, verificada durante o esforço de revisão da literatura, de publicações que consideram efetivamente a implementação de diferentes regras de despacho em terminais de granéis sólidos, considera-se que existe embasamento científico significativo para justificar a condução deste estudo.

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Nesta seção é apresentado o conteúdo que, de acordo com a metodologia de Chwif e Medina (2014), corresponde à modelagem conceitual do sistema, a qual é de extrema importância para um projeto de simulação, uma vez que promove maior entendimento do problema e comunicação entre os envolvidos no projeto. Além disso, um modelo conceitual bem desenvolvido facilita a criação do modelo computacional e sua validação, pois aumenta a confiabilidade do modelo acerca da representação do sistema.

O objetivo desta seção é, então, apresentar de forma detalhada os subsistemas que constituem o sistema estudado, descrevendo para cada um deles as etapas do processo produtivo, os equipamentos envolvidos, as premissas adotadas e as restrições existentes. Vale ressaltar que os produtos movimentados neste terminal são graneis sólidos que possuem características diferentes (minérios de ferro e grãos alimentícios), o que implica no uso de equipamentos e estruturas específicos para as operações de cada tipo de produto.

O fluxo de movimentação destes produtos segue a ordem apresentada na Figura 14, na qual ilustra-se de maneira simplificada os principais subsistemas do terminal, bem como o sentido da movimentação de produtos, característico da natureza de exportação das operações realizadas. Na Figura 14, observa-se que os produtos são descarregados dos trens, transportados para pátios de armazenamento e, em seguida, carregados nos navios. O detalhamento das operações em cada uma destas etapas é feito neste capítulo.

Figura 14 - Fluxo simplificado do terminal

Fonte: o autor

4.1. LÓGICA DE GERAÇÃO DE NAVIOS E TRENS

Pelo fato de ser um empreendimento inexistente, não existem dados históricos para se utilizar como base para a programação de chegada dos navios e trens ao terminal. Além disso, como esta programação depende de quais produtos são movimentados

e suas respectivas demandas, não é possível replicar a de outros terminais considerados *benchmarks* (referências) de boas práticas para este projeto.

Assim, faz-se necessário um embasamento teórico para definir um modelo probabilístico que represente o processo de chegada de entidades ao terminal. De acordo com Bertsekas e Tsitsiklis (2008), um processo de chegada é chamado de processo de *Poisson* se possuir as seguintes propriedades:

- a) homogeneidade temporal:** a probabilidade $P(k,t)$ de k chegadas é a mesma para todos os intervalos de tempo t ;
- b) independência:** o número de chegadas durante um intervalo de tempo é independente do histórico de chegadas fora deste intervalo;
- c) probabilidade em pequenos intervalos:** a probabilidade de duas ou mais chegadas no mesmo intervalo de tempo deve tender a zero se a duração do intervalo tender a zero, isto é, duas entidades não podem chegar no mesmo instante.

Assim, verifica-se que a chegada de navios a um terminal, assim como a de clientes à uma loja, pode ser modelada como um processo de *Poisson* com parâmetro λ , que representa a taxa de chegada de entidades por intervalo de tempo. Além disso, uma propriedade importante do processo de *Poisson* é que o intervalo entre as chegadas segue uma distribuição exponencial com o mesmo parâmetro λ . No caso do terminal estudado, este parâmetro é calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{N}{T}$$

Em que:

N representa o número total de navios a serem atendidos no período T;

T representa o tempo total considerado na análise.

Uma rotina desenvolvida em *Visual Basic for Applications* (VBA) lê as informações referentes às demandas dos produtos e aos tipos de navios que irão atendê-las, uma vez que os navios possuem capacidades diferentes de armazenagem. As faixas de capacidade para cada tipo de navio, também chamadas de *Deadweight Tonnage* (DWT), são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Capacidades em quilotoneladas (kt) dos navios por tipo

Tipo	Capacidade (kt)
HandyMax	35 a 50
Panamax	60 a 80
Small Cape	80 a 110
Cape	110 a 140
Large Cape	140 a 170
VLOC	150 a 320
ValeMax	320 a 400

Fonte: o autor

Com isso, a rotina é capaz de gerar uma lista com os navios necessários para atender à demanda, informando o tipo e a quantidade do produto a ser carregado por cada navio, bem como o instante de chegada de cada um ao sistema.

A lista de lotes ferroviários (composições de vagões que formam um trem) é gerada a partir da lista de navios, considerando que para cada navio, a quantidade que será removida do pátio para carregá-lo deve estar disponível no momento de sua chegada. Inclusive, a rotina incorpora uma restrição de antecedência para a chegada dos lotes, isto é, considerando o momento da chegada de um navio, deve-se garantir que a quantidade necessária de lotes ferroviários abasteça os pátios com uma antecedência mínima. Além disso, para assegurar que os lotes não cheguem com muita antecedência em relação ao navio, é definida uma antecedência máxima para sua chegada, conforme esquematizado na Figura 15.

Figura 15 - Esquematização da antecedência dos lotes ferroviários

Fonte: o autor

Vale ressaltar que nesta lógica os lotes não são associados a um navio específico, mas apenas utilizam o momento de sua chegada como referencial, com o intuito de manter um balanço de massa no terminal, além de garantir que haja disponível em pátio a quantidade de produto demandada. No entanto, apesar da antecedência exigida para a chegada do trem, em alguns momentos em que a demanda seja muito

alta, o sistema de descarga ferroviária pode se tornar sobrecarregado e gerar filas que façam com que o atendimento de um lote ocorra com atraso, isto é, após a chegada do navio utilizado como referência, o que pode resultar na falta de produtos em estoque e prejudicar o desempenho do terminal.

4.2. SUBSISTEMA DE DESCARGA DE TRENS

Neste subsistema, a descarga de trens de minérios de ferro e grãos alimentícios segue o mesmo fluxo operacional, porém diferem quanto aos equipamentos utilizados e, conseqüentemente, às taxas de produtividade. Enquanto os lotes de minérios são descarregados utilizando um virador de vagões, os de grãos escoam por uma abertura na parte de baixo do vagão e caem em uma moega por meio de grelhas instaladas no chão do terminal.

A modelagem do subsistema de descarga de trens inicia-se em um pátio de recepção, onde os lotes aguardam a disponibilidade de um virador de vagões, ou moega no caso dos grãos. O desmembramento de um trem em lotes não é considerado na simulação, pois assumiu-se a premissa de que a unidade ferroviária de transporte de cargas são os lotes e não os trens. Outra premissa importante é a consideração de que existem linhas férreas entre todas as linhas onde estão posicionados os lotes e os viradores, o que implica que qualquer lote pode acessar diretamente qualquer virador/moega.

Neste ponto, um lote é selecionado de acordo com uma regra de priorização para ser manobrado do pátio até um equipamento disponível, sendo que, como os equipamentos de minérios e grãos são diferentes, não há interferência na alocação dos lotes destes produtos aos equipamentos de descarga. O tempo de manobra segue uma distribuição de probabilidade cujos parâmetros podem ser configurados pelo usuário e inclui o tempo de alocação e operação de locomotivas de movimentação, rebocadores e práticos, uma vez que estes recursos não serão dimensionados pelo simulador neste estudo. Considera-se que um virador/moega está ocupado desde o início da movimentação de um lote do pátio de recepção até o fim da descarga de seu conteúdo.

A entrada e a saída de trens do terminal, que ocorre por meio de uma linha singela, na qual só é possível a movimentação de um trem por vez, não são consideradas como parte das operações modeladas. Assim, assume-se a premissa de que o tempo de chegada indicado na lista de trens é o instante em que o lote está disponível para

descarga. Além disso, considera-se que a formação de lotes de vagões vazios também não interfere nas operações de descarga, uma vez que Carneiro (2008) descreve a possibilidade de se realizar este procedimento em uma área diferente de formação para evitar a formação de filas e ocasionar atrasos nas operações.

A alocação de um virador de vagão disponível está associada à alocação de uma linha de transporte (esteira transportadora no caso deste sistema), de uma empilhadeira e de um pátio que esteja disponível e possua espaço suficiente para receber a quantidade de produto contido no lote. Da mesma maneira, a alocação de uma moega está associada à disponibilidade de uma esteira transportadora e de espaço em um silo para a armazenagem dos grãos. A lógica do modelo permite que a descarga do lote ocorra parcialmente em diferentes pátios ou silos, contanto que haja compatibilidade entre os mesmos e os equipamentos, ou seja, que haja uma rota viável para descarga.

A operação dos viradores, assim como das moegas, está associada a uma taxa de descarga do equipamento, medida em toneladas/hora. Os viradores possuem capacidade para descarregar dois vagões simultaneamente, o que confere a estes equipamentos maiores taxas de descarga em relação às moegas, nas quais a operação é feita manualmente.

Após a descarga de um lote, há um tempo para liberação do equipamento até que o próximo lote possa ser selecionado para iniciar sua saída do pátio de recepção. Este tempo depende de características da pera ferroviária, como a disposição das linhas de entrada e saída dos trens e a distância entre os equipamentos e os pátios de recepção de lotes cheios e vazios. Caso a saída de um lote vazio não interfira na entrada do próximo, pode-se iniciar a movimentação do lote cheio antes do término da descarga do lote anterior, reduzindo significativamente este tempo. Vale ressaltar que as operações posteriores à saída dos viradores e das moegas, tais como formação de trens vazios e manutenção de vagões avariados não são contempladas neste estudo.

O fluxograma da Figura 16 representa o processamento de um lote ferroviário tanto de minério de ferro quanto de grãos, que se repete para cada lote alocado a equipamento de descarga.

Figura 16 - Processamento de um lote ferroviário

Fonte: o autor

Por fim, de acordo com a descrição das operações, os principais parâmetros identificados neste subsistema são:

- Demanda de cada produto (t/ano);
- Capacidade média de um vagão (t);
- Tamanho do lote (vagões);
- Antecedências mínima e máxima da chegada dos lotes (dias);
- Número de lotes por trem;
- Tempos de manobra ferroviária;
- Capacidade do pátio de recepção (lotes);
- Número de viradores de vagões e moegas;
- Restrições de compatibilidade entre viradores/moegas e produtos, pátios/silos e empilhadeiras.

4.3. SUBSISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Apesar do objetivo deste trabalho estar relacionado ao atendimento de lotes ferroviários, não é possível avaliar as diferentes regras de priorização sem considerar o desempenho do sistema em sua totalidade. Por isto, descreve-se a seguir as características do subsistema de armazenamento. A área de estocagem de minério de ferro é dividida em pátios, que por sua vez são divididos em balizas ou partições, nas quais os produtos são dispostos pelas empilhadeiras. A divisão em balizas

permite a discretização das operações de empilhamento e recuperação, o que facilita o controle da capacidade e do volume de produtos estocados nos pátios.

Este subsistema é composto basicamente por estas balizas e os equipamentos, como empilhadeiras e recuperadoras. Nele também são definidas as ligações, ou rotas, que possibilitam o transporte de materiais entre os pátios e os subsistemas de descarga e carregamento de navios. Define-se, por exemplo, em quais pátios se pode receber e empilhar produtos de determinado equipamento de descarga ou de quais pátios pode-se recuperar materiais para determinado carregador de navios.

Ele é um subsistema intermediário aos outros dois mencionados, uma vez que os pátios são recursos utilizados por ambos. No entanto, existem restrições relacionadas ao espaço físico que impedem a realização de operações de empilhamento e recuperação simultaneamente na mesma partição, o que exige a implementação de uma lógica de controle da designação destes equipamentos às operações.

No presente estudo foram modeladas todas as restrições relacionadas às operações das empilhadeiras e recuperadoras, bem como as alocações de partições aos produtos. No entanto, como principal premissa adotada para este subsistema, a capacidade de estocagem dos pátios não foi restritiva à movimentação dos produtos, uma vez que poderia interferir na observação dos impactos provenientes das regras de despacho de trens.

A alocação de equipamentos e pátios à movimentação de produtos aparenta ser extremamente complexa devido às diversas possibilidades de combinação entre eles. Contudo, em um contexto prático, este problema é simplificado, à medida que não existem, necessariamente, conexões entre todos os pátios e equipamentos, isto é, um pátio, por exemplo, pode ser dedicado à estocagem de apenas um produto de baixa demanda e estar associado a um subconjunto menor de viradores, para evitar que esta carga seja dispersada na área de estocagem. Isto ocorre, também, pelo motivo de que os pátios estão localizados em diferentes áreas do terminal e a construção de uma infraestrutura que permita a interligação entre todos eles e os equipamentos seria extremamente custosa e/ou fisicamente inviável.

Como a alocação dos pátios é realizada previamente às operações de carga e descarga, o subsistema de estocagem consiste apenas na execução das operações

nos pátios, considerando as restrições existentes. Os principais parâmetros relacionados a este subsistema, para o minério de ferro, são:

- Número de pátios;
- Quantidade de partições por pátio;
- Capacidade de cada partição (t);
- Estoque inicial de cada partição (t);
- Associação entre tipos de produtos e partições;
- Associação entre equipamentos e pátios (possibilidade de acesso);
- Associação entre viradores de vagões e tipos de produto.

Para os grãos, a área de estocagem não é dividida em pátios, mas sim em silos, os quais não são divididos em partições, cabendo apenas a definição das restrições entre cada silo e o tipo de produto que será nele armazenado. Além disso, pelos mesmos motivos dos pátios, nem todos os silos podem estar associados à todas as moegas, tornando necessária também a definição destas restrições. Assim, os principais parâmetros relacionados a este subsistema, para os grãos, são:

- Número de silos;
- Capacidade de estocagem de cada silo (t);
- Estoque inicial de cada silo (t);
- Associação entre tipos de produtos e silos;
- Associação entre equipamentos e silos (possibilidade de acesso);

Na Figura 17 apresenta-se uma exemplificação dos subsistemas de um terminal portuário, bem como os equipamentos, pátios, silos e as ligações entre eles. O terminal da figura não representa exatamente o sistema estudado neste trabalho, uma vez que tem apenas o propósito de ilustrar os elementos descritos na modelagem conceitual. Pode se observar na figura que as operações de minério de ferro e grãos são quase independentes, tendo em comum apenas o sistema de recepção de lotes ferroviários, uma vez que compartilham as linhas e o pátio de recepção. Para a compreensão desta lógica na imagem, deve-se assumir que, a partir da fila no pátio de recepção, os lotes são movimentados aos viradores de vagões ou às moegas pela mesma linha férrea, denominada pera ferroviária pela semelhança entre seu formato e a fruta de mesmo nome.

Na operação de minério de ferro, ilustra-se a existência de dois viradores de vagões (VV 1 e 2), que possuem acesso aos dois pátios, 1 e 2. As empilhadeiras e recuperadoras são associadas, duas a duas, às partições, A, B e C de cada pátio, sendo que as partições A e C de ambos os pátios são acessadas por um único conjunto de equipamentos e a partição B de ambos os pátios pode ser acessada por dois conjuntos de equipamentos (1/2 ou 3/4). A figura mostra também os carregadores de navios (CN 1 e 2) associados aos pátios 1 e 2 e berços 1 e 2 de atracação. Neste sistema ilustrativo, todos os equipamentos são conectados aos dois pátios.

Figura 17 - Representação de um terminal portuário

Fonte: o autor

Na operação de grãos alimentícios, são apresentadas duas moegas, 1 e 2, para descarga dos lotes, as quais possuem rotas de acesso aos três silos, 1 a 3, de armazenagem dos grãos. As linhas e setas da imagem representam as rotas de acesso entre os equipamentos e silos. Da mesma maneira, existe no sistema ilustrado uma linha de acesso entre os silos e o carregador de navios CN 3, que está localizado no berço 3. A presença de um berço a menos para os grãos deve-se à premissa adotada de que a demanda total dos grãos é menor que a do minério de ferro no terminal estudado.

Os equipamentos de empilhamento e recuperação foram representados separadamente, mas na realidade, pode-se utilizar empilhadeiras-recuperadoras (ER), que unem as duas funções em um único equipamento. Contudo, estes equipamentos não serão considerados no estudo deste terminal e não terão, portanto, suas características e restrições detalhadas neste documento.

4.4. SUBSISTEMA DE CARREGAMENTO DE NAVIOS

A modelagem deste subsistema se inicia com a chegada dos navios, que segue a ordem da lista gerada pela rotina em VBA descrita na seção 4.1. Um navio poderá sair da fila e seguir para atracação se houver um berço disponível que seja compatível com o tipo do navio e quantidade suficiente do produto em estoque para atender a totalidade de sua demanda, o que é uma premissa deste estudo, uma vez que é possível configurar um parâmetro que determina a porcentagem da carga que deve estar disponível no pátio para permitir a atracação de um navio. Além disso, existem restrições de maré, totalmente parametrizadas, que podem impedir a atracação de um navio.

Diferentemente da lógica de atendimento dos lotes ferroviários, o navio é retirado da fila de espera sem que ocorra a alocação dos equipamentos e pátio. Após a atracação no berço, o navio cumpre um tempo de pré-operação, que consiste na soma dos tempos de pequenos procedimentos, como posicionamento, amarração do navio no berço e outras verificações. Somente então é verificada a disponibilidade de uma rota viável de carregamento, isto é, um carregador de navios, uma recuperadora e um pátio que contenha o produto demandado pelo navio.

Em seguida, inicia-se a operação de carregamento do navio, cujo tempo depende das taxas de carregamento dos equipamentos, uma vez que aquele que tiver a menor

delas definirá a taxa da operação, atuando como restrição deste processo. Nesta etapa existe a possibilidade de realizar a dupla recuperação, que consiste em recuperar material de dois pátios simultaneamente. Isto só ocorre caso haja disponibilidade de equipamentos e pátios que sejam compatíveis entre si, ou seja, que haja linhas de carregamento entre eles. Não é possível que a dupla recuperação seja feita a partir do mesmo pátio, isto é, mesmo que haja duas recuperadoras com acesso ao mesmo pátio e volume de produto disponível, esta operação não pode ocorrer devido a restrições físicas que impedem a ação de dois equipamentos em um mesmo pátio.

Além disso, há a possibilidade de utilização de um segundo carregador de navio, que diferentemente da dupla recuperação, não consiste em carregar o navio com dois equipamentos simultaneamente, mas sim em manter um segundo carregador disponível para continuar a operação de carregamento. Isto pode ocorrer quando o volume que será transferido ao navio for proveniente de dois pátios diferentes, devido à indisponibilidade da quantidade total necessária em um único pátio. A presença do segundo carregador reduz o tempo total de operação, pois evita a movimentação do primeiro carregador para recebimento do material recuperado do segundo pátio.

Após o término do carregamento, os equipamentos e o pátio são liberados e o navio cumpre um tempo de pós-operação, que é semelhante à pré-operação, para então iniciar a manobra de desatracação. Neste momento é verificada a condição da maré para que o navio possa acessar o canal de saída do porto. Somente ao final destes procedimentos o berço é liberado, permitindo que o próximo navio saia da fila e inicie sua manobra de atracação.

De acordo com a descrição deste subsistema, seus principais parâmetros identificados são:

- Demanda de cada produto (t/ano);
- Tipos de navios que podem atender à demanda de cada produto;
- Capacidades mínima e máxima de cada tipo de navio (t);
- Duração das janelas de maré;
- Tempo das manobras de atracação e desatracação;
- Tempos de pré e pós-operação;
- Associação entre carregadores de navios e berços e produtos;

- Associação entre berços de atracação e pátios de estocagem;
- Porcentagem mínima de carga disponível para que um navio atraque;
- Possibilidade de realizar dupla recuperação quando possível;
- Possibilidade de utilizar segundo carregador de navio quando possível;
- Taxa de redução do tempo de carregamento em caso de utilização do segundo carregador;

O fluxograma que representa a sequência de operações do processamento de um navio é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Processamento de um navio

Fonte: o autor

4.5. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Após a descrição do sistema estudado, apresenta-se nesta seção a delimitação ou escopo do trabalho, no qual são explicitados os aspectos e características do sistema real que serão ou não abrangidos por este estudo.

Assim, sob o aspecto operacional das cadeias produtivas do minério de ferro e dos grãos alimentícios, a delimitação das análises do estudo proposto, ilustrada na Figura 19, compreende a recepção de trens no subsistema de descarga ferroviária, as operações nos pátios de estocagem e o atendimento dos navios nos berços de atracação.

A modelagem do subsistema ferroviário inicia-se com a chegada de trens carregados com diferentes tipos e quantidades de produtos, sendo que a totalidade das etapas anteriores ao terminal, tais como carregamento dos vagões nas minas e o deslocamento até o terminal portuário, não foram representadas, pois não fazem parte do escopo do estudo.

Figura 19 - Delimitação do estudo

Fonte: o autor

De maneira semelhante, a operação dos navios foi representada somente a partir dos ancoradouros no sentido da atracação, isto é, o detalhamento da travessia do canal de acesso não está inserido no escopo do trabalho. A modelagem das operações deste subsistema, assim como no ferroviário, inicia-se com a chegada de navios de diferentes tamanhos, com demandas por diferentes tipos de produtos. A partir deste ponto, os navios passam pelas operações intermediárias (atracação, pré-operação, carregamento e pós-operação) até que, na desatracação, o navio libere o berço e realize a saída do terminal pelo mesmo canal de acesso.

Ainda, as relações com os agentes externos às operações portuárias, tais como sindicatos, alfândegas, autoridades portuárias etc. não estão inclusos no escopo deste estudo, que tem como foco apenas as operações dos subsistemas de descarga de trens, armazenamento de produtos e carregamento de navios, bem como as interações entre eles.

A delimitação apresentada justifica-se com base no objetivo do estudo proposto, que consiste em analisar o desempenho do terminal sob diferentes regras de priorização no atendimento dos trens. Assim, não houve necessidade de modelar as operações prévias à chegada dos trens e navios ao terminal, nem posteriores à sua saída, uma vez que não impactam diretamente os processos que fazem parte do escopo delimitado.

Ainda, é importante ressaltar que, sendo o caráter deste estudo puramente acadêmico, não foram analisados aspectos financeiros relacionados às operações do terminal portuário. Qualquer análise realizada ou conclusão obtida baseou-se apenas na comparação de indicadores operacionais.

5. MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem computacional, que segundo os autores Medina e Chwif (2014) representa a etapa de implementação do projeto, é resultado de um processo de conversão do modelo conceitual por meio da utilização de alguma linguagem de simulação ou *software* especializado, como o SIMUL8, utilizado neste trabalho. O objetivo desta seção é, portanto, apresentar o modelo computacional desenvolvido e sua interface de configuração em *Excel*, os quais representam a maneira como o modelo conceitual foi traduzido para um ambiente virtual.

5.1. MODELO COMPUTACIONAL

O SIMUL8, *software* no qual foi desenvolvido o modelo para este trabalho, segundo Chwif et al. (2015), foi desenvolvido na década de 90, na Universidade de *Strathclyde*, na Escócia. Inicialmente, sua finalidade era educacional, sendo utilizado apenas para o ensino da simulação, porém, devido ao seu sucesso como ferramenta de ensino, a comercialização como ferramenta profissional para projetos de simulação teve início e atualmente é um dos *softwares* do segmento com maior número de licenças vendidas no mundo, devido, de acordo com os autores, ao preço de venda vantajoso e facilidade de utilização. Inclusive, estes motivos foram os que motivaram a escolha do SIMUL8 para este estudo.

O desenvolvimento de um modelo no SIMUL8 utiliza cinco blocos básicos de construção, exemplificados em um modelo simples na Figura 20, criado apenas para o facilitar o entendimento da função de cada um.

Estes blocos básicos são:

- a) **Start Point:** o qual tem a função de gerar entidades para o modelo, as quais podem ser navios, trens, carros, caminhões, pessoas, animais, etc. Em suma, qualquer elemento que seja movimentado ao longo do processo e que não seja um recurso do sistema. As configurações deste bloco incluem os tipos e as quantidades de entidades a serem geradas, a distribuição de probabilidade e os parâmetros que regem os tempos entre as gerações e restrições como roteamento das entidades, gerações em lotes, dentre outras.

Figura 20 - Elementos básicos do SIMUL8

Fonte: o autor

- b) Queue:** representa uma fila que pode ser inserida entre as atividades do modelo e funciona como um estoque intermediário no qual as entidades que completam uma tarefa ou atividade aguardam a disponibilidade para iniciarem a tarefa subsequente. Dependendo do sistema, pode não haver fila entre atividades, implicando que a liberação de uma atividade só ocorra quando a seguinte seja liberada. As configurações básicas são: capacidade máxima, tempo de prateleira, tempo mínimo que uma entidade deve aguardar em fila, priorização de entidades e quantidade em fila no início da simulação.
- c) Activity:** que representa um processo pelo qual as entidades passam, cumprem um tempo e podem ter suas características alteradas. As possíveis configurações destes blocos são muitas, sendo que as principais são o tempo de processo, representado por distribuições de probabilidade e seus parâmetros, quantidade de atividades iguais em paralelo, alterações nos atributos das entidades e restrições de entrada e saída da atividade.
- d) Resource:** são recursos disponíveis em um sistema, podendo representar máquinas, equipamentos, funcionários ou qualquer outro elemento que seja alocado às atividades para que o processamento possa ocorrer. É possível determinar os tipos e quantidades de recursos existentes, bem como alocá-los às atividades. No caso deste estudo os recursos são empilhadeiras, recuperadoras, viradores de vagões, moegas, carregadores de navios e berços de atracação.

- e) **End Point:** representa o fim do percurso de uma entidade, pois quando estas chegam neste bloco, são removidas do modelo de simulação. Os *end points* são de grande utilidade para o registro de entidades atendidas para o cálculo de diversas estatísticas relacionadas ao processo simulado.

No entanto, mesmo com a utilização destes blocos básicos de construção, a representação adequada e confiável de um sistema complexo como um terminal portuário é muito difícil de ser alcançada apenas com as definições básicas disponíveis no *software*. Para contornar esta dificuldade, é possível desenvolver configurações personalizadas por meio de uma linguagem de programação utilizada pelo SIMUL8, denominada *Visual Logic*. Com este recurso, as possibilidades tornam-se infinitas, uma vez que, pela manipulação de variáveis globais de controle e atributos associados à cada entidade, o usuário é capaz de implementar lógicas complexas para representar detalhadamente as operações do sistema real.

O modelo desenvolvido neste trabalho será apresentado a seguir em etapas, pois a visualização do modelo completo em apenas uma imagem dificulta o entendimento das partes, devido ao seu tamanho. Serão apresentadas visualizações apenas dos subsistemas de descarga de trens e carregamento de navios, uma vez que o subsistema de armazenamento não é visível, pois consiste apenas no controle do balanço de massa dos produtos e da alocação dos recursos disponíveis, sendo assim, integralmente gerenciado pelas rotinas de programação, por meio de variáveis e planilhas internas do *software*.

O modelo desenvolvido é totalmente parametrizado, isto é, construído de modo que os principais parâmetros sejam alterados posteriormente com facilidade. Por este motivo, pode-se identificar diversas atividades e recursos em paralelo, o que não significa que todos sejam utilizados ou existam no sistema real, mas sim que há a possibilidade de se utilizar todos eles simultaneamente em cenários operacionais alternativos.

Na Figura 21, estão apresentadas as modelagens da geração de entidades, que segue a programação definida na interface, bem como da recepção dos lotes ferroviários e dos navios, que compreendem desde a chegada das entidades até o momento em que os equipamentos (berços ou viradores/moegas e empilhadeiras) são alocados aos mesmos. Apesar de parecer uma composição simples, existem diversas

lógicas de programação complexas inseridas nos blocos apresentados, as quais têm a função de controlar estas etapas, garantindo que todas as restrições de cada subsistema sejam obedecidas antes que as entidades sejam transferidas às respectivas etapas subsequentes.

Figura 21 - Modelagem da recepção ferroviária e marítima

Fonte: o autor

Em seguida, pode-se observar na Figura 22 as operações referentes à descarga dos lotes em viradores de vagões e moegas, desde o momento em que os equipamentos são alocados aos lotes até o momento em que são liberados para atender os próximos da fila. Considera-se na modelagem também os tempos de manobra dos trens.

Figura 22 - Modelagem da descarga de lotes ferroviários

Fonte: o autor

Neste momento são alocados fisicamente os recursos que representam os equipamentos de descarga e são cumpridos os tempos das operações, calculados com base na produtividade dos equipamentos (t/h) e no tamanho dos lotes (t), respeitando a restrição do equipamento com a menor taxa produtiva, isto é, o tempo da operação é definido pela menor produtividade entre a empilhadeira e o equipamento de descarga alocado. Após o término da descarga, os recursos são liberados e os trens seguem para o *end point* do subsistema.

Em algumas etapas importantes, como a chegada de um lote, o instante em que ele segue para o virador/moega e o início e término da descarga, por exemplo, são registrados os tempos decorridos desde o início da simulação, para que se possa obter, ao fim da rodada, uma linha do tempo de cada entidade e calcular estatísticas importantes, como tempo médio de descarga, ocupação dos equipamentos, tempos em fila, dentre outras, com base nestes valores.

A modelagem do atendimento dos navios é apresentada em duas partes, sendo que primeira, ilustrada na Figura 23, se inicia na chegada do navio aos berços, passando pelo canal de acesso (modelado apenas como um tempo de travessia) até a alocação de equipamentos (carregador de navio, recuperadora e pátio).

Figura 23 - Modelagem do atendimento dos navios (parte 1)

Fonte: o autor

A segunda parte, ilustrada na Figura 24, compreende desde as operações de carregamento, até a saída do navio pelo canal. São consideradas também as restrições de maré e os tempos de atracação, desatracação, pré e pós-operação dos navios.

Figura 24 - Modelagem do atendimento dos navios (parte 2)

Fonte: o autor

O tempo da operação de carregamento dos navios, assim como na descarga de trens, é restringido pelo equipamento com menor produtividade entre o carregador de navios e a recuperadora. No caso de dupla recuperação, compara-se a soma das taxas das recuperadoras com a do carregador de navios. O tempo de simulação em algumas etapas do processo também são registrados para o cálculo posterior de estatísticas relevantes, como ocupação dos berços, carregadores e recuperadoras, tempos médios de fila, tempos médios de operação, etc.

Por fim, vale ressaltar que o modelo funciona de maneira integrada, com todos os subsistemas apresentados funcionando e interagindo simultaneamente entre si, o que confere grande complexidade ao modelo.

5.1.1. Validação e verificação

De acordo com Chwif e Medina (2014), a realização dos processos de validação e verificação é imprescindível para que se obtenha sucesso em um projeto de simulação e apesar da similaridade fonética entre as palavras, conceitualmente os termos são totalmente distintos. Segundo os autores, a validação está relacionada ao modelo conceitual e busca averiguar se o modelo correto está sendo desenvolvido, enquanto a verificação relaciona-se ao modelo computacional e busca confirmar se o modelo está sendo desenvolvido corretamente.

Sargent (2010) apresenta os conceitos de validação e verificação de modelos a partir de um diagrama simplificado do processo de modelagem, traduzido e apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Processo de modelagem simplificado

Fonte: traduzido e adaptado de Sargent (2010)

Para ele, a validação do modelo conceitual pode ser definida como a determinação de que as teorias e premissas adotadas estão corretas e que a representação do sistema estudado é razoável para o objetivo do modelo. Já a verificação do modelo computacional consiste em garantir que a programação e implementação do modelo conceitual estejam corretas.

Chwif e Medina (2014) afirmam que a validação de modelos de sistemas ainda inoperantes ou inexistentes, pode ser problemática devido à ausência de dados históricos do sistema real. Contudo, a validação do modelo desenvolvido neste trabalho foi possibilitada por meio da aplicação de técnicas apresentadas pelos autores, descritas a seguir:

- a) **comparação com modelos anteriores:** apesar da impossibilidade de se utilizar o histórico de chegadas de navios e trens de outros terminais, conforme mencionado no item 4.1, as semelhanças entre os fluxos operacionais de diferentes terminais permitem a utilização de dados de modelos de outros sistemas, desenvolvidos em estudos realizados previamente, para auxiliar na validação do presente modelo;
- b) **análise de sensibilidade:** aplicada para testar a robustez do modelo, consiste em analisar a influência de pequenas alterações em parâmetros de

entrada nos resultados obtidos a partir do modelo, como por exemplo dobrar a demanda total e observar se o balanço de massa do terminal é mantido ou reduzir pela metade a taxa de operação dos viradores e observar se houve aumento na fila de trens e redução no nível de serviço. A experiência do pesquisador com a modelagem de sistemas portuários facilita a identificação de possíveis comportamentos anormais do modelo;

- c) **validação “face a face”**: é a técnica em que o desenvolvedor do modelo discute aspectos da modelagem com alguém que realmente entende do processo que está sendo simulado, a fim de aprimorar a confiabilidade do modelo em representar adequadamente a realidade.

Ainda segundo os mesmos autores, a verificação de modelos de simulação pode ser compreendida como a remoção de *bugs* ou falhas inesperadas do modelo computacional. A seguir são apresentados os procedimentos utilizados neste trabalho:

- a) **valores constantes ou simplificados vs. cálculos manuais**: consiste na utilização de dados de entrada cujos resultados podem ser facilmente calculados manualmente, para comparar com os valores obtidos pelo modelo. A discrepância entre os valores calculados e observados pode indicar a existência de um erro na programação do modelo;
- b) **utilização do depurador**: o depurador ou *debugger* é um recurso presente no software de simulação que permite a execução do modelo passo a passo, ou ainda, do código linha por linha e é extremamente útil para acompanhar em tempo real os eventos que ocorrem e os valores assumidos pelas variáveis do modelo.

Assim, considerando as afirmações dos autores de que não é possível validar perfeitamente um modelo ou garantir que seu código esteja completamente livre de falhas, mas sim aumentar a confiança de que ele represente o sistema de maneira satisfatória, conclui-se que o modelo desenvolvido atende a estes requisitos e apresenta confiabilidade suficiente para se obter bons resultados.

5.2. INTERFACE DO MODELO

Devido à alta complexidade e ao grande número de elementos contidos no modelo computacional, a configuração manual dos parâmetros para cada experimento seria uma tarefa extremamente onerosa. Por isto, foi desenvolvida, em *Excel*, uma planilha para entrada de parâmetros, denominada interface do modelo, na qual além de definir os dados de entrada, são captados os resultados das rodadas, a partir dos quais calculam-se estatísticas que auxiliam na interpretação dos valores obtidos em cada cenário testado.

Antes de iniciar a descrição da interface, é necessário esclarecer algumas características, a fim de auxiliar sua interpretação. Primeiramente, muitos dos parâmetros apresentados serão binários, isto é, podem assumir os valores 0 ou 1 para representar estados de variáveis, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros binários

0	1
Não	Sim
Inativo	Ativo
Desligado	Ligado

Fonte: o autor

Além disso, em algumas abas são definidas distribuições de probabilidade, que são representadas por meio de um valor numérico. A relação entre estes valores e os tipos de distribuições utilizados pelo modelo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação entre valores e distribuições de probabilidade

Valor numérico	Distribuição de probabilidade
1	Normal
2	Normal Truncada
3	Exponencial
4	Exponencial Truncada
5	Erlang com k=2
6	Erlang com k=3
7	Uniforme
8	Triangular
9	Valor determinístico

Fonte: o autor

As abas da interface serão apresentadas a seguir, assim como as configurações que podem ser realizadas em cada uma delas, sendo que os valores utilizados no preenchimento das células são apenas exemplos e não dados reais do sistema estudado. Todos os parâmetros necessários ao funcionamento do modelo são definidos nesta interface.

5.2.1. Aba “Parâmetros”

A configuração se inicia pela aba denominada “Parâmetros”, na qual algumas definições gerais podem ser feitas, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - Aba "Parâmetros" da interface

PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	
Parâmetro	Valor
% da carga que deve estar disponível para aceitar que uma embarcação atraque	100%
Considera regra de limite de dwt para travessia simultânea do canal?	0
Limite de dwt para travessia simultânea (a 2a embarcação deve ter dwt <)	100000
Conta linhas Gera Navio - PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO	299
Conta linhas Gera Trem - PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO	3317
Número de Produtos no Cenário - PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO	6
Liga Dupla Recuperadora	1
Liga Duplo CN	1
Caso CN Duplo ligado, % de melhoria da taxa	10

Fonte: o autor

As configurações desta aba são explicadas a seguir:

- a) **% da carga que deve estar disponível para aceitar que uma embarcação atraque:** diz respeito à uma restrição a ser considerada no momento de liberação do navio para sair do canal e acessar o píer. Caso o valor seja 100%, por exemplo, a embarcação somente atracará quando houver a totalidade da carga em estoque necessária para atendê-la;
- b) **considera regra de limite de DWT para travessia simultânea do canal:** define se há uma restrição a respeito do valor máximo de DWT que os navios podem ter para realizar a travessia simultânea do canal, isto é, permitir que um navio esteja entrando enquanto outro esteja saindo;

- c) **limite de DWT para travessia simultânea:** caso a configuração anterior seja ativada, este campo é utilizado para definir o valor máximo de DWT para travessia simultânea do canal;
- d) **liga dupla recuperadora:** define se o modelo deverá verificar a possibilidade de se alocar a segunda recuperadora para aumentar a produtividade no atendimento dos navios, conforme descrito anteriormente, na seção 3.2.4 deste documento;
- e) **liga duplo CN:** define se o modelo deverá verificar a possibilidade de se alocar o segundo carregador de navios, também para aumentar a produtividade no atendimento dos navios;
- f) **caso CN duplo ligado, % de melhoria da taxa:** conforme explicado na seção 4.4, caso a oportunidade do duplo carregador de navios esteja ativa, a taxa de carregamento não é dobrada como na dupla recuperação, mas há um ganho percentual na taxa de carregamento, o qual deve ser definido neste campo da interface.

As demais linhas ilustradas na Figura 26, que não foram detalhadas nas alíneas, não constituem parâmetros a serem definidos pelo usuário, mas sim contagens de navios e trens gerados, bem como a quantidade de produtos no cenário configurado. Estes campos são preenchidos automaticamente pelas rotinas da interface.

5.2.2. Aba “Pátios”

Em seguida, apresenta-se a aba “Pátios”, na qual são configurados, para cada baliza, parâmetros como o pátio ao qual pertence, estoque inicial, capacidade máxima, produto alocado, status (ativa ou inativa) e código (nomenclatura), conforme ilustrado na Figura 27.

Os silos de grãos também são configurados nesta aba, alocando-se uma “partição” para cada produto que poderá ser armazenado em um determinado silo e associá-las a este silo. Neste caso, a soma das capacidades máximas destas “partições” deve ser equivalente à capacidade total do silo.

Portanto, a interpretação do exemplo apresentado é a seguinte: para minérios, são definidas 12 partições, denominadas “Minérios 1”, “Minérios 2” ou “Minérios 3”,

pertencentes a 3 diferentes pátios, sendo a capacidade máxima de cada uma, 11.000 toneladas (t) e o estoque inicial, 5.500 t. Os produtos alocados são 1, 2 ou 3 e todas as partições estão em operação (status igual a 1). Para os grãos, existem 3 “partições” ativas, que representam os 3 produtos que podem ser alocados ao silo 4. A capacidade total deste silo é de 45.000 t, sendo 15.000 t para cada um dos produtos 4, 5 e 6, e o estoque inicial de cada produto é 7.500 t.

Figura 27 - Configuração da aba “Pátios”

PÁTIOS						
#	Código da Partição	Pátio/Silo a que pertence	Capacidade Máxima (t)	Estoque Inicial (t)	Produto Alocado	Status Inicial
1	Minérios 1	1	11000	5500	1	1
2	Minérios 1	1	11000	5500	1	1
3	Minérios 1	1	11000	5500	1	1
4	Minérios 1	1	11000	5500	1	1
5	Minérios 2	2	11000	5500	2	1
6	Minérios 2	2	11000	5500	2	1
7	Minérios 2	2	11000	5500	2	1
8	Minérios 2	2	11000	5500	2	1
9	Minérios 3	3	11000	5500	3	1
10	Minérios 3	3	11000	5500	3	1
11	Minérios 3	3	11000	5500	3	1
12	Minérios 3	3	11000	5500	3	1
13	Grãos 1	4	15000	7500	4	1
14	Grãos 1	4	15000	7500	5	1
15	Grãos 1	4	15000	7500	6	1

Fonte: o autor

5.2.3. Abas “Demanda”, “Sazonalidade” e “Frota”

A definição das demandas anuais dos produtos é complexa e divide-se em três abas: demanda, sazonalidade e frota.

Primeiramente, na aba “Demanda”, o usuário deve configurar a demanda total anual de minérios e grãos, uma vez que o restante das células é preenchido automaticamente a partir de parâmetros ajustados nas outras duas abas mencionadas. Além disso, para facilitar o estudo de diferentes cenários operacionais, é possível definir perfis alternativos de sazonalidade para os grãos e de frotas de navios para todos os produtos. Estes também devem ser selecionados na aba “Demanda”, cujos valores serão afetados pela configuração selecionada.

Para os minérios, a demanda é anual, visto que não há sazonalidade para estes produtos. Por isso, observa-se, na Figura 28, que para os produtos 1, 2 e 3, os dias do ano em que os mesmos são movimentados iniciam-se em 0 e terminam em 365, indicando que a demanda referente a aquele produto deverá ser distribuída ao longo do ano todo pela rotina que gera as listas de navios e trens. No exemplo apresentado, deve-se interpretar que a demanda anual para o minério 1 é de 21 milhões de toneladas por ano (MTPA), para o minério 2 é de 6 MTPA e para o minério 3, de 3 MTPA.

Para os grãos, a demanda é configurada mensalmente, devido à característica sazonal destes produtos. No exemplo, observa-se que nenhum dos grãos é movimentado em janeiro (dias 1 a 31 do ano), os grãos 1 e 2 são movimentados em fevereiro (dias 32 a 59 do ano) e a operação do grão 3 inicia-se em março (dias 60 a 90 do ano).

A configuração da sazonalidade dos grãos é definida pela porcentagem de distribuição da demanda destes produtos ao longo dos meses, sendo que três diferentes perfis podem ser configurados nesta aba. A seleção do tipo de sazonalidade na aba “Demanda” aplica estes valores de referência à demanda total dos grãos, preenchendo a quantidade em toneladas a ser movimentada em cada mês.

Figura 28 - Configuração da aba “Demanda”

SAZONALIDADE e FROTA:			1	1	Demanda total de minérios					Demanda total de grãos	
					30.000.000					5.000.000	
					Produto 1	Produto 2	Produto 3	Produto 4	Produto 5	Produto 6	
Descrição			Total	Minério 1	Minério 2	Minério 3	Grão 1	Grão 2	Grão 3		
TOTAL GERAL			35.066.667	21.000.000	6.000.000	3.000.000	3.000.000	1.333.333	733.333		
Dia inicial	Dia final	Demanda (t)	30.000.000	21.000.000	6.000.000	3.000.000	0	0	0		
0	365	carga 1	21.000.000	21.000.000							
0	365	carga 2	6.000.000		6.000.000						
0	365	carga 3	3.000.000			3.000.000					
1	31	carga 4	0				0				
1	31	carga 5	0					0			
1	31	carga 6	0							0	
Dia inicial	Dia final	Demanda (t)	716.667	0	0	0	450.000	200.000	66.667		
32	59	carga 1	150.000				150.000				
32	59	carga 2	66.667					66.667			
32	59	carga 3	0							0	
60	90	carga 4	300.000				300.000				
60	90	carga 5	133.333					133.333			
60	90	carga 6	66.667							66.667	

Fonte: o autor

O preenchimento destes valores é baseado na configuração das abas “Sazonalidade” (Figura 29) e “Frota” (Figura 31)

Figura 29 - Definições de perfis de sazonalidade para os grãos

ALTERNATIVAS DE SAZONALIDADE ADOTADAS PARA GRÃOS					ALTERNATIVA ESCOLHIDA	2
PRODUTO	MÊS	SAZONALIDADE 1	SAZONALIDADE 2	SAZONALIDADE 3	SAZONALIDADE ATUAL	
Grão 1	JAN	0.0%	0.0%		0.0%	
	FEV	5.0%	5.0%		5.0%	
	MAR	10.0%	10.0%		10.0%	
	ABR	15.0%	15.0%		15.0%	
	MAI	22.5%	17.5%		17.5%	
	JUN	22.5%	17.5%		17.5%	
	JUL	15.0%	15.0%		15.0%	
	AGO	10.0%	10.0%		10.0%	
	SET	0.0%	5.0%		5.0%	
	OUT	0.0%	5.0%		5.0%	
	NOV	0.0%	0.0%		0.0%	
	DEZ	0.0%	0.0%		0.0%	

Fonte: o autor

A definição do DWT mínimo e máximo de cada tipo de navio deve ser configurado também na aba “Demandas”, para informar à rotina que gera os navios a quantidade mínima e máxima que pode ser associada à cada embarcação, conforme a Figura 30.

Figura 30 - Definição de DWT dos tipos de navios

	HandyMax	Panamax	Small Cape	Cape	Large Cape	VLOC	Valemax
DWT Min (t)	35,000	60,000	80,000	110,000	140,000	150,000	320,000
DWT Max (t)	50,000	80,000	110,000	140,000	170,000	320,000	400,000

Fonte: o autor

Por fim, na aba “Frota”, ilustrada na Figura 31, são configurados perfis de frotas de navios que atenderão à demanda de cada produto, isto é, a porcentagem da demanda que será atendida por cada tipo de navio. É possível configurar diferentes perfis para serem selecionados na aba “Demandas”.

Figura 31 - Configuração da aba “Frota”

ALTERNATIVAS DE FROTA ADOTADAS PARA GRÃOS				ALTERNATIVA ESCOLHIDA	1
Grão 1	ANO	Atual	1	2	3
	HandyMax	0%	0%		
	Panamax	20%	20%		
	Small Cape	70%	70%		
	Cape	10%	10%		
	Large Cape	0%	0%		
	VLOC	0%	0%		
	Valemax	0%	0%		
ALTERNATIVAS DE FROTA ADOTADAS PARA MINÉRIOS				ALTERNATIVA ESCOLHIDA	1
Minério 1	ANO	Atual	1	2	3
	HandyMax	0.0%	0.0%		
	Panamax	0.0%	0.0%		
	Small Cape	20.0%	20.0%		
	Cape	50.0%	50.0%		
	Large Cape	30.0%	30.0%		
	VLOC	0.0%	0.0%		
	Valemax	0.0%	0.0%		

Fonte: o autor

5.2.4. Aba “Demanda Trens”

Em seguida, na aba “Demanda Trens”, são configurados parâmetros relacionados aos lotes ferroviários e trens, tais como capacidade dos vagões, número de lotes por trem, número de vagões por lote, antecedência mínima de chegada dos lotes em relação aos navios e número máximo de lotes que podem ser expedidos por dia, conforme demonstrado na Figura 32. É possível inserir configurações diferentes para cada tipo de produto.

Figura 32 - Configuração dos trens na aba “Demanda Trens”

DEMANDA DOS TRENS	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Produto 4	Produto 5	Produto 6
Dados Iniciais	Minério 1	Minério 2	Minério 3	Grão 1	Grão 2	Grão 3
Capacidade do vagão (t)	104	102	102	93	93	93
Tamanho do lote (vagões)	110	110	110	80	80	80
Antecedência chegada lotes (dias)	2	2	2	2	2	2
Capacidade do lote (t)	11440	11220	11220	7440	7440	7440
Número máximo de lotes expedidos por dia	100	100	100	100	100	100
Número lotes por trem	3	3	3	2	2	2
Capacidade do trem (t)	34320	33660	33660	14880	14880	14880

Fonte: o autor

Ainda, na mesma aba, são configurados os tempos de manobra ferroviária para acessar cada um dos equipamentos de descarga. Conforme ilustrado na Figura 33, define-se uma distribuição de probabilidade, bem como o parâmetro principal e o coeficiente de variação que a caracterizam.

Figura 33 - Configuração dos tempos de manobra ferroviária.

DISTRIBUIÇÃO TEMPO DE MANOBRA FERROVIÁRIA (horas)	Distribuição	Parâmetro (h)	Coef. Variação
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 1	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 2	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 3	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 4	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 5	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 6	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 7	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 8	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 9	9	0,25	0.3
Tempo (h) de manobra para o VV/Moega 10	9	0,25	0.3

Fonte: o autor

5.2.5. Aba “Tempos Navios”

Nesta aba são configurados os tempos de atracação, manobra de saída, pré-operação e pós-operação dos navios. As configurações são feitas para cada berço individualmente e definidas, também, por distribuições de probabilidade com parâmetro principal e coeficiente de variação. Na Figura 34, observa-se a região da planilha referente aos tempos de atracação e manobra de saída.

Figura 34 - Definição dos tempos de manobra de atracação e saída

TEMPOS DE ATRACAÇÃO E MANOBRA DE SAÍDA						
Berço	Atracação (h)	Coeficiente de Variação	Distribuição	Manobra de Saída (h)	Coeficiente de Variação	Distribuição
1	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
2	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
3	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
4	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
5	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
6	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
7	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
8	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
9	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8
10	2.30	0.30	8	0.10	0.30	8

Fonte: o autor

Os ajustes relativos aos tempos de pré e pós-operação dos navios seguem o mesmo padrão, conforme a Figura 35.

Figura 35 - Definição dos tempos de pré e pós-operação

TEMPOS DE PRÉ E PÓS OPERAÇÃO						
Píeres	Pré-operação (h)	Coeficiente de Variação	Distribuição	Pós-operação (h)	Coeficiente de Variação	Distribuição
Berço 1	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 2	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 3	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 4	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 5	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 6	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 7	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 8	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 9	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8
Berço 10	1.00	0.30	8	0.40	0.30	8

Fonte: o autor

5.2.6. Aba “Operacional”

A última aba de configuração dos dados de entrada do modelo é de grande importância, pois nela são definidas as quantidades de equipamentos disponíveis, bem como as associações entre os mesmos e pátios, berços e produtos.

Primeiramente, são configurados o status dos pátios, isto é, se eles podem ou não ser utilizados pelo modelo e as associações destes pátios com os equipamentos de descarga, sendo que o valor “1” significa que existe associação e “0” que não existe. Para melhor visualização, as células com valor “0” foram formatadas com preenchimento total branco, conforme a Figura 36.

Figura 36 - Status de pátios e associações com equipamentos de descarga

STATUS DOS PÁTIOS E ASSOCIAÇÃO COM VIRADORES/MOEGAS				
Pátio	Status	Virador/Moega 1	Virador/Moega 2	Virador/Moega 3
1	1	1	1	
2	1	1	1	
3	1	1	1	
4	1			1

Fonte: o autor

No exemplo apresentado, a interpretação correta é de que todos os pátios estão ativos e existem associações dos pátios 1, 2 e 3 com os equipamentos de descarga 1 e 2, bem como do pátio 4 com o equipamento 3.

Em seguida, são configurados os equipamentos de empilhamento, os quais possuem uma configuração a mais, que é o tipo do equipamento, utilizado para determinar as taxas operacionais, em toneladas/hora, de cada equipamento para movimentar cada produto.

A correta interpretação do exemplo apresentado na Figura 37 é de que existem 4 equipamentos de empilhamento, sendo que os 3 primeiros estão associados aos pátios 1, 2 e 3, enquanto o último está associado ao quarto pátio. Todos são do tipo 3, o que significa que as taxas operacionais para os produtos 1, 2 e 3 será de 5400 toneladas por hora (t/h) e para os produtos 4, 5 e 6 será de 2000 t/h.

Figura 37 - Configurações gerais de equipamentos de empilhamento

STATUS, TIPOS E ASSOCIAÇÕES ENTRE EQUIPAMENTOS DE EMPILHAMENTO E PÁTIOS						
Equipamento	Status	Tipo	Pátio 1	Pátio 2	Pátio 3	Pátio 4
1	1	3	1	1	1	
2	1	3	1	1	1	
3	1	3	1	1	1	
4	1	3				1

TAXAS OPERACIONAIS EM TONELADAS/HORA PARA CADA TIPO DE EQUIPAMENTO						
Tipo	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Produto 4	Produto 5	Produto 6
1	2700	2700	2700	675	675	675
2	4050	4050	4050	1012.5	1012.5	1012.5
3	5400	5400	5400	2000	2000	2000

Fonte: o autor

Vale ressaltar que as definições para equipamentos de recuperação são iguais aos de empilhamento, portanto, com o objetivo de evitar a repetitividade desnecessária, o exemplo apresentado tem a função de mostrar as configurações dos dois tipos de equipamentos.

As configurações relativas aos carregadores de navios seguem o mesmo padrão, porém as associações são feitas com berços, ao invés de pátios, conforme Figura 38.

Figura 38 - Configurações gerais de carregadores de navios

STATUS E ASSOCIAÇÃO ENTRE CN's E BERÇOS				
Carregador de Navios	Status	Tipo	Berço 1	Berço 2
1	1	3	1	
2	1	5	1	
3	1	3		1
4	1	5		1

TAXAS OPERACIONAIS EM TONELADAS/HORA PARA CADA TIPO DE CN						
Tipo CN	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Produto 4	Produto 5	Produto 6
1	8100	8100	8100	900	900	900
2	10800	10800	10800	1350	1350	1350
3	0	0	0	3600	3600	3600

Fonte: o autor

Seguindo o mesmo padrão de configuração, devem ser definidos também os status dos berços, bem como as associações dos mesmos com pátios e produtos. A associação entre carregadores de navios (CN) e produtos também deve ser feita, assim como a definição dos tipos de viradores e as correspondentes taxas operacionais para cada tipo de produto.

5.2.7. Aba “Estatísticas”

As abas apresentadas anteriormente referem-se às configurações dos dados de entrada do modelo. No entanto, a interface possui também a função de coletar resultados do modelo, sendo que nela são registradas informações sobre cada navio e trem processado pelo modelo no período simulado. Estes registros de informações, denominados *logs*, são gerados pelo SIMUL8, sendo atualizados cada vez que uma entidade passa pelo *End Point* de seu ciclo operacional, isto é, quando um trem é descarregado e deixa o terminal ou quando um navio é carregado e segue para a saída do canal. Um exemplo destes registros pode ser observado na Figura 39.

Figura 39 - Exemplo de registro da saída de navios/trens

SIMUL8 Flow File Versi		1017		Carregar Navios													
ID	Time	label_c	label_c	label_i	label_pro	label_lotePr	label_r	label_l	label_r	label_l	label_r	label_l	label_r	label_l	label_r	label_i	label_i
1	3612.7	1	191234	1.39	3	191234	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2001.6
2	4691.1	1	162782	2.03	3	162782	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	619.2
3	5051.5	1	159927	1.6	1	159927	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	302.4
4	6491.3	1	384462	2.25	2	384462	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	316.8
5	7213.2	1	230576	2.85	1	230576	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	864
6	7933.2	1	225771	3.26	2	225771	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	590.4
7	8651.4	1	166441	3.4	1	166441	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	72
8	9080.3	1	170839	3.35	2	170839	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	129.6
9	9730.1	1	195133	3.69	2	195133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	417.6
10	11172	1	246014	4.13	3	246014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0
11	11893	1	194730	4.66	1	194730	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	763.2
12	12972	1	163055	5.21	1	163055	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	792
13	12978	1	388550	4.13	1	388550	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	633.6
14	14413	1	249330	6.36	1	249330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1656
15	14815	1	159090	8.82	1	159090	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	2289.6
16	15132	1	158216	7.02	1	158216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	950.4
17	15851	1	89026	7.23	1	89026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	302.4
18	15923	1	171543	9.76	2	171543	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	1353.6
19	17330	1	235962	9.87	1	235962	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	57.6
20	18013	1	384939	9.83	1	384939	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	100.8
21	18371	1	188886	10.03	1	188886	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	230.4
22	19135	1	156892	12.44	1	156892	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	2606.4
23	19811	1	163737	10.63	1	163737	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	864

Fonte: o autor

Porém, a visualização dos resultados por meio dos *logs* não é simples, pois sua longa extensão e grande quantidade de dados podem dificultar a interpretação dos indicadores obtidos. Assim, criou-se uma aba denominada “Estatísticas”, que apresenta os resultados desejados pelo usuário de maneira clara e organizada, conforme demonstrado na Figura 40.

Figura 40 - Trecho da aba “Estatísticas”

Navios Movimentados previstos		314
Navios Movimentados		311
Minérios	Previsto	221
	Movimentado	219
Grãos	Previsto	93
	Movimentado	92
Navios movimentados por tipo de produto		
Produto 1	Previsto	144
	Movimentado	144
Produto 2	Previsto	44
	Movimentado	43
Produto 3	Previsto	24
	Movimentado	23
Produto 4	Previsto	54
	Movimentado	54
Produto 5	Previsto	34
	Movimentado	34
Produto 6	Previsto	14
	Movimentado	13

Fonte: o autor

O trecho apresentado diz respeito ao número de navios atendidos em relação ao valor previsto, porém, existem diversas outras informações nesta aba, como: número de trens e quantidade de carga movimentada em relação ao valor previsto, ocupação dos equipamentos e tempo em fila dos navios e trens.

Todos os indicadores presentes nesta aba são calculados a partir dos valores registrados nos *logs* de navios e trens.

6. EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO

Em consonância com a metodologia apresentada anteriormente, proposta por Chwif e Medina (2014), a experimentação se insere na etapa de análise de um projeto de simulação, quando são feitas rodadas do modelo a fim de se obter resultados e realizar as análises pertinentes ao estudo.

Neste capítulo são apresentados os dados de entrada utilizados na configuração do modelo e os cenários de experimentação elaborados para testar a influência das diferentes regras de priorização de lotes ferroviários no subsistema de descarga.

6.1. DADOS DE ENTRADA

Chwif e Medina (2014) afirmam que a modelagem dos dados de entrada é uma das etapas mais importantes no desenvolvimento de um estudo de simulação e definem este processo como sendo a obtenção de modelos probabilísticos que possibilitem a inferência de propriedades das variáveis que apresentam aleatoriedade em um sistema.

Esta definição é baseada no conceito de que a maioria dos sistemas que se busca simular são regidos por um fenômeno aleatório, isto é, podem ter os valores de suas variáveis previstos a partir da observação dos valores assumidos previamente pelas mesmas variáveis. No contexto de um terminal portuário, por exemplo, o tempo de atendimento de um vagão em um virador pode ser simulado por meio de uma distribuição de probabilidade que considera não só o valor médio, mas também o comportamento desta variável, que está sujeita a aleatoriedades existentes no sistema real.

No caso do sistema estudado neste trabalho, os dados históricos são inexistentes, o que impossibilita a modelagem dos dados de entrada por meio de observação direta. Com isto, a definição dos dados a serem utilizados no estudo foi realizada por meio da combinação de duas abordagens: (1) reuniões com colaboradores da empresa proprietária do empreendimento e (2) o aproveitamento de informações relativas a terminais portuários considerados como *benchmarks* do projeto, como o TMPM e o Porto de Tubarão, controlados pela empresa Vale e apresentados anteriormente na revisão bibliográfica.

A primeira abordagem foi relevante para a determinação dos seguintes dados: nível de demanda para cada produto, tipos de navios de minérios e grãos que serão atendidos no terminal, capacidade dos lotes ferroviários que abastecerão os estoques, padrões de sazonalidade de cada grão alimentício e quantidades de equipamentos de descarga, estocagem e carregamento disponíveis, bem como o modelo de cada um, possibilitando a obtenção das taxas nominais de operação, definidas pelos fabricantes das máquinas.

A segunda abordagem possibilitou a definição destes parâmetros, baseados em valores praticados por terminais considerados como referência: tempos de pré, pós-operação, atracação e desatracação dos navios, tempo de manobra ferroviária e disponibilidade dos equipamentos do terminal, considerando paradas operacionais e manutenções preventivas, o que permite a aplicação de um fator de ajuste nas taxas nominais para se obter as taxas efetivas, que refletem com maior precisão a realidade das operações portuárias. Na Tabela 6 são apresentados alguns dados de entrada.

Tabela 6 - Resumo dos dados de entrada

Subsistema	Parâmetro	Valor para Minérios	Valor para Grãos
Descarga	Quantidade de equipamentos de descarga	3	3
	Tempo médio de manobra ferroviária (h)	0.25	0.25
	Taxa efetiva do equipamento de descarga (t/h)	5400	2000
	Capacidade média do vagão (t)	104	93
	Tamanho do lote (vagões/lote)	110	80
	Capacidade do lote (t)	11440	7440
Armazenamento	Quantidade de empilhadeiras	3	3
	Quantidade de recuperadoras	3	3
	Taxa efetiva das empilhadeiras (t/h)	5400	2000
	Taxa efetiva das recuperadoras (t/h)	5400	3200
Carregamento	Quantidade de berços de atracação	2	2
	Quantidade de carregadores de navios	2	2
	Taxa efetiva dos carregadores de navios (t/h)	10800	3600
	Tempo médio de pré-operação (h)	1	1
	Tempo médio de pós-operação (h)	0.4	0.4
	Tempo médio de atracação (h)	2.5	2.5
	Tempo médio de desatracação (h)	0.1	0.1

Fonte: o autor

Vale ressaltar que apesar de existirem 2 berços de atracação para cada tipo de produto, conforme informado na Tabela 6, não são realizadas operações simultâneas

de carregamento nos dois, isto é, a presença de um segundo berço tem a função de adiantar as etapas de atracação e pré-operação do próximo navio a ser carregado enquanto no outro berço um navio está sendo carregado. Com isto, é possível aumentar a utilização dos carregadores de navios, à medida que ao terminar uma operação, o próximo navio já está posicionado no outro berço aguardando o carregamento.

A empresa proprietária do terminal prevê, desconsiderando a possibilidade de expansão da infraestrutura e da quantidade de máquinas, um aumento gradativo da capacidade do terminal, variando entre 30 e 85 MTPA para minérios e 15 e 22.5 MTPA para grãos. Além disso, as proporções entre os tipos de navios que representarão as demandas devem variar com estes aumentos de capacidade, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de demanda e tipos de navios

Demanda Total (MTPA)	Demanda por Produto (MTPA)	Fração da demanda atendida por tipo de navio						
		Panamax	Small Cape	Cape	Large Cape	VLOC	ValeMax	
45	Sinter	21.0	-	20%	50%	30%	-	-
	Pellet	6.0	-	20%	50%	30%	-	-
	Granulado	3.0	-	20%	50%	30%	-	-
	Soja	9.0	20%	70%	10%	-	-	-
	Farelo de Soja	4.0	20%	70%	10%	-	-	-
	Milho	2.0	50%	50%	-	-	-	-
87.5	Sinter	45.5	-	14%	44%	23%	13%	-
	Pellet	13.0	-	14%	44%	23%	13%	-
	Granulado	6.5	-	14%	44%	23%	13%	-
	Soja	13.5	12%	62%	26%	-	-	-
	Farelo de Soja	6.0	12%	62%	26%	-	-	-
	Milho	3.0	42%	42%	16%	-	-	-
102.5	Sinter	56.0	-	9%	40%	19%	19%	13%
	Pellet	16.0	-	9%	40%	19%	19%	13%
	Granulado	8.0	-	9%	40%	19%	19%	13%
	Soja	13.5	12%	62%	26%	-	-	-
	Farelo de Soja	6.0	12%	62%	26%	-	-	-
	Milho	3.0	42%	42%	16%	-	-	-
107.5	Sinter	59.5	-	4%	33%	13%	25%	25%
	Pellet	17.0	-	4%	33%	13%	25%	25%
	Granulado	8.5	-	4%	33%	13%	25%	25%
	Soja	13.5	20%	70%	10%	-	-	-
	Farelo de Soja	6.0	20%	70%	10%	-	-	-
	Milho	3.0	50%	50%	-	-	-	-

Fonte: o autor

Cabe ressaltar que a partir deste ponto adota-se a nomenclatura de produtos 1, 2 e 3 para os minérios Sinter, Pellet e Granulado, respectivamente e 4, 5 e 6 para os grãos Soja, Farelo de Soja e Milho, respectivamente, com o intuito de simplificar a reportagem dos resultados e conclusões obtidos.

Por fim, para concluir a apresentação dos dados de entrada, é necessário definir a sazonalidade dos grãos ao longo do ano, uma vez que a disponibilidade destes produtos é afetada por condições climáticas, períodos de safra e pragas nas plantações. Por isto, as demandas por estes produtos não são igualmente distribuídas igualmente entre os meses do ano. Na Tabela 8 pode-se observar os valores considerados para a sazonalidade, baseados no Boletim de Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos (CONAB, 2019).

Tabela 8 - Sazonalidade dos grãos

Mês	Soja e Farelo de Soja	Milho
Janeiro	0%	0%
Fevereiro	5%	0%
Março	10%	0%
Abril	15%	0%
Maio	18%	0%
Junho	18%	0%
Julho	15%	0%
Agosto	10%	10%
Setembro	5%	20%
Outubro	5%	25%
Novembro	0%	25%
Dezembro	0%	20%

Fonte: CONAB (2019)

6.2. CENÁRIOS

Conforme descrito anteriormente, Robinson (2014) afirma que na fase de experimentação testam-se diversos cenários com o intuito de se entender ou propor melhorias ao sistema real. Este processo pode ser caracterizado como uma análise *what-if*, na qual são feitas alterações em determinados parâmetros para se obter resultados e extrair conclusões a respeito do comportamento do sistema.

No caso do estudo realizado neste trabalho, desejou-se analisar a utilização de diferentes regras de priorização de lotes ferroviários no subsistema de descarga, isto é, implementá-las no modelo computacional e analisar os resultados obtidos com cada uma. Para isto, foram considerados três cenários diferentes, que diferem entre si apenas pela lógica de seleção dos lotes ferroviários em fila, mantendo os outros parâmetros operacionais inalterados. Os cenários a serem testados são:

- 1) **FIFO (*First In First Out*)**: seleciona-se os lotes ferroviários de acordo com a ordem crescente de chegada ao terminal;
- 2) **maior atraso em relação ao navio**: prioriza-se o lote ferroviário que possui o maior atraso em relação ao seu prazo para descarga (chegada do navio correspondente ao lote). Caso não haja nenhum lote em atraso, prioriza-se aquela com a menor folga até a chegada do navio correspondente;
- 3) **menor razão de produto em estoque**: prioriza-se o lote carregado com o produto cuja razão entre a quantidade em estoque e a capacidade total de armazenamento é a menor. É uma regra que busca equilibrar os estoques dos produtos nos pátios e silos de armazenagem.

Dentre as regras de despacho apresentadas na Tabela 2, na seção 3.3.2 deste documento, a seleção daquelas a serem testadas foi feita com os seguintes critérios: (1) a regra *earliest release date* (ERD) no contexto da seleção de lotes ferroviários teria o mesmo efeito que a FIFO, uma vez que a premissa de que todos os lotes em fila podem ser acessados, o momento de liberação é igual ao instante de chegada do lote; (2) considerando que o prazo para o término de uma tarefa (*due date*) é a chegada do navio de referência do lote, as disciplinas *shortest slack*, *earliest due date* e *critical ratio* teriam o mesmo efeito e foram representadas pela regra “maior atraso em relação ao navio”; (3) as regras *work in next queue* e *shortest processing time* não são adequadas à análise deste estudo, visto que a primeira considera a fila do próximo estágio, o que não acontece pois todos os equipamentos e rotas são alocados com antecedência e a segunda prioriza o menor tempo de processamento, que neste caso depende apenas da quantidade de carga presente nos lotes, o que seria uma clara priorização aos grãos alimentícios, visto que seus lotes têm menor capacidade que os de minério.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio de rodadas do modelo de simulação, testando a aplicação das regras de despacho descritas na seção anterior em cada um dos patamares de demanda previstos. Em seguida, é feita uma discussão acerca da interpretação destes resultados e da possibilidade de se considerar uma disciplina de priorização adicional, desenvolvida após a análise destas rodadas iniciais.

Por meio de marcadores temporais inseridos no modelo, os quais registram o instante em que diversos eventos acontecem, tais como chegada da entidade ao terminal, entrada e saída da fila e início e término de processamento, são calculados diversos indicadores que fornecem embasamento para as análises dos cenários, sendo que os principais deles são apresentados na Figura 41.

A observação destes resultados permite a compreensão acerca do comportamento do sistema quando submetido à diferentes níveis de demanda e regras de priorização no atendimento dos lotes. O nível de serviço, calculado pela razão entre a demanda prevista e a atendida, permanece alto em todos os cenários, variando entre 99.6% e 99.9%, o que indica que a capacidade do sistema é suficiente para atender à demanda. No entanto, os tempos médios em fila dos navios de grãos apresentam alta sensibilidade ao crescimento da demanda, uma vez que aumentaram expressivamente do primeiro para o segundo nível considerado. Este comportamento pode ser explicado pelas taxas menores de carregamento e recuperação de grãos e pela sazonalidade destes produtos, refletida em picos de chegadas de navios em alguns meses, contribuindo para o aumento do valor médio anual da fila.

As ocupações de berços de atracação, carregadores de navios, empilhadeiras, recuperadoras e equipamentos de descarga, calculadas pela divisão do tempo total efetivo de operação (sem considerar quebras e manutenções programadas) pelo tempo total disponível no ano, revelam alta sensibilidade à variação de demanda, principalmente para os componentes do subsistema de carregamento, que atingem níveis de ocupação maiores que 80% no cenário de 107.5 MTPA. Contudo, a oscilação destes indicadores em relação às regras de despacho é baixa, uma vez que estas afetam a escolha do lote a ser atendido prioritariamente, mas não a cadência entre o processamento de dois trens consecutivos.

Figura 41 - Resultados dos cenários

Demanda Total (MTPA)		45.0			87.5			102.5			107.5		
Regra de Priorização		FIFO	Atraso	Estoque	FIFO	Atraso	Estoque	FIFO	Atraso	Estoque	FIFO	Atraso	Estoque
Carga total prevista para carregamento (Mt)		45.00	45.00	45.00	87.50	87.50	87.50	102.50	102.50	102.50	102.50	102.50	102.50
Carga total carregada nos navios (Mt)		44.90	44.90	44.81	87.21	87.37	87.21	102.38	102.50	102.11	102.17	102.17	102.17
Minérios	Prevista	30.00	30.00	30.00	65.00	65.00	65.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
	Carregada	30.00	30.00	29.90	64.61	64.77	64.61	79.88	80.00	79.61	79.67	79.67	79.67
Grãos	Prevista	15.00	15.00	15.00	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50
	Carregada	14.90	14.90	14.90	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50
Carga total prevista para descarga (Mt)		45.07	45.07	45.07	87.59	87.59	87.59	102.57	102.57	102.57	102.57	102.57	102.57
Carga total descarregada dos trens(Mt)		45.07	45.07	45.07	87.59	87.59	87.59	102.57	102.57	102.57	102.57	102.57	102.57
Minérios	Prevista	30.06	30.06	30.06	65.06	65.06	65.06	80.04	80.04	80.04	80.04	80.04	80.04
	Descarregada	30.06	30.06	30.06	65.06	65.06	65.06	80.04	80.04	80.04	80.04	80.04	80.04
Grãos	Prevista	15.01	15.01	15.01	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53
	Descarregada	15.01	15.01	15.01	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53	22.53
Tempo médio em fila dos navios(h)		5.86	5.84	5.86	198.30	195.37	200.09	204.63	207.09	203.58	217.58	230.31	203.55
Tempo médio em fila dos navios por produto (h)													
Produto	1	0.63	0.51	0.63	5.93	4.93	8.65	13.01	17.70	11.26	46.75	70.57	27.81
Produto	2	2.04	2.00	1.88	9.42	7.52	12.59	14.61	18.32	11.92	50.03	72.79	31.56
Produto	3	0.39	0.39	0.41	4.49	3.68	7.07	14.40	18.07	12.12	54.16	71.33	33.15
Produto	4	14.87	15.04	14.88	545.17	542.59	545.12	557.53	557.08	557.46	539.45	539.46	540.93
Produto	5	12.65	12.59	12.65	547.05	544.20	547.01	554.73	554.34	554.64	542.35	542.11	544.01
Produto	6	2.49	2.52	2.49	570.79	548.85	570.92	595.34	594.88	595.33	564.36	564.54	572.90
Tempo médio em fila dos trens(h)		0.87	0.88	0.88	2.52	2.88	2.62	3.90	4.25	3.85	3.97	4.91	4.36
Tempo médio em fila dos trens por produto (h)													
Produto	1	0.86	0.99	0.97	2.07	2.55	2.14	4.11	5.80	4.41	4.15	6.76	5.43
Produto	2	0.58	0.34	0.35	1.83	0.75	0.78	4.43	1.13	2.78	3.88	1.09	1.29
Produto	3	0.67	0.53	0.65	2.30	2.15	3.16	3.06	2.98	3.74	3.80	3.37	5.58
Produto	4	0.97	1.10	1.06	3.88	6.23	5.64	4.04	5.05	5.01	4.20	5.96	5.50
Produto	5	1.17	0.85	0.98	3.80	1.42	1.44	3.66	1.51	1.53	4.11	1.20	1.34
Produto	6	0.59	0.63	0.58	0.79	0.96	0.78	0.73	0.75	0.58	1.11	0.97	0.76
Ocupação total dos berços		35.8%	35.7%	35.5%	69.3%	68.5%	69.6%	75.5%	77.5%	75.4%	81.6%	82.6%	79.0%
Ocupação por tipo de produto													
Minérios		25.7%	25.4%	24.9%	59.9%	58.6%	60.6%	71.9%	75.8%	71.9%	84.2%	86.3%	78.6%
Grãos		45.7%	45.7%	45.7%	78.5%	78.1%	78.5%	78.8%	78.8%	78.6%	78.6%	78.6%	78.9%
Ocupação total dos CN		41.1%	41.1%	41.0%	71.3%	71.1%	71.5%	78.6%	78.8%	78.6%	80.2%	80.9%	80.6%
Ocupação por tipo de produto													
Minérios		28.9%	28.9%	28.7%	61.7%	61.6%	61.9%	76.0%	76.4%	76.3%	79.6%	81.0%	80.3%
Grãos		53.3%	53.4%	53.3%	81.0%	80.6%	81.0%	81.2%	81.2%	80.9%	80.7%	80.7%	80.9%
Ocupação total das empilhadeiras		24.9%	24.8%	24.9%	44.5%	44.5%	44.5%	49.8%	49.8%	49.8%	51.6%	51.5%	52.0%
Ocupação por tipo de produto													
Minérios		21.2%	21.2%	21.2%	45.9%	46.0%	45.9%	56.6%	56.6%	56.8%	60.3%	60.0%	60.9%
Grãos		28.6%	28.4%	28.5%	43.0%	43.1%	43.0%	42.9%	42.9%	42.9%	42.9%	42.9%	43.0%
Ocupação total das recuperadoras		23.0%	23.0%	22.9%	40.8%	40.7%	40.9%	45.6%	45.8%	45.6%	46.7%	47.2%	47.0%
Ocupação por tipo de produto													
Minérios		19.2%	19.2%	19.1%	41.1%	41.1%	41.3%	50.7%	50.9%	50.9%	53.1%	54.0%	53.5%
Grãos		26.7%	26.7%	26.7%	40.5%	40.3%	40.5%	40.6%	40.6%	40.4%	40.4%	40.3%	40.4%
Ocupação total dos Equipamentos de Descarga		27.1%	27.1%	27.1%	48.7%	48.8%	48.7%	54.6%	54.6%	54.7%	56.7%	56.5%	57.0%
Ocupação por tipo de equipamento													
VVs		23.8%	23.8%	23.8%	51.5%	51.6%	51.5%	63.4%	63.4%	63.6%	67.5%	67.3%	68.1%
Moegas		30.5%	30.4%	30.5%	45.9%	46.0%	45.9%	45.8%	45.8%	45.8%	45.8%	45.7%	45.9%

Fonte: o autor

Ainda, o comportamento dos tempos médios em fila dos trens, considerados como os indicadores mais relevantes para este estudo, revelou forte sensibilidade tanto em relação à demanda, quanto às regras de despacho. A oscilação causada pelo aumento de demanda é esperada, como consequência do aumento do número de

trens que chegam ao terminal e, conseqüentemente, da diminuição do espaçamento entre estas chegadas.

No entanto, a variação em relação às regras de despacho, que é o objeto de estudo deste trabalho, demonstrou que a regra FIFO resulta em menores tempos médios gerais, enquanto ao analisar os valores de fila para cada produto, é possível notar um padrão que se repete em todos os níveis de demanda: o desempenho dos produtos 1 e 4, que possuem as maiores demandas, é melhor (menor tempo médio em fila) com a regra FIFO, o dos produtos 2, 3 e 5, que possuem demanda inferior aos anteriores, é melhor com a regra de priorização do lote com maior atraso em relação ao navio e o do produto 6, cuja demanda é a menor entre todos, é melhor com a regra de despacho que elege o lote cujo produto possui a menor razão entre a quantidade em estoque e a capacidade máxima de estocagem.

Assim, após a observação deste padrão de comportamento, optou-se por realizar um estudo adicional, desenvolvendo uma regra de despacho híbrida, que considera a priorização mais adequada para cada produto com base nos resultados anteriores. Esta regra funciona de maneira hierárquica, verificando primeiro a classificação de prioridade dos lotes de acordo com a regra FIFO. Caso seja priorizado um lote do produto 1 ou 4, este é selecionado para descarga, se não, realiza-se uma nova classificação seguindo a regra de menor atraso e verifica-se se a prioridade é de algum lote dos produtos 2, 3 ou 5. Se confirmada esta condição, seleciona-se este lote, caso contrário, se houver algum lote do produto 6 aguardando em fila, este é então elegido para seguimento no processo de descarga.

Na Figura 42 são apresentados os resultados das rodadas com esta regra híbrida, juntamente às anteriores para facilitar a comparação entre elas. São exibidos apenas os valores referentes aos tempos médios em fila dos trens, uma vez que os demais indicadores não apresentaram flutuações significativas.

Figura 42 - Resultados com a regra híbrida

Demanda Total (MTPA)		45.0				87.5				102.5				107.5			
Regra de Priorização		FIFO	Atraso	Estoque	Híbrida	FIFO	Atraso	Estoque	Híbrida	FIFO	Atraso	Estoque	Híbrida	FIFO	Atraso	Estoque	Híbrida
Tempo médio em fila dos trens(h)		0.87	0.88	0.88	0.87	2.52	2.88	2.62	2.46	3.90	4.25	3.85	3.81	3.97	4.91	4.36	3.79
Produto	1	0.86	0.99	0.97	0.85	2.07	2.55	2.14	1.99	4.11	5.80	4.41	3.70	4.15	6.76	5.43	3.92
Produto	2	0.58	0.34	0.35	0.58	1.83	0.75	0.78	1.83	4.43	1.13	2.78	4.54	3.88	1.09	1.29	3.59
Produto	3	0.67	0.53	0.65	0.73	2.30	2.15	3.16	2.36	3.06	2.98	3.74	3.13	3.80	3.37	5.58	3.73
Produto	4	0.97	1.10	1.06	0.96	3.88	6.23	5.64	3.64	4.04	5.05	5.01	4.27	4.20	5.96	5.50	4.02
Produto	5	1.17	0.85	0.98	1.20	3.80	1.42	1.44	3.85	3.66	1.51	1.53	4.30	4.11	1.20	1.34	4.42
Produto	6	0.59	0.63	0.58	0.60	0.79	0.96	0.78	0.81	0.73	0.75	0.58	0.75	1.11	0.97	0.76	0.78

Fonte: o autor

É possível notar que a regra híbrida resulta em menores tempos médios de fila para todos os cenários de demanda, inclusive a diferença entre seu resultado e o melhor obtido com as outras regras aumenta com a demanda. No cenário de 45 MTPA por exemplo, nota-se que os tempos de fila são pouco sensíveis às regras de despacho, visto que mesmo a regra híbrida apresenta um tempo médio igual ao da regra FIFO (0.87 horas). Já no cenário de maior demanda, a diferença entre o tempo médio obtido com a regra híbrida (3.79 horas) e com a FIFO (3.97 horas) é de 0.18 horas e representa uma redução de 5% no tempo médio geral das filas de trem, o que em um sistema de alto fluxo de materiais e com necessidade de se obter maior eficiência operacional, representa uma melhoria significativa no atendimento dos lotes ferroviários. Se comparada com as regras de maior atraso e menor estoque, a híbrida apresenta reduções no tempo médio de fila ainda mais expressivas, de 23% e 13% respectivamente, para o cenário de 107.5 MTPA.

Ademais, uma análise dos tempos de fila para cada produto indica que a redução obtida nos tempos médios resulta de um *trade off* entre a melhoria dos produtos com maiores e menores demandas. Por exemplo, observa-se que a regra híbrida favorece os produtos 1 e 4, que são os mais demandados, à medida que apresenta os menores tempos de fila entre todas as regras, enquanto para os produtos 2, 3, 5 e 6 os tempos resultantes do uso da regra híbrida estão em uma faixa entre o melhor e menor tempo obtido com as outras regras. Contudo, este favorecimento dos produtos 1 e 4 pode ser vantajoso, uma vez que representam 70% e 60% da demanda de suas categorias, respectivamente e somados, aproximadamente dois terços da demanda total do terminal.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A simulação computacional mostrou-se uma ferramenta adequada para a condução do estudo proposto, uma vez que possibilita a visualização de um sistema real em um ambiente virtual, no qual se pode implementar e analisar diferentes cenários com o intuito de facilitar o processo de tomada de decisões. O uso da ferramenta pode representar um diferencial competitivo para o mercado, à medida que permite conduzir as análises a um baixo custo e de maneira totalmente virtual, sem interferir nas operações reais do sistema.

O sistema modelado consiste em um terminal de exportação de minérios de ferro e grãos alimentícios, como soja e milho, sendo que os produtos chegam pelo modal ferroviário e são armazenados em pátios de estocagem ou silos para, posteriormente, serem carregados em navios e transportados para diversos clientes. O subsistema de descarga dos trens foi o foco deste estudo, mas o terminal foi modelado em sua totalidade, pois os seus subsistemas são intimamente conectados e interdependentes.

A modelagem do terminal possibilitou o cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho, uma vez que serviu como instrumento de teste para as diferentes regras de priorização no atendimento dos lotes no subsistema de descarga ferroviária. Além disso, o terminal portuário estudado está em fase de projeto e é, portanto, inexistente, o que torna o uso da simulação ainda mais necessário, uma vez que não é possível conduzir análises *in loco*.

Três regras de priorização foram testadas inicialmente: FIFO, lote com menor atraso em relação à chegada do navio de referência e lote com menor quantidade em estoque em relação à capacidade máxima de estocagem. A análise dos resultados obtidos mostrou que não há uma única regra que proporcione o melhor desempenho para produtos com diferentes níveis de demanda, mas que existe um padrão de relações entre cada produto e a regra que proporciona o melhor desempenho para ele. Assim, foi proposta uma análise adicional, considerando uma regra híbrida, que avalia as três regras iniciais em uma mesma rodada do modelo, alternando entre elas de acordo com o produto de maior prioridade.

A aplicação desta regra resultou em menores tempos médios de fila dos trens para todos os níveis de demanda considerados. No entanto, ao analisar o desempenho de

cada produto, observou-se um *trade off* entre a melhoria dos produtos 1 e 4 e dos demais, sendo que os primeiros são favorecidos pela regra híbrida desenvolvida.

Assim, recomenda-se, para o terminal estudado, a implementação de uma regra híbrida de despacho dos lotes ferroviários, assumindo a premissa de que a priorização de produtos com maiores níveis de demanda é uma prática viável e adequada para o terminal. Caso esta implementação não seja viável, sugere-se a implementação da regra *FIFO*, que resultou, em todos os cenários, nos menores tempos médios em fila dos trens, o que a torna vantajosa em relação às demais. Vale ressaltar que na regra *FIFO* também ocorre um *trade off* entre o tempo de fila dos produtos com maiores e menores demandas.

Por fim, o modelo computacional desenvolvido apresenta flexibilidade para se realizar não só análises semelhantes à deste trabalho, mas também em outros subsistemas e com diferentes objetivos de pesquisa. Isto é possível devido ao alto nível de detalhamento das operações inserido no modelo, o que o torna genérico o suficiente para ser alterado para representar outros terminais portuários. As análises conduzidas mostraram que as regras de priorização de lotes ferroviários podem impactar significativamente o desempenho do terminal, principalmente em relação aos tempos de espera em fila dos trens, ressaltando a importância de se realizar um estudo prévio ao início das operações em um terminal portuário.

Como recomendações para trabalhos futuros, são ressaltados os seguintes tópicos:

- a)** condução de análises relacionadas ao subsistema de armazenamento, como verificação da capacidade do terminal em função da área disponível para estocagem, alocação dinâmica das partições, programação de empilhadeiras e recuperadoras, dentre outros.
- b)** estudo do impacto de outras variáveis do subsistema de descarga no desempenho do terminal, como antecedência da chegada dos trens, tempo de manobra e tempo de operação no virador de vagões.
- c)** estudar o processo de chegada de trens utilizando a modelagem analítica, buscando otimizar a programação dos trens previamente à chegada ao terminal. Pode-se utilizar o modelo de simulação para implementar as programações obtidas e avaliá-las.

REFERÊNCIAS

- BABU, S. A. I.; PRATAP, S.; LAHOTI, G.; FERNANDES, K. J.; TIWARI, M. K.; MOUNT, M.; XIONG, Y. Minimizing delay of ships in bulk terminals by simultaneous ship scheduling, stockyard planning and train scheduling. **Maritime Economics & Logistics**, v. 17, n. 4, p. 464-492, 2015.
- BANKS, J. **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. John Wiley & Sons, 1998.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BERTSEKAS, D. P.; TSITSIKLIS, J. N. **Introduction to Probability**. Athena Scientific: Belmont, MA, 2008.
- CAMARGO, P.V. **Análise de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas através de uma abordagem integrada simulação-otimização**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- CAMELO, G. R.; COELHO, A. S.; BORGES, R. M.; SOUZA, R. M. Teoria das filas e da simulação aplicada ao embarque de minério de ferro e manganês no terminal marítimo de ponta da madeira. **Cadernos do IME-Série Estatística**, v. 29, n. 2, p. 1, 2010.
- CARNEIRO, F. M. **Simulação do Circuito de Minério do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira (TFPM)**. 2008. Monografia (Pós-Graduação). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. São Paulo: Ed. Dos Autores, 2014
- CHWIF, L.; MEDINA, A.; VIEIRA, D. R.; PÉRCORA JR, J. E.; PEREIRA, W. I. **Introdução ao SIMUL8: Um Guia Prático**. São Paulo: Ed. dos Autores, 2015.
- CODESP - COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mensário Estatístico - Outubro/2019**. Disponível em: <<https://www.portodesantos.com.br/relacoes-com-o-mercado/estatisticas/>>. Acesso em: 02 set. 2019
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos, décimo segundo levantamento**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 04 mar. 2020.
- CONWAY, R. W.; MAXWELL, W. L.; MILLER, L. W. **Theory of scheduling**. Courier Corporation, 2003.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

- FONTELLES, M. J.; SIMÕES, M. G.; FARIAS, S. H.; FONTELLES, R. G. S. Metodologia da pesquisa científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. **Revista Paraense de Medicina**, v. 23, n. 3, p. 1-8, 2009.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. 200 p. São Paulo: Atlas, 2010.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.
- GUALDA, N. D. F. **Terminais de transportes: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional**. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo, 1995.
- GUO, P; WANG, L; XUE, C; WANG, Y. Dispatching Rules for Scheduling Twin Automated Gantry Cranes in an Automated Railroad Container Terminal. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 45, n. 3, p. 2205-2217, 2020.
- GUPTA, A. K.; SIVAKUMAR, A. I. Job shop scheduling techniques in semiconductor manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 11-12, p. 1163-1169, 2006.
- HILDEBRANDT, T.; HEGER, J.; SCHOLZ-REITER, B. Towards improved dispatching rules for complex shop floor scenarios: a genetic programming approach. **Proceedings of the 12th annual conference on Genetic and evolutionary computation**. p. 257-264. ACM, 2010.
- KABAN, A. K.; OTHMAN, Z.; ROHMAH, D. S. Comparison of dispatching rules in job-shop scheduling problem using simulation: a case study. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 11, n. 3, p. 129-140, 2012.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LIU, C. I.; IOANNOU, P. A. A comparison of different AGV dispatching rules in an automated container terminal. **Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems**. p. 880-885. IEEE, 2002.
- MARICHELVAM, M. K.; PRABAHARAN, T.; YANG, X. Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan. **Applied Soft Computing**, v. 19, p. 93-101, 2014.
- MDIC - Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Série Histórica de Exportação Brasileira por Fator Agregado e Produtos**. Disponível em <<http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/series-historicas>>. Acesso em: 26 jan. 2020.
- MEIRELES, R. P. L. **Modelagem e simulação da malha ferroviária em circuito fechado da Estrada de Ferro Vitória a Minas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, 2010.

MOTA, D.O. **Modelagem da programação de navios para otimização no canal de acesso ao porto de Santos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

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

NETTO, J. F.; BOTTER, R. C.; MEDINA, A. C. Analysis of capacity associated to levels of service at port terminals using systemic approach and simulation of discrete events. **Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (WSC)**. p. 3426-3437. IEEE, 2015.

OEC - Observatory of Economic Complexity. **Minérios de ferro e seus concentrados, incluídas as pirites de ferro ustuladas (cinzas de pirites)**. Disponível em: < <https://oec.world/pt/profile/hs92/2601/> > Acesso em: 23 set. 2019.

PANWALKAR, S. S.; ISKANDER, W. A survey of scheduling rules. **Operations research**, v. 25, n. 1, p. 45-61, 1977.

PAPADIMITRIOU, C. H.; STEIGLITZ, K. **Combinatorial optimization: algorithms and complexity**. New York: Dover Publications, 1998.

PEREIRA, N. N.; NETTO, J. F.; BOTTER, R. C.; MEDINA, A. C. Port Planning: A Case Study Applied to Iron Ore Port Terminal. **Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering**, p. 1-13, 2017.

PIDD, M. **Tools for thinking—Modelling in management science**. West Sussex: John Wiley & Sons. 2003.

PINEDO, M. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. New York: Springer, 2012.

PONTES, H. L. J.; DO CARMO, B. B. T.; PORTO, A. J. V. Problemas logísticos na exportação brasileira da soja em grão. **Sistemas & Gestão**, v. 4, n. 2, p. 155-181, 2009.

RAJENDRAN, C.; HOLTHAUS, O. A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. **European journal of operational research**, v. 116, n. 1, p. 156-170, 1999.

ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model Development and Use**. New York: Palgrave Macmillan, 2014.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **In the Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC)**. p. 166-183 IEEE, 2010.

SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA F. P. **Métodos de pesquisa**. 1 ed. Cap. 2. 120 p. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Oilseed: World Markets and Trade**. Disponível em: <
<https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/tx31qh68h?locale=en>>. Acesso em: 02 nov. 2020.

VIANEN, T.; OTTJES, J.; LODEWIJKS, G. Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 42, p. 119-128, 2014.

VIANEN, T.; OTTJES, J.; LODEWIJKS, G. Simulation-based rescheduling of the stacker-reclaimer operation. **Journal of Computational Science**, v. 10, p. 149-154, 2015.

WIGHT, Oliver W. **Production and inventory management in the computer age**. Boston: CBI, 1974.

ZAMPIROLI, Joyce Milanez. **Alternativas para aumento de capacidade de um terminal portuário de minério de ferro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.