UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

FELIPE GEORGE GOMES PEREIRA

Modelo de otimização para gestão integrada de terminal portuário exportador de minério de ferro

São Paulo
2022

FELIPE GEORGE GOMES PEREIRA

Modelo de otimização para gestão integrada de terminal portuário exportador de minério de ferro

Versão Corrigida

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

Área de Concentração: Engenharia Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo

2022

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, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Pereira, Felipe George Gomes
Modelo de otimização para gestão integrada de terminal portuário exportador de minério de ferro / F. G. G. Pereira -- versão corr. -- São Paulo, 2022.
109 p.

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

1.Engenharia Portuária 2.Terminal de Granéis Sólidos 3.Gestão de Pátios de Minério 4.Modelo de Otimização 5.Minério de Ferro I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Nome: PEREIRA, Felipe George Gomes

Título: Modelo de otimização para gestão integrada de terminal portuário exportador de minério de ferro

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

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

À Deus e a minha família por todo incentivo e por sempre estar ao meu lado nessa conquista.

Aos professores Dr. Rui Carlos Botter e Dr. Leo Tadeu Robles pela orientação ao longo de uma década, que nos anos de convivência, muito me ensinaram, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Ao amigo Eduardo Pessotti Rangel pela atenção e apoio durante o processo de desenvolvimento deste estudo.

Ao amigo Giuliano Martins Santos por compartilhar experiências profissionais e incentivar a aplicação do estudo no terminal portuário apresentado neste trabalho.

Ao Prof. Celso Mitsuo Hino e ao Engenheiro José Pedro Gomes da Cruz pela contribuição na construção e desenvolvimento do modelo apresentado.

Ao Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

RESUMO

PEREIRA, F. G. G. **Modelo de otimização para gestão integrada de terminal portuário exportador de minério de ferro**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

O gerenciamento de um terminal portuário que exporta minério de ferro envolve muitas áreas e decisões estratégicas. Entre os problemas a serem resolvidos estão a alocação espacial dos produtos nos pátios de estocagem, a programação e cadência de chegada de trens e o sequenciamento de navios em berços, respeitando as prioridades e regras operacionais. A gestão e controle dos pátios de estocagem e das filas de trens e navios é um processo complexo e deve garantir que os produtos programados para o embarque dos navios estejam disponíveis, conforme planejamento das operações. A integração dos processos e otimização de decisões de planejamento é fundamental para obter uma operação eficiente e confiável. Esta pesquisa traz uma revisão bibliográfica dos métodos de otimização aplicadas ao tema, seguido da caracterização de um terminal portuário tipo, especializado na exportação de minério de ferro. Um estudo em um terminal de graneis sólidos foi realizado, a fim de identificar os principais processos operacionais e eventos que podem impactar a performance global. Em seguida um modelo de otimização foi proposto e desenvolvido para uma problemática integrada de gerenciamento diário dos pátios de estocagem, que considera as decisões de alocação de espaços e, as operações de descarga ferroviária e de carregamento de navios. Experimentos e testes foram conduzidos para validar o desempenho da abordagem e limitações da solução. Os resultados se mostram satisfatórios, no entanto, demostram dificuldade do modelo em resolver problemas complexos com dados reais dentro de um tempo de processamento definido. O produto desta pesquisa é um modelo sequencial, que resolve problemas reais e, fornece informações níveis estratégicos e táticos, a partir do sequenciamento da fila de navios e trens em conjunto, considerando a variação do estoque nos pátios e o fluxo de carregamento de navios como um dos dados de entrada do modelo, assim buscando minimizar custo com *Demurrage*.

Palavras-chave: Terminal portuário. Minério de ferro. Gestão de pátios. Otimização operacional.

.

ABSTRACT

PEREIRA, F. G. G. **Optimization model for integrated management of iron ore exporting port terminal**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

The management of a port terminal that exports iron ore involves many areas and strategic decisions. Among the problems to be solved are the spatial allocation of products in the storage yards, the scheduling and cadence of train arrivals and the sequencing of ships in berths, respecting priorities and operational rules. The management and control of the stockyards and the queues of trains and ships is a complex process and must ensure that the products scheduled for the shipment of the ships are available, according to the operations plan. The integration of processes and optimization of planning decisions is critical to achieving an efficient and reliable operation. This research brings a bibliographic review of the optimization methods applied to the theme, followed by the characterization of a typical port terminal, specialized in the export of iron ore. A study in a solid bulk terminal was carried out to identify the main operational processes and events that can impact global performance. An optimization model is developed and proposed for an integrated problem of daily management of storage yards, which considers space allocation decisions and, rail unloading and ship loading operations. Experiments and tests were conducted to validate the performance of the approach and limitations of the solution. The results are satisfactory, however, they demonstrate the difficulty of the model to solve complex problems with real data within a set processing time. The product of this research is a hierarchical model, which solves real problems and provides information at strategic and tactical levels, from the sequencing of the queue of ships and trains together, considering the stockyard variation and the flow of ship loading as one of the *input* data of the model, thus seeking to minimize cost with *Demurrage*.

Keywords: Port terminal. Iron ore. Stockyard management. Operational optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão do estudo como um processo 19
Figura 2 - Estrutura dos processos envolvidos em terminais especializados em minério 37
Figura 3 - Mapa de implantação do terminal 40
Figura 4 - Fluxo dos processos simplificado do minério de ferro 41
Figura 5 - Localização dos pátios de minério 42
Figura 6 - Estrutura de atracação 43
Figura 7 - Layout considerado no modelo 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das publicações identificadas por ano, fonte e tema 33
Tabela 2 - Quantidade de balizas programadas e realizadas 46
Tabela 3 - Destinos utilizados e lotes programados por navio 47
Tabela 4 - Quantidade de origens programadas e realizadas por navio 52
Tabela 5 - Equipamentos de movimentação de carga 54
Tabela 6 - Resumo dos cenários criados 86
Tabela 7 - Exemplo de cenário de navios 87
Tabela 8 - Exemplo de cenário de trens 88
Tabela 9 - Exemplo de cenário de pátio 89
Tabela 10 - Resultados dos cenários do modelo de sequenciamento de trem e navio 90
Tabela 11 - Resultados dos cenários do modelo dos pátios 90
Tabela 12 - Mapa do pátio no início do planejamento do cenário reduzida 1 91
Tabela 13 - Dados dos navios usados no cenário reduzido 1 92
Tabela 14 - Dados dos trens usados do cenário reduzido 1 92
Tabela 15 - Consolidação de programação de navios cenário reduzido 1 93
Tabela 16 - Consolidação da programação de trens cenário reduzido 1 94
Tabela 17 - Mapa do pátio no início do planejamento do cenário reduzido 2 95
Tabela 18 - Dados dos navios usados do cenário reduzido 2 95
Tabela 19 - Dados dos trens usados do cenário reduzido 2 96
Tabela 20 - Consolidação de programação de navios cenário reduzido 2 97
Tabela 21 - Consolidação da programação de trens cenário reduzido 2 98
Tabela 22 - Programação de navios do cenário reduzido 1 sem uso do modelo 100
Tabela 23 - Programação de navios do cenário reduzido 2 sem uso do modelo 101
Tabela 24 - Comparativo das soluções para o cenário reduzido 2 101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Países em que foram publicados trabalhos científicos 32
Gráfico 2 - Abordagens centrais das publicações 32
Gráfico 3 - Técnicas de heurística utilizadas nas publicações 34
Gráfico 4 - Grupos de paralisações do processo de descarga ferroviária 45
Gráfico 5 - Aderência à programação da descarga 48
Gráfico 6 - Aderência à programação % 48
Gráfico 7 - Impactos do processo de embarque 50
Gráfico 8 - Quantidade de origens por navio no ano 51
Gráfico 9 - Gráfico de Gannt da sequência de navios do cenário reduzido 1 92
Gráfico 10 - Gráfico de Gannt da sequência de navios cenário reduzido 2 96
Gráfico 11 - Gráfico de Gannt do cenário reduzido 1 sem uso do modelo 100
Gráfico 12 - Gráfico de Gannt do cenário reduzido 2 sem uso do modelo 101

LISTA DE SIGLAS

CN	Carregador de Navio
CCO	Centro de Controle Operacional
CIF	*Cost Insurance and Freigth*, é o tipo de contrato de transporte de carga em que o embarcador é responsável por todos os custos e riscos que envolvem o transporte da mercadoria até o destinatário.
ETA	Data estimada de chegada do navio no porto
US$	Dólar americano
EP	Empilhadeira
ER	Empilhadeira-Recuperadora
FIFO	*Firt In First Out*, regra na qual o primeiro navio a entrar na fila é o primeiro a ser atendido
FOB	*Free-on-Board ou* livre a bordo, é o tipo de contrato de transporte de carga que a responsabilidade do embarcador termina no despacho das mercadorias
TML	*Transportable Moisture Limit* é o limite de umidade transportável no navio
PP	Portos Públicos
PIB	Produto Interno Bruto
PCP	Programação e Controle da Produção
PL	Programação Linear
RC	Recuperadora
TUP	Terminal de Uso Privado
TC	Transportador de Correia
VV	Virador de Vagão

LISTA DE SÍMBOLOS

hs	Horas
m/min	Metros por minutos
min	Minutos
t	Toneladas
t/h	Toneladas por hora
t/dia	Toneladas por dia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 Motivação e Justificativa do Tema 16

1.2 Objetivos do Estudo 17

1.3 Metodologia 18

2 USO DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA GESTÃO DE PÁTIOS DE MINÉRIO 21

2.1 Modelagem de Otimização na Gestão Integrada de Portos 22

2.2 Desafios da Modelagem de Otimização na Gestão Integrada de Portos 27

2.3 Abordagens de Otimização para Gestão Integrada de Portos 29

2.4 A Otimização na Gestão de Pátios 31

3 TERMINAL PORTUÁRIO ESPECIALIZADO EM MINÉRIO 35

3.1 Sistemas de um Terminal Portuário 35

3.2 Operações Portuárias de Exportação de Minério 36

3.3 Principais Equipamentos Utilizados em Terminais de Minério de Ferro 38

4 ESTUDO APLICADO EM UM TERMINAL DE GRANÉIS SÓLIDOS 40

4.1 Acesso Ferroviário 41

4.2 Pátio de Estocagem 41

4.3 Estruturas Marítimas e Berços Operacionais 42

4.4 Movimentação de Carga no Terminal 43

4.5 Diagnóstico Operacional do Terminal 44

4.5.1. Impactos na Descarga de Trens 44

4.5.2. Aderência da Programação dos Pátios de Estocagem 47

4.5.3. Impactos no Carregamento de Navios 49

4.5.4. O Diagnóstico Operacional 52

4.6 O Gerenciamento de Pátio Integrado aos Processos Operacionais 53

4.6.1. Caracterização Inicial dos Processos 54

4.6.2. Lógica da Descarga Ferroviária 55

4.6.3. Lógica do Planejamento e Alocação dos Estoques 56

4.6.4. Lógica da Chegada e Saída de Navios 56

4.6.5. Lógica da Programação de Embarque 57

5 MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA GESTÃO INTEGRADA DE TERMINAL PORTUÁRIO 58

5.1 Modelo de Sequenciamento de Trens e Navios 58
5.2 Modelo de Otimização de Pátios 66
5.3 Hierarquia do Modelo 82
6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS 84
6.1 A Construção do Planejamento e Programação na Prática 84
6.2 Construção de Cenários para Análise do Modelo 85
6.2.1. Cenários de Navios 87
6.2.2. Cenários de Trens 88
6.2.3. Cenários de Pátios 88
6.2.4. Resultados do Conjunto de Cenários 89
6.3 Experimentação em Cenários Reduzidos 91
6.3.1. Cenário Reduzido 1 91
6.3.2. Cenário Reduzido 2 94
6.3.3. Resultados das Cenários Reduzidos Sem o Uso do Modelo 99
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 102
REFERÊNCIAS 107

1 INTRODUÇÃO

O território do Brasil apresenta diversidade geológica favorável à existência de jazidas de vários minerais e o país se destaca no cenário global em reservas e produção mineral. O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2018) aponta que o setor mineral brasileiro contribui para superávits balança comercial, sendo que em 2017 as exportações atingiram volume de mais de 403 milhões de *t* de minerais, em um valor de cerca de US$ FOB 28,3 bilhões, ou seja, 13% das exportações totais.

O setor mineral é um importante fornecedor de matéria-prima para a indústria nacional e representa 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, empregando cerca de 180 mil trabalhadores diretamente (IBRAM, 2018). Entre os produtos, destacam-se minério de ferro, ouro, ferronióbio, cobre, bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimentos, caulim e outros.

O minério de ferro é uma das principais *commodities* que o Brasil exporta com peso importante na pauta de exportações brasileiras. Em 2021 o minério de ferro teve destaque por ser o primeiro produto no ranking das exportações totais e da indústria extrativista do país, alcançando volume de 357.270.574 t, variação de 4,7% a mais em relação a 2020, e US$ 44.6 Bilhões, aumento de 73,2% em relação a 2020 (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2022).

Este estudo aborda as necessidades da gestão integrada no dia a dia de pátios de minério de ferro utilizados para a estocagem intermediária em terminais portuários marítimos de exportação, considerando as decisões relativas à alocação de espaço para essa estocagem e as operações de descarga ferroviária e de carregamento dos navios.

A eficiência de estocagem dos pátios resulta das decisões de alocação de espaços nos pátios (KIM, KOO e PARK, 2009) e corresponde à melhor utilização dos pátios, baixa perda de material e redução nos custos de transporte (TANG, SUN e LIU, 2015).

Nesse sentido, este estudo propõe um sistema de apoio à gestão de operações integradas para um terminal portuário de granéis sólidos, utilizando técnicas de otimização, modelagem matemática e simulação computacional, com o objetivo de contribuir para minimizar custos operacionais, maximizar a ocupação dos espaços e, assim, aumentar a eficiência global do terminal. Este modelo de otimização foi desenvolvido, bem como experimentos e testes foram conduzidos para se validar seu desempenho como solução e evoluir para a melhoria do modelo de operação.

1.1 Motivação e Justificativa do Tema

O estudo se baseou na prática de grandes empresas de mineração e siderúrgicas, que com demandas constantes de operação de grandes volumes de matérias-primas a granel, no caso, o minério de ferro. Diferentes eventos nas operações podem causar perdas de tempo operacional e à utilização ineficiente dos pátios de estocagem, inclusive, causadas por decisões não adequadas. Nesse sentido, entende-se que a alocação dos produtos nas áreas de estocagem é fator decisivo para o desempenho do sistema de movimentação operacional.

Por exemplo, em determinados momentos, a alocação das pilhas de produtos em determinada região nos pátios com volumes específicos se agrava por falta de espaço suficiente, por incompatibilidade de rota, por problemas de qualidade do produto, indisponibilidade de equipamentos, atrasos de trens e navios, entre outros. Assim, o modelo de otimização proposto incorpora as restrições do terminal, operacionais e não operacionais e auxilia na decisão de alocação dos produtos que chegam por trem no terminal.

Dessa forma o estudo aborda:

a) o gerenciamento inadequado dos pátios de estocagem, que não utiliza o potencial de sua capacidade por diversos fatores e, consequentemente, afeta o desempenho do terminal como um todo;
b) a dificuldade de alocação dos produtos nos pátios;
c) a perda de tempo efetivo operacional por eventos diversos;
d) e problemas na programação de atendimento dos trens no terminal por decisões inadequadas.

Em terminais portuários dedicados à exportação de minério de ferro, a função do pátio, como armazenagem intermediária é ter espaço para a alocação de produtos e servir de pulmão, compatibilizando e otimizando os fluxos de entrada e saída de produtos. Cada trem traz em sua composição um produto específico para ser estocado em determinada pilha, ou, mais raramente, para carregamento direto de um navio. Logicamente, esse trem pode trazer diversos tipos de produtos (*blending* de minério) que devem ser alocados em pilhas diferenciadas. Um conjunto de produtos descarregados formam a carga específica de determinado navio.

O minério transportado da mina ao terminal portuário, em geral, está associado à programação de carregamento em navios específicos. Uma vez alterada a programação da chegada e a formação e recuperação das pilhas, o terminal portuário terá que reprogramar seus

processos para atender a essa demanda, o que pode provocar paralisações do sistema logístico, inclusive, a falta de carga para determinado navio em fila ou falta de áreas para estocagem.

Este estudo visa auxiliar as decisões de alocação dos produtos e formação de pilhas nos pátios, de forma associada ao controle operacional integrado de pátio nos processos de descarga dos trens e carregamento dos navios.

Um terminal portuário de minério pode ter um ou mais pátios que possuem balizas, fração do espaço de um pátio, com capacidade de estocagem definida por tipos de produto. Este estudo propõe um modelo de solução da gestão de pátio de um terminal de minério de ferro, envolvendo programação e sequenciamento de trens e navios, abordando os seguintes níveis estratégicos:

a) o planejamento das operações a curto, médio e longo prazo, associado a tomadas de decisões e respostas mais rápidas, que possibilitem a redução de custos operacionais e de manutenção;
b) a redução de tempo dos eventos de paralisação intrínsecos às operações, que afetam negativamente a eficiência do terminal;
c) o aumento da capacidade de todo o terminal, possibilitando maiores volumes de minério exportados com investimento otimizado.

Realizou-se diagnóstico das operações do terminal com dados do ano 2019, sendo possível identificar os principais gargalos do sistema, além de evidenciar os eventos de maior ocorrência que paralisam as operações do terminal. Os dados foram fornecidos sob a condição de uso exclusivo para o estudo.

A contribuição associada está na busca de solução para o problema estudado, através do desenvolvimento de um modelo de otimização, que visa melhorar as decisões na gestão de pátio, assim como no controle e programação da produção para terminal portuário de características semelhantes, apoiados por um processo de análises combinatórias, avaliação e métodos matemáticos baseados em Programação Linear.

Como resultado, se espera apoiar gestores portuários na tomada de decisões operacionais, a níveis estratégicos, suportados por um modelo que otimiza a formação do estoque e o uso de recursos, respeitando as regras e restrições do terminal.

1.2 Objetivos do Estudo

O objetivo geral é desenvolver e testar um modelo de otimização da gestão de pátio de estocagem de minério em terminais portuários dedicados que recebem produtos por modal ferroviário, utilizam seus pátios para armazenagem intermediária e depois os exportam. Objetivos secundários:

a) realizar revisão bibliográfica que fundamente as bases para o desenvolvimento do estudo;
b) apresentar ao leitor o ambiente portuário especializado em minério;
c) identificar os principais gargalos e oportunidades de melhorias em terminal desse tipo;
d) desenvolver modelo de otimização para apoiar as decisões de gestão portuária;
e) detalhar os resultados e os benefícios potenciais.

O modelo de otimização proposto foi testado com auxílio de ferramentas computacionais e modelagem matemática com dados reais. Programações e cenários específicos foram avaliados para verificar a aderência do modelo.

1.3 Metodologia

A metodologia constitui o embasamento científico , que, geralmente, é definido na busca da melhor abordagem para atender os objetivos, verificar as proposições e testar hipóteses e validar resultados. O resultado é um trabalho estruturado, possível de aplicação e aperfeiçoamento por outros pesquisadores (CAUCHICK MIGUEL, 2012).

Este estudo utiliza abordagem quantitativa com análise de dados reais e estabelece variáveis mensurados. Cauchick Miguel (2012) afirma que esta abordagem é prática tradicional da ciência e que a o ato de mensurar variáveis é a característica mais relevante da abordagem quantitativa.

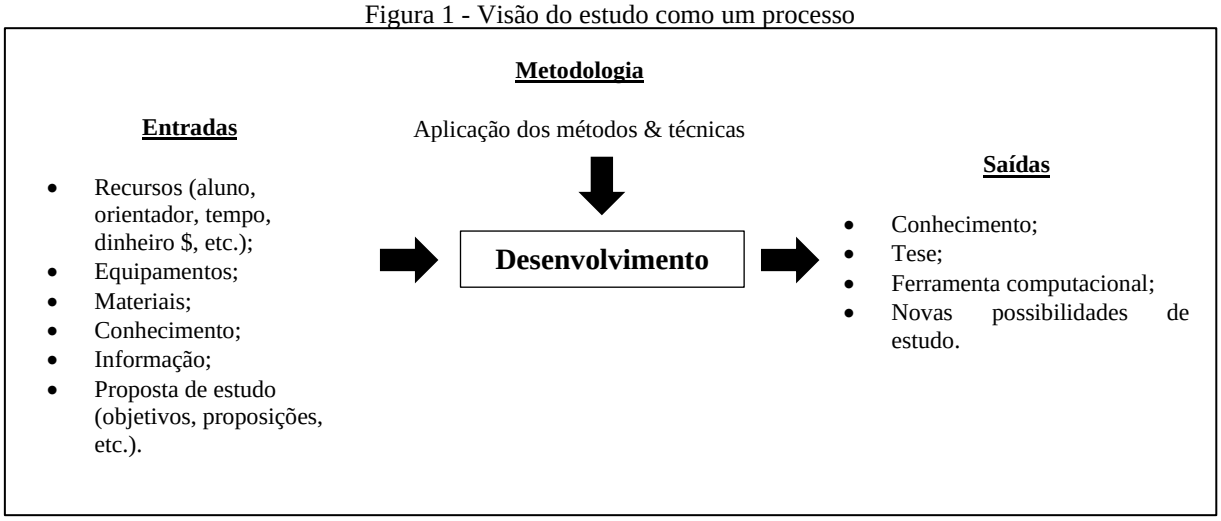
A mensurabilidade, casualidade, generalidade e replicação são apontadas por Bryman (1989) como as principais preocupações de um estudo quantitativo em seu desenvolvimento. A mensurabilidade preocupa-se em testar as hipóteses deduzidas da teoria; a casualidade em explicar o relacionamento de causa e efeito entre as variáveis; a generalização, a possibilidade dos resultados serem utilizados para além do alcance da sua análise e; a replicação, a possibilidade de um pesquisador repetir o estudo e encontrar os seus resultados.

Cauchick Miguel (2012) aponta que um dos métodos apropriados à área de engenharia para conduzir estudo quantitativo é a modelagem e simulação, e a aplicação de experimentos. A modelagem e simulação permite a manipulação de variáveis em uma abstração da realidade. No experimento ou quase-experimento, o pesquisador manipula variáveis independentes, de

forma a testar seu relacionamento com as hipóteses levantadas. Utilizam técnicas matemáticas e computacionais para analisar e simular processos produtivos (CAUCHICK MIGUEL, 2012).

Este estudo tem uma visão de processos de negócios, com entradas (*inputs*), uma ou mais fases de transformação e saídas por meio de resultados/produtos (*outputs*), conforme proposto por Cauchick Miguel (2012). Esta estrutura considera como entradas, os recursos, equipamentos, materiais, conhecimento, informações, proposta de estudo, métodos e técnicas de pesquisa. Após sua transformação tem-se os resultados ou saídas na forma de conhecimento, mostradas no relatório de tese, apontando-se novas possibilidades de estudo, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Visão do estudo como um processo



Fonte: Adaptado de Cauchick Miguel (2012)

Este estudo tem como métodos o estudo de caso realizado em um terminal portuário exportador de minério; a modelagem de otimização, para estruturação do problema existente e seu comportamento a partir de modelos matemáticos; o experimento para avaliar a relação das variáveis e restrições do terminal; e o teórico conceitual, o embasamento oriundo das revisões bibliográficas.

Para isso, dados reais foram coletados durante visitas e reuniões técnicas no terminal estudado, a fim de melhor compreensão da situação operacional, assim como dos eventos comuns às instalações. A análise dos dados foi realizada em quatro semanas, em seguida se iniciou a construção do modelo que representasse a condição operacional observada.

O estudo compreende este Capítulo introdutório, sendo que o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre o uso de métodos de otimização para gestão integrada de pátios de granéis sólidos e processos portuários, envolvendo a descarga de trens, alocação dos produtos

nos pátios e carregamento de navios. São também apresentados os desafios e as diferentes abordagens utilizadas pelos autores para desenvolver seus modelos.

O Capítulo 3 traz visão geral de um terminal especializado na exportação de minério. O Capítulo 4 apresenta estudo aplicado a um terminal existente, descrevendo suas principais instalações operacionais e restrições dos sistemas operacionais, bem como as características da gestão integrada do terminal e a lógica de cada processo, bases para o desenvolvimento do modelo.

O Capítulo 5 descreve o modelo matemático proposto para a gestão de pátio de minério integrando os processos portuários de recebimento e expedição. No Capítulo 6 são discutidos os experimentos computacionais, os resultados alcançados e suas limitações. Por fim, no Capítulo 7 apresenta a conclusão e as recomendações para a continuidade de estudos desta natureza.

2 USO DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA GESTÃO DE PÁTIOS DE MINÉRIO

A indústria siderúrgica demanda cada vez mais recursos minerais e os terminais portuários são o elo principal dessa cadeia logística, conectando a produção das minas até o suprimento dos produtos aos clientes em processos que buscam constantemente soluções de redução dos custos e melhoria dos resultados.

O gerenciamento de pátios de estocagem, em terminais portuários especializados na exportação de minério de ferro, envolve processos complexos e rotinas operacionais, que consideram desde a recepção de trens das minas ao terminal portuário, descarga, manuseio e armazenagem intermediária dos produtos no terminal e o carregamento de navios, garantindo a integridade das instalações e qualidade da carga formada para cada navio. Estes processos devem ser gerenciados com o uso racional dos recursos e a redução dos seus custos operacionais.

Os terminais portuários precisam manter rigoroso controle de seus processos operacionais, relacionados à programação de descarregamento dos trens, controle dos níveis de estoque dos produtos nos pátios e o planejamento de carregamento dos navios. Como o nível de estocagem, às vezes, depende de um processo contínuo de consumo ou produção de minerais, a decisão de carregar navios deve considerar a quantidade de carga presente nos pátios portuários e os produtos em trânsito nos trens previstos para compor o volume de produto específico de cada navio.

O desafio de gerenciar o balanço de massa de um terminal portuário de minério é atividade diária para os seus trabalhadores. Este estudo busca apoiar os gestores portuários na tomada de decisões, nos níveis estratégicos e gerenciais e na elaboração de seus planejamentos de curto, médio e longo prazos, assim como gerenciar suas atividades diárias.

A bibliografia que trata de otimização integrada de gestão de pátio em terminais portuários apresentada a seguir foi pesquisada em diversas fontes de conteúdo científico como livros, jornais e revistas acadêmicas, teses e dissertações, bem como publicações em congressos, seminários, conferências e sítios eletrônicos especializados. Foram utilizadas palavras chaves em português e inglês, quais sejam: modelo de otimização; métodos heurísticos; alocação de pilhas em pátios de estocagem; graneis sólidos; mineiro de ferro; terminal portuário de granel sólido; *optimization model; heuristics methods; stockpile allocation; bulk port terminal.*

2.1 Modelagem de Otimização na Gestão Integrada de Portos

O controle dos estoques dos minérios em pátio de estocagem deve garantir que os embarques programados tenham produtos disponíveis, conforme planejamento das operações. Barros *et al*. (2011) utilizaram modelo de programação linear por um algoritmo baseado em *Simulated Annealing*, que emprega heurística específica ao problema de transporte e de alocação de berço em portos associado ao gerenciamento dos níveis de estocagem. O modelo considera as prioridades dos navios relacionados ao nível de estoque mais crítico e a sequência de navios que permita reduzir custos com *Demurrage*, penalidade paga pelo afretador quando for excedido o tempo permitido para completar a operação de carregamento ou de descarga de um navio, em um determinado horizonte de planejamento.

A integração de decisões de planejamento e programação é base para a operação eficiente e confiável nos terminais portuários e para o gerenciamento dos estoques. Menezes, Mateus & Ravetti. (2016a, 2016b e 2016c) desenvolveram modelo matemático genérico para integração das decisões de planejamento e programação de um terminal portuário de graneis sólidos, exportador de minério de ferro. O problema era definir a quantidade e o destino de cada pedido de entrada ou saída do terminal, estabelecendo conjunto de rotas viáveis para o armazenamento e envio dos produtos no prazo com os menores custos operacionais. A integração ocorre em um esquema hierárquico em que os problemas trocam dados e são resolvidos por meio de um *solver* comercial, programações matemáticas capaz de resolver e testar hipóteses de problemas reais e complexos, e heurísticas, validados com dados de um caso real.

Marcos Junior *et al*. (2018), em estudo semelhante, para resolver problemas de alocação de pilhas em pátios de estocagem, integrados à programação de chegada dos trens e de carregamento de navios em terminal portuário, apresentaram modelo matemático de otimização, analisando a eficiência em um conjunto de cenários, para maximizar a precisão da programação, a taxa de transferência entre os processos e minimizar o custo operacionais. O modelo proposto foi verificado e validado por experimentos computacionais com o auxílio do *solver* CPLEX.

Flores *et al*. (2011) afirmam que o planejamento de médio e longo prazos das cadeias de fornecimento de minérios focalizam não apenas para maximizar a produção e identificar gargalos, mas também para o agendamento de equipes, e ações de produção e manutenção. Os planos observam restrições como requisitos de manutenção e produção, capacidades de

armazenamento e gerenciamento de frotas, carregamento e estocagem em todos os locais, além de lidar com as restrições de qualidade de classificação.

O planejamento de operações associadas à gestão de pátio de um terminal deve que considerar as complexidades como restrições não-lineares, dependendo da qualidade dos diferentes produtos minerais. Flores *et al*., (2011) desenvolveram ferramenta de otimização que fornece o número ideal de trens, levando em conta todas as restrições do sistema com redução significativa do tempo total de planejamento. A ferramenta foi desenvolvida utilizando método de otimização e heurística, pelo uso de linguagem de programação C++ e um *solver* com interface em *Visual Basic* no Excel, linguagem de programação desenvolvida pela empresa Microsoft que interage com diversos aplicativos.

Boland *et al.* (2011) discutem a utilização de modelo de otimização nas operações de pátios de estocagem em uma cadeia de exportação de carvão, com montagem de carga sob encomenda, no qual os estoques são montados a partir de carvão entregue por trens oriundos das minas. Os autores forneceram uma abordagem de solução, simulando as decisões de alocação e programação de estoques, com o objetivo de minimizar os atrasos na navegação das embarcações reduzindo *Demurrage* e maximizar o rendimento do sistema.

O modelo desenvolvido por Boland *et al.* (2011) representaram as decisões e restrições normalmente aplicadas em um estágio de planejamento com quatro a seis 4 a 6 semanas de antecedência. As decisões principais são onde alocar as pilhas de carvão nos pátios de estocagem, quando começar a construí-las, conforme qualidade especificada, quando atracar o navio e, quando começar a recuperar e embarcar a carga para cada navio. Contudo, os autores ressalvaram a importância de incluir na otimização o plano de transporte e chegada de trens, a quantidade de produtos e o tempo em trânsito.

Boland *et al.* (2011) utilizaram programação linear e algoritmo *Greedy,* técnica matemática conhecido como algoritmo ganancioso, que considera o local ideal em cada estágio, na buscar de encontrar um ótimo global, como modelo de otimização heurística. Os autores desenvolveram uma variante do algoritmo em que a ordem de programação da embarcação é aleatória e o seu desempenho resultante é analisado computacionalmente.

O modelo e o algoritmo resultantes apoiam o processo de tomada de decisão para o planejador do pátio de estocagem e, também, podem ser usados como ferramenta de simulação, para explorar os efeitos de alternativas de gerenciamento, por exemplo, reservar áreas do pátio para cargas de movimentação rápida e outras para movimentação lenta, com o objetivo de equilibrar a carga nos equipamentos de empilhamento e recuperação. Os estudos mostraram

que a produção de carvão pode ser substancialmente impactada pelo gerenciamento do pátio de estocagem (Boland*, et a*l, 2011).

A alocação eficiente do espaço de estocagem e a programação da expedição visam obter utilização alta do espaço, baixa perda de material e menores custos de transporte. Tang, Su*n*, & Liu (2015) desenvolveram modelo de programação numérica inteira mista e, em seguida, a resolveram pelo algoritmo de decomposição de Benders, o tratar da alocação integrada dos estoques e o agendamento de navios em um terminal de carga a granel, essencialmente carvão. Os resultados computacionais indicaram que o método de solução proposto poderia ser mais eficiente que o *software* de solução padrão CPLEX.

Boland, Gulczynski, & Savelsbergh (2012) para atender o aumento previsto na exportação de carvão, no porto de Newcastle desenvolveram modelo de planejamento de pátio de estocagem que combinou a construção de algoritmo *Greedy*, enumeração e programação inteira. Os resultados demonstraram a eficácia do modelo em várias aplicações derivadas de dados reais, demonstrando como a tecnologia poderia ser usada para investigar os benefícios de investimentos em expansão de capacidade dos níveis de taxa de transferência.

Usinas siderúrgicas de grande escala, geralmente localizadas próximo de terminais portuários, têm a decisão de alocação do pátio, isto é, onde armazenar os materiais, determinar a distância de deslocamento, bem como a eficiência de armazenamento dos pátios (KIM, KOO e PARK, 2009).

Kim, Koo, & Park (2009) abordaram o problema de alocação de pátio de armazenamento de minério, considerando a possibilidade de conflitos de rota entre pátios, em um modelo de programação inteira mista com dados reais, concluindo que o desempenho do embarque e a eficiência da utilização dos pátios de armazenagem estão associadas a eventuais perdas de tempos operacionais com a utilização do pátio, movimentação de máquinas e atrasos no carregamento a serem gerenciadas e reduzidas por meio de métodos de otimização (KIM, KOO e PARK, 2009).

Pratap *et al*. (2015) estudaram as operações de um porto importador de carvão para desenvolver um modelo de apoio à decisão, abordando a dinâmica do porto em diferentes cenários. O modelo incorpora regras operacionais simulando as operações portuárias em seus diversos processos. A utilidade do modelo desenvolvido em MATLAB foi demonstrada em estudo de caso para a utilização eficiente de berços, redução do tempo de descarregamento dos navios, da falta de espaço no pátio de estocagem e do tempo de atendimento nas estações de carregamento de trens com diminuição dos custos operacionais.

O modelo proposto por Pratap *et al*. (2015) baseia-se em programação inteira mista e métodos heurísticos, fornecendo uma decisão otimizada de quando atracar um navio, onde colocar a carga do navio no pátio de estocagem, quando iniciar o carregamento de um lote e de onde no pátio de estocagem, a carga específica precisa ser recuperada. O modelo permite que os planejadores e gestores de operações analisem cenários simulados e, finalmente, concluam sobre qual conjunto de decisões atende às necessidades e maximiza o desempenho geral do terminal portuário.

Em outro estudo de caso, também de terminal portuário importador de carvão, Pratap *et al*. (2016) desenvolveram modelo de otimização simultânea das operações do pátio de estocagem e do cronograma de atracação dos navios para a descarga. O modelo utiliza programação linear inteira mista, incorporando as complexidades inerentes ao modelo integrado. Dois métodos heurísticos foram propostos, especificamente, para o caso. O primeiramente, um algoritmo genético associado a uma heurística *Greedy* e, posteriormente, ao algoritmo evolutivo baseado em blocos.

Após a aplicação dessas técnicas Pratap *et al*. (2016) obtiveram um cronograma otimizado para carregamento dos trens e alocação de espaço no pátio de estocagem para a carga descarregada das embarcações. O estudo resultou em uma redução significativa do tempo de resposta para o carregamento ferroviário no terminal, o que, por sua vez, levou a reduções de custos. O modelo também possibilitou automatizar o processo de tomada de decisões operacionais diárias no porto.

Abdekhodaee *et al*. (2004) investigaram a integração do agendamento de um sistema ferroviário e de operações portuárias de um terminal de carvão, com base em dados reais. Os autores desenvolveram modelos de programação inteira mista para dois sistemas, o carregamento e expedição ferroviária, e a alocação da carga nos pátios de estocagem.

Na alocação do produto nos pátios, foi utilizada a heurística *Greedy* baseada na programação de número inteiro. O modelo contempla variáveis relacionadas a eventos ao longo do tempo. O tempo é discretizado e, portanto, as variáveis são definidas em conjuntos distintos. A duração de uma unidade de tempo reflete a precisão de agendamento desejada, de forma que, a cada hora estejam disponíveis informações suficientes para uso prático. Dados básicos de entrada são o tipo do produto e os horários de abertura e fechamento de estoques, empilhadeiras e recuperadoras (Abdekhodaee *et al*., 2004).

Dahal *et al*., (2003) apontaram a operação de um sistema portuário como complexa e difícil de modelar matematicamente, no entanto, buscaram a otimização de sistemas de manuseio de materiais a granel pelo uso de ferramenta de modelagem de portos, na direção da

construção genérica de modelos de simulação. A abordagem desenvolvida se baseou em algoritmo genético de modo a fornecer a possibilidade de otimização com a ferramenta de simulação de operações portuárias. Seus resultados apresentaram uma melhoria significativa no desempenho operacional e econômico no caso estudado, concluindo a ferramenta como meio eficaz de apoiar o projeto e o desenvolvimento de instalações portuárias novas e existentes.

Unsal & Oguz (2019) utilizaram metodologia de integração das operações de um terminal exportador de carvão para determinar o tempo e a posição de atracação de cada embarcação; o tempo e a posição de estocagem de cada produto; e a programação da recuperadora para recuperar os produtos localizados em diferentes posições do pátio de estocagem.

O modelo de otimização proposto por Unsal & Oguz (2019) considerou o planejamento de três operações importantes: a alocação nos berços; a programação da recuperadora; e a alocação das cargas no pátio de estocagem. Os autores ainda abrangeram as janelas de maré, múltiplas posições de estocagem e o não cruzamento dos recuperadores. Desta forma, propuseram decompor a solução para esse problema complexo em um algoritmo de Benders, baseado em lógica e modelada com programação inteira mista e programação de restrições.

Goot (2017) adaptou uma heurística existente para abordar a operação de terminais de contêineres e de terminais de granéis sólidos exportadores de carvão, nas questões de alocação de berço e de atribuição de equipamento de cais, alocação da carga no pátio de estocagem, atribuição da empilhadora e recuperadora, e rotas de transportadores de correia. Três estratégias de solução foram desenvolvidas para integrar a solução das filas de navios com a alocação das cargas no pátio de estocagem e calcular a programação completa do terminal.

O primeiro método utilizado por Goot (2017) estimou cronogramas viáveis em tempos de computação relativamente curtos, considerando navios individuais na fila. O segundo método construiu vários cronogramas, criando um limite inferior e superior. O terceiro método integra o terminal como um todo, considerando a entrada, estocagem e saída dos produtos. Os resultados evidenciaram a possibilidade de integração com bom desempenho entre as operações de berço e da retroárea.

Menezes, Mateus & Ravetti (2016a) utilizaram estrutura hierárquica para o planejamento de produção, alocação de pátio de estocagem e agendamento para a entrega de produtos, caracterizados como críticos para o fluxo do produto. A metodologia utilizada combinou heurísticas e formulações matemáticas, que consideram a variedade de produtos que chegam a um terminal portuário, o agendamento dos navios, o espaço no pátio de estocagem e as rotas e equipamentos disponíveis. O planejamento deve apoiar a tomada de decisões sobre

quando e para onde mover o material e a programação trata de implantar o planejamento, ou seja, determinar uma rota de equipamento a ser usada em cada período.

Wang, Lu & Sitters (2018), tendo em vista minimizar o tempo de utilização de recuperadoras, em operação simultânea em uma mesma pilha de estocagem, abordaram a programação das recuperadoras por meio de otimização combinatória com experiências numéricas para avaliar o efeito dos algoritmos de aproximação, a partir de suposições e premissas. Quando as recuperadoras possam trabalhar simultaneamente na mesma pilha de estocagem, é proposto um esquema de aproximação de tempo totalmente polinomial. Experimentos numéricos mostraram um desempenho satisfatório dos algoritmos.

A gestão integrada de pátios aos processos de descarga ferroviária e carregamento de navios se baseia no conhecimento da programação de chegada e saída das cargas, assim como a disponibilidade de pátios de estocagem e equipamentos. Os equipamentos de pátio, empilhadeiras e recuperadoras são programados em função da disponibilidade e localização de áreas para empilhamento e dos materiais estocados nos pátios.

2.2 Desafios da Modelagem de Otimização na Gestão Integrada de Portos

A otimização da gestão integrada de portos exige a utilização de modelos complexos, difíceis de serem tratados apenas com Programação Linear. A maioria dos autores investigados utilizou técnicas que combinam programação linear e heurísticas para obter resultados e rápido processamento.

As soluções para o planejamento de alocação de pilhas e sequenciamento de processos portuário não são triviais e exigem pesquisa para identificar alternativas existentes, de modo a se desenvolver, propor e construir modelos efetivos e com potencial de utilização. Seu grau de complexidade o classifica problema NP-hard (MARCOS JUNIOR, *et al.*, 2018).

Tang, Su*n*, & Liu (2015) consideraram que a solução de problema mestre inteiro de forma otimizada utilizando hierarquia de subproblemas pode gerar resultados significativos, no entanto, se mostram muito demorados. Para superar este desafio, os autores desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista e um procedimento de solução baseado no algoritmo de decomposição de Benders, aplicado para ajudar a superar sua inviabilidade e acelerar a convergência dos resultados.

Pratap, *et al*. (2015) afirmaram que, devido a estrutura complexa de um porto, assim como seus processos e dinâmicas, fica muito difícil desenvolver modelo analítico integrado para o planejamento das suas operações e, mesmo que desenvolvido, obter uma solução ótima

para este problema complexo, exigindo um tempo computacional razoável. No entanto, os autores ressalvaram que usar abordagens tradicionais e ferramentas de otimização é difícil e, portanto, novas abordagens, como algoritmos evolutivos, são cada vez mais usados. Diante disso, para incorporar as complexidades inerentes de um modelo integrado em um caso real, Pratap *et al.* (2016) propuseram métodos heurísticos baseados em algoritmos genéticos, gulosos e evolucionários (*Genetic Approach Algorithm, Greedy Heuristic e Evolutionary Algorithm),* que são técnicas matemáticas baseadas em mecanismos da evolução biológica para resolver problemas de otimização.

Abdekhodaee *et al.* (2004) exploraram algoritmos conhecidos e *softwares* existentes que resolvem problemas modulares. Os autores argumentaram que problemas grandes e complexos são muito difíceis de resolver por outros meios que não a abordagem modular. Por isso, utilizaram métodos heurísticos que são executados rapidamente e que podem ser incorporados a técnicas de pesquisa aleatória quando os limites práticos de tempo de execução o permitem.

A operação de um sistema portuário envolve processos complexos e de difícil modelagem modelar matemática. Uma alternativa de solução pode ser a combinação de modelos de simulação e algoritmos genéticos.

A modelagem matemática de problemas integrados em processos portuários é tratada como problema *NP-Hard,* que são problema não determinísticos de tempo polinomial com decisões baseadas em regras que variam, no caso de porto a porto. Modificações conforme as regras do porto podem ser realizadas em algoritmos *Greedy* em comparação a *solvers* de otimização tradicional.

Boland *et al*. (2012) afirmaram que para níveis elevados de detalhamento das operações de um terminal de granéis sólidos, um problema integrado é complexo no uso de programação matemática, por seu desempenho computacional, pelo número excessivo de variáveis e restrições, por isso, desenvolveram heurísticas construtivas para solução do problema. Já Unsal & Oguz (2019) utilizaram formulação monolítica decompondo problemas individuais em partes que são mais fáceis de resolver pelo método de decomposição de Benders.

Barros *et al* (2011) realizaram experimentos computacionais usando *solver* comercial de alto desempenho para problemas gerados aleatoriamente, correspondentes a cenários operacionais reais. No entanto, testes preliminares indicaram dificuldade em estimar, com precisão, o tempo necessário para encontrar a melhor solução, obtendo a solução ótima em poucos segundos a até horas. Diante disso, propôs algoritmo baseado em *Simulated Annealing* (SA) como uma alternativa para encontrar soluções com razoável robustez, precisão e tempo de execução satisfatórios.

Em caso semelhante, Menezes, Mateus, & Ravetti, (2016a) e Flores *et al*. (2011) afirmaram que a solução desses problemas com *solver* comercial por meio de pacotes de otimização não se mostrou viável. Em relação à abordagem heurística, os autores afirmaram que o método é mais eficiente para produzir uma solução viável do que o *solver* comercial, ou seja, soluções de boa qualidade em menos tempo e permite solucionar problemas de médio e grande porte, inviável com pacotes comerciais.

Em abordagem contraposta, Marcos Junior *et al.* (2018) apresentaram um modelo matemático biobjetivo para projetos de otimização na alocação de pilhas em pátio de estocagem de portos e no carregamento de navios. Os resultados obtidos foram suficientes para validar o modelo e processados em tempo computacional baixo. Em todos os casos, o *solver* comercial CPLEX foi capaz de resolver o problema em um tempo computacional aceitável. Contudo, para análise de problemas de maior porte, verificaram a necessidade de uso de heurísticas ou meta-heurísticas específicas.

A contribuição do presente estudo está no desenvolvimento de um modelo de otimização hierárquico que aplica Programação Linear (PL) na integração de dois modelos, que podem resolver problemas reais.

O primeiro modelo, para decisões estratégicas, visa otimizar a programação e sequenciamento da fila de navios e trens de forma simultânea e integrada, considerando os fluxos de estoque no pátio e os carregamentos em movimentação como uma das entradas (*inputs*) do modelo para reduzir os dispêndios com *Demurrage*.

O segundo modelo, para decisões táticas, realiza a alocação dos produtos nos pátios, para otimizar o tempo não operacional e garantir estoques durante os carregamentos de navios, reduzindo o tempo na recuperação e esses carregamentos. Os modelos funcionam em forma de algoritmo, utilizando o sequenciamento de navios e trens como dados de entrada para designar as balizas onde serão estocados os produtos e os trens que serão descarregados diretamente para os navios.

2.3 Abordagens de Otimização para Gestão Integrada de Portos

Irfanbabu *et al*. (2015) empregaram dois algoritmos de construção *Greedy* baseados em heurística para melhorar a capacidade de taxa de transferência do terminal portuário e obter um sequenciamento adequado de navios e trens, bem como com o gerenciamento eficaz do pátio de estocagem.

No modelo desenvolvido pelos autores, as taxas de transferências eram conhecidas e já consideravam eventuais falhas do sistema que demandem manutenções corretivas, entre outras paralisações durante o carregamento dos navios e descarga dos trens. Desta forma, o modelo se concentrou em melhorar a alocação dos produtos nos pátios para reduzir o tempo de translado das recuperadoras durante o carregamento dos navios.

Irfanbabu *et al*. (2015) e Tang, Su*n*, & Liu (2015) focalizaram em terminal importador de granéis, onde se a verifica a melhor ocupação do pátio com produtos para carregar trens e disponibilizar áreas para o descarregamento dos navios. A prioridade é paralisar a descarga do navio por falta de área de estocagem, isso provoca aumento do tempo de atendimento da operação e os custos relacionados aos navios.

Goot (2017) se limitou ao problema de alocação de navios nos berços, atribuição de equipamentos de cais e pátio, empilhadeira e recuperadora, e alocação da carga no pátio de estocagem. A programação de carregamento dos trens é desprezada, deste modo há sempre vagões disponíveis.

Pratap *et al*. (2016) em outro estudo para terminal portuário importador de carvão, desenvolveram modelo para otimizar simultaneamente as operações do pátio de estocagem com um cronograma de atracação dos navios e a descarga de diversos produtos em dois berços, considerando para a fila de navios a regra FiFo (*Firt In First Out*), onde o primeiro navio a entrar na fila é o primeiro a ser atendido. O plano de alocação de navios nos berços determinará o sequenciamento dos trens nas estações de carregamento.

O estudo se concentrou em encontrar a melhor ocupação do pátio para reduzir o tempo de translado das recuperadoras, o tempo efetivo em produção que somado ao tempo de buscar o produto no pátio para finalizar o carregamento, o tempo de trens em fila, o processo de recuperação do produto no pátio e o carregamento do navio em um só berço. A programação dos pátios condiciona a programação e sequenciamento de trens e navios, inclusive, considerando o descarregamento de vagões com produtos encaminhados direto aos navios.

Para planejar a estocagem, integrando a programação de trens e navios, em terminal exportador de mineiro, Marcos Junior *et al*. (2018) utilizaram um modelo matemático de modo a maximizar a taxa de transferência entre os processos e reduzir custos operacionais. O modelo considerou apenas um tipo de minério, ou seja, sem variações de qualidade do produto. Trens são enviados com base na estimativa do tempo dos movimentos necessários para carregar a navio, envolvendo empilhadeiras e recuperadoras. Todos os produtos descarregados devem ser alocados nos pátios em conjunto de balizas para a formação de pilhas e o tempo de carregamento do navio é diretamente proporcional a quantidade de pilhas a serem recuperadas.

No caso de exportação de carvão analisado por Boland *et al.* (2011), o carregamento de um navio só poderia iniciar após toda sua carga estar estocada nos pátios, situação também adotada por outros autores. O modelo indica um plano de entrega ferroviária para cada pilha de estocagem, ou seja, o número de trens que formarão uma pilha e ocuparão uma quantidade específica de balizas. Descarga de trens direto para o navio não foi considerado.

O modelo proposto e desenvolvido neste estudo permite a análise das operações com produto de qualidades diferentes, ou seja, mais de um tipo de produto pode ser alocado nos pátios para o carregamento de navios. O navio pode receber mais de um tipo de produto, porém, um por vez.

Outro ponto relevante do modelo é que o navio pode iniciar seu carregamento mesmo sem toda carga alocada nos pátios, para isso, o tempo de chegada e descarga dos trens no período de carregamento do navio é considerado no tempo total de atendimento do navio. Além disso, o modelo aceita que os produtos descarregados dos trens sejam transportados direto o para o carregamento de navios, condição não observada na literatura.

A transferência direta dos produtos entre os diferentes modais, sem passar pelo sistema de armazenagem, é uma operação de contingência, pouco comum em terminais portuários. É importante que ocorra sinergia entre os volumes estocados nos pátios, a carga que chegará por trens, e os tempos de entrada e saída dos navios.

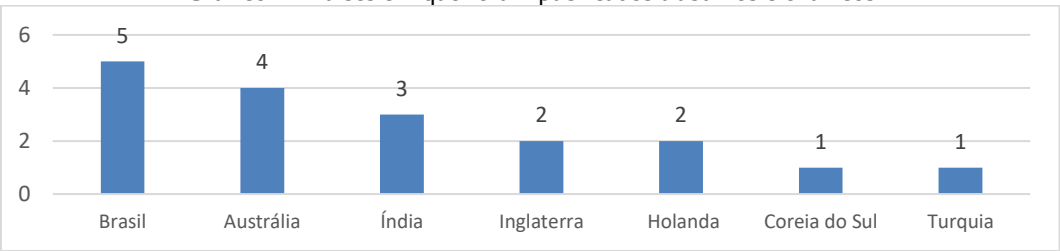
2.4 A Otimização na Gestão de Pátios

Ao encontro do que afirmaram Kim, Koo, & Park (2009), poucas publicações foram encontradas quando se trata de graneis sólidos minerais, especialmente focalizando questões de alocação de pilhas de minério de ferro em pátios de terminais portuários.

Na busca, foram identificados 18 trabalhos científicos, publicados em sua maioria em periódicos científicos de oito países, sendo 12 com foco em terminais de graneis sólidos e dois em minas de exploração de mineral, localizadas na Austrália. Os países Austrália, Brasil e Índia são os líderes em publicação, conforme ilustra o Gráfico 1.

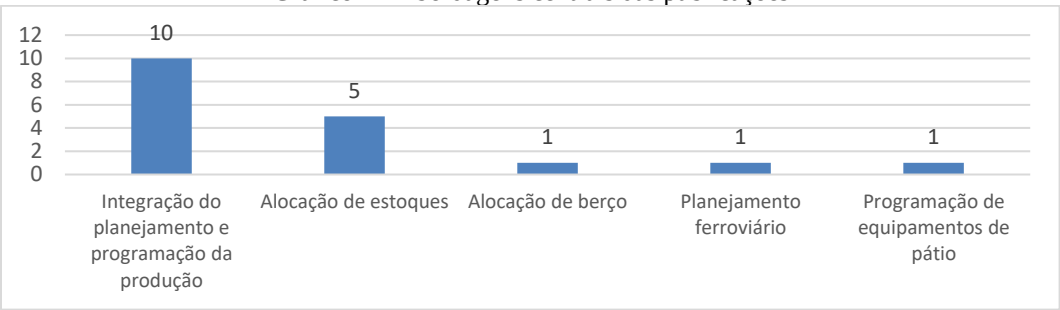
Na pesquisa de publicações abordando os temas de alocação de estoque e gestão de pátios em terminais portuários, foram identificados artigos focalizando soluções associadas à alocação de berços; à integração do planejamento e programação da produção; ao planejamento ferroviário e à programação de máquinas de pátio.

Gráfico 1 - Países em que foram publicados trabalhos científicos



Nas publicações identificadas, o foco foi o desenvolvimento de soluções para o planejamento e programação da produção de toda as cadeias logística na interação mina, ferrovia e porto, conforme mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Abordagens centrais das publicações



Modelos de integração do planejamento e da programação da produção, com a alocação de estoque em pátios utilizam diversas abordagem como alocação de berço (Barros *et al*., 2011) e (GOOT, 2017), sequenciamento e plano de carregamento de navios (KIM, KOO e PARK, 2009), planejamento ferroviário (Abdekhodaee *et al*., 2004) e (Flores *et al*., 2011), e programação de equipamentos de pátios, empilhadeiras e recuperadoras (UNSAL e OGUZ, 2019).

Conforme os termos e fontes utilizadas na busca da bibliográfica para embasar este estudo, poucos trabalhos científicos foram identificados focalizando a otimização da gestão de pátio de granéis sólidos. Em 2016, foram identificados quatro artigos em periódicos, porém, três parecem estar duplicados. Os periódicos acadêmicos são a principal fonte destas publicações. A Tabela 1 apresenta uma relação de publicações por ano, fonte e tema.

Os estudos identificados utilizaram diversos métodos de otimização, tais como: programação linear; programação linear inteira; programação linear inteira mista; programação inteira mista; programação inteira mista não linear; programação biobjetivo; polinomial de tempo não determinístico; otimização de roda estridente (*squeaky wheel optimization)*. Os métodos mais utilizados, em combinação com alguma técnica heurística, foram programação

linear (cinco publicações), programação linear inteira mista (três publicações) e programação inteira mista (três publicações).

Publicações	Conferência	Congresso	Website	Jornal Periódico	Teses	Total Geral
Terminal Portuário de Granéis Sólidos		**2**	**1**	**12**	**1**	**16**
Alocação de Berço				**1**		**1**
2011 (Brasil)				1		1
Integração do planejamento e programação da produção			**1**	**7**	**1**	**9**
2003 (Inglaterra)				1		1
2014 (Índia)				1		1
2015 (Índia)				1		1
2016 (Brasil e Índia)			1	3		4
2017 (Holanda)					1	1
2019 (Turquia)				1		1
Programação de equipamentos de pátio				**1**		**1**
2018 (Holanda)				1		1
Alocação de estoques		**2**		**3**		**5**
2008 (Corea do Sul)				1		1
2011 (Austrália e Brasil)		1				1
2012 (Austrália)				1		1
2015 (Inglaterra)				1		1
2018 (Brasil)		1				1
Mina de Exploração	**1**	**1**				**2**
Integração do planejamento e programação da produção	**1**					**1**
2004 (Austrália)	1					1
Planejamento ferroviário		**1**				**1**
2011 (Austrália)		1				1
Total Geral	**1**	**3**	**1**	**12**	**1**	**18**

Tabela 1 - Relação das publicações identificadas por ano, fonte e tema

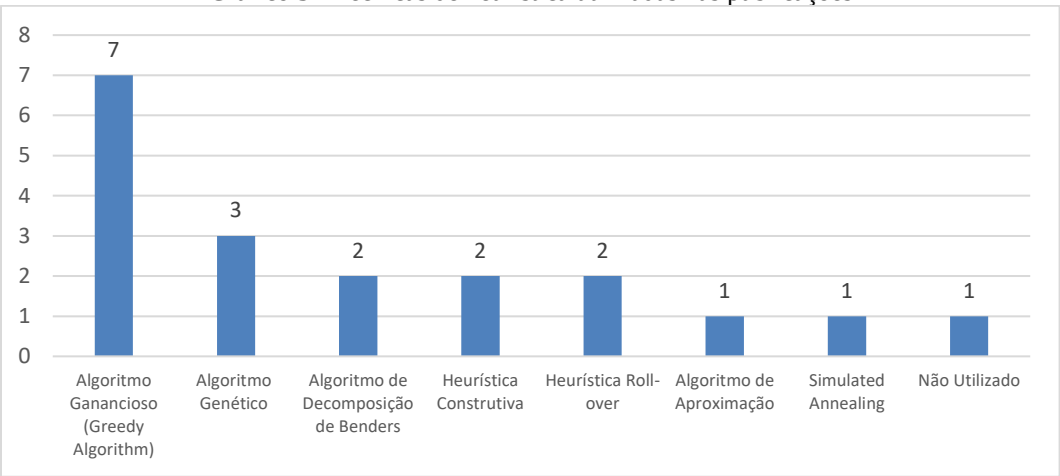
16 publicações combinaram métodos de otimização com técnicas heurísticas de modelagem. As técnicas com algoritmo ganancioso (*Greedy Algorithm*) e algoritmo genético foram os mais utilizados. De modo geral, as combinações de diferentes métodos de otimização e heurística mostraram-se diversificadas, conforme ilustra o Gráfico 3.

Alguns artigos utilizaram *softwares* comerciais. Destaque para o CPLEX, *solver* desenvolvido pela IBM, presente em dez publicações abordando terminais portuários (Gráfico

3). O CPLEX combina, de forma inteligente, a construção, enumeração e a programação integrada da armazenagem dos produtos nos pátios, bem como pode ser utilizada na análise de investimentos de expansão de capacidade e níveis altos de produtividade (Boland, Gulczynski, & Savelsbergh, 2012).

Tang, Sun, & Liu (2015) afirmaram que os resultados computacionais com dados reais indicam que o CPLEX foi eficiente para seu estudo. Outros *softwares* também utilizados foram MATLAB, XPREX, Python 3.4, Gurobi 6.0.3 e *Visual Basic* no Excel.

Gráfico 3 - Técnicas de heurística utilizadas nas publicações



Boland *et al*. (2011) e Dahal *et al*. (2003) desenvolveram ferramentas específicas para a modelagem de otimização de processos portuários em seus respectivos estudos. Abdekhodaee *et al*. (2004) e Irfanbabu *et al.* (2015) não citaram a ferramenta computacional utilizada.

Esta tese apresenta uma visão diferente para problema de gestão integrada de pátios de estocagem e processos portuários para exportação de minério de ferro, por meio de modelo hierárquico de otimização, desenvolvido inteiramente com técnica de Programação Linear (PL).

As questões portuárias por sua complexidade, como já mencionado, exigem modelos complexos, difíceis de serem tratados apenas por Programação Linear. Os autores identificados aplicaram técnicas que combinam programação linear e métodos heurísticos pela complexidade dos programas não-lineares, tendo em vista se obter resultados adequados com processamento rápido.

A seguir, descrevemos as principais instalações de um terminal portuário dedicado à exportação de minério de ferro, o estudo proposto aplicado em caso real, a definição do problema abordado e a proposição de um modelo de otimização como ferramenta de apoio ao processo de tomada de decisões.

3 TERMINAL PORTUÁRIO ESPECIALIZADO EM MINÉRIO

Um terminal portuário, bem como, suas instalações, têm como princípio básico a integração da cadeia logística para o escoamento de produtos. Os portos são considerados, para a maioria das nações comerciais, como partes importantes da infraestrutura de transporte e elo entre parceiros comerciais, com a consolidação das cargas transportadas por modais rodoviário, ferroviário e aquaviário (ALDERTON, 2008).

No Brasil, há algumas modalidades de contratos de terminais portuários definidas na Lei dos Portos N. 12815/2013. Para a exportação de minérios, as principais modalidades são terminais em Portos Públicos (PP) e Terminais de Uso Privados (TUP).

O Porto Público ou Porto Organizado é definido como um conjunto de bens públicos requeridos para a execução das atividades portuárias dentro de um espaço geográfico, denominado área do porto organizado, que é uma parte dos bens públicos delimitada pelo Poder Executivo (BRASIL, 2013). O TUP é "instalação portuária explorada mediante autorização e localizada fora da área do porto organizado", que deve ser precedida de chamada ou anúncio público, e quando necessário, processo seletivo público. E instalação construída ou a ser implantada por pessoa jurídica de direito público ou privado, não integrante do patrimônio do Porto Público, e é utilizada para a movimentação e armazenagem de mercadorias destinadas ao transporte aquaviário ou provenientes dele (BRASIL, 2013).

O planejamento e dimensionamento de um terminal portuário é baseado em requisitos de demanda futura e características da carga manuseada, a partir da qual se desenvolve o arranjo físico das instalações, determinando o plano de investimento, plano de implantação ordenada e a análise de viabilidade técnica, econômica e financeira do empreendimento (PEREIRA e BOTTER, 2017).

3.1 Sistemas de um Terminal Portuário

Alderton (2008) apontou as principais funções e recursos de um sistema porto como os recursos de engenharia, as funções administrativas e as funções operacionais. Os recursos de engenharia compreendem os acessos terrestres e marítimos, a infraestrutura de atracação das embarcações, o sistema viário e ferroviário e, a gestão da área industrial. As funções administrativas são compostas por atividades de controle do acesso, controle ambiental e de carga perigosas, segurança patrimonial e, fiscalização da imigração, saúde e documentos

comerciais. As funções operacionais envolvem atividades de praticagem, atracação e amarração, embarque, desembarque, armazenamento e a distribuição de carga.

O Sistema Portuário pode ser entendido como um conjunto de subsistemas das operações portuárias, como segue: acessibilidade terrestre; estruturas de retroárea; estruturas de atracação e acessibilidade fluvial-marítima (PEIXOTO, 2011).

Alfredini & Arasaki (2009) classificaram o sistema portuário quanto à sua natureza, localização e utilização. A classificação quanto à natureza considera as características de abrigo e acessibilidade, podendo ser natural ou artificial. Em relação a localização, consideraram o posicionamento geográfico do terminal projetado, sendo externos, internos ou ao largo. A utilização leva em conta a carga que será movimentada e os tipos de equipamentos operados, classificando-os como portos de carga geral ou especializados.

Pereira (2011) classificou um terminal portuário, especializado na exportação de minério, como um terminal de granel sólido, que realiza a ligação entre a mina e os clientes. Os Incoterms ou termos internacionais de comércio aplicadas nas transações de compra e venda internacional de minério de ferro podem ser do tipo *Free-on-Board* (FOB, quando o cliente busca a carga no porto) ou *Cost, Insurance and Freigth* (CIF, quando o cliente recebe a carga no destino designado). Pereira (2011) destaca que estes portos integram as operações logísticas da mina, ferrovia e porto.

3.2 Operações Portuárias de Exportação de Minério

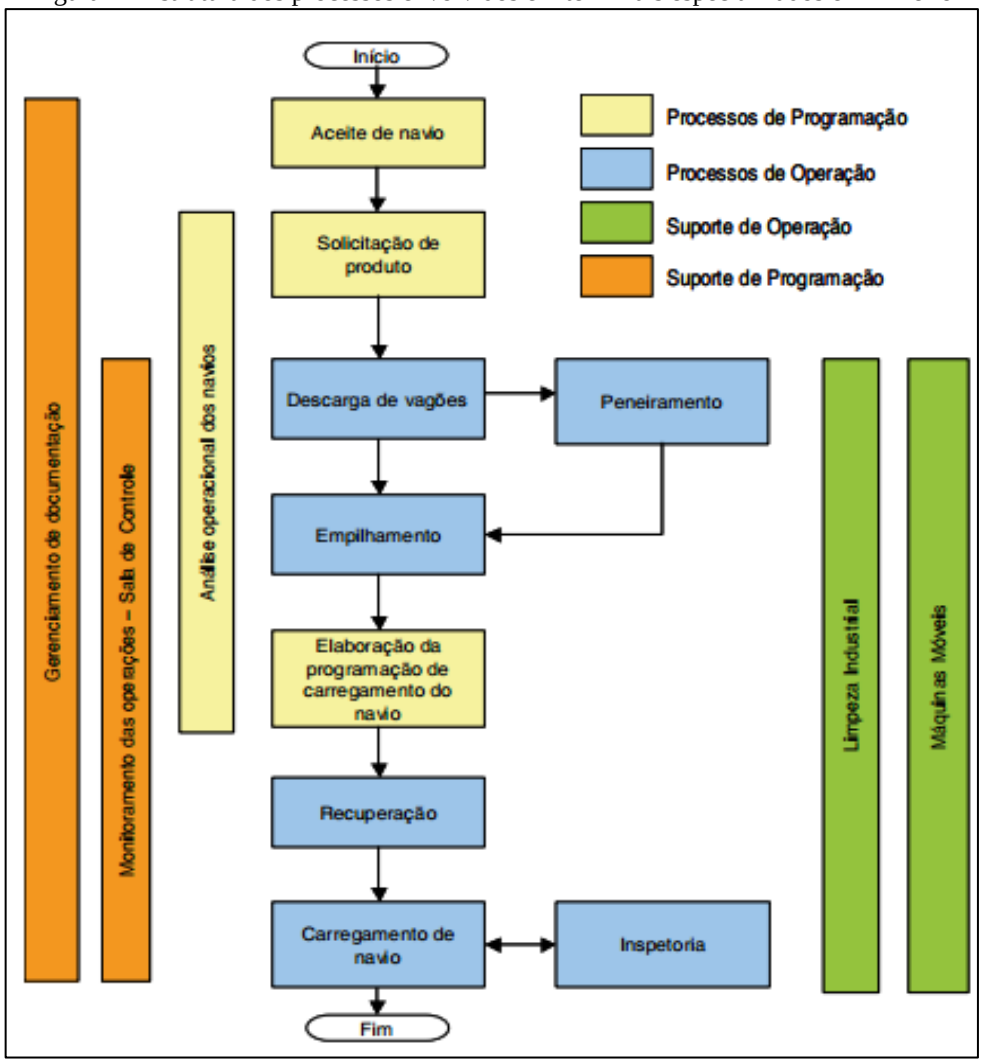
A operação portuária de terminais que exportam minério é caracterizada como um conjunto de atividade e processos sequenciais que vão desde a chegada da carga por terra ao porto até seu embarque nos navios. Destacam-se:

a) os processos de programação e controle da produção (PCP), responsável por garantir que os navios sejam recebidos e suas cargas sejam embarcadas com segurança e qualidade de acordo as prescrições de cada terminal;
b) os processos de operação (Gerência Operacional), que atuam diretamente com o manuseio de cargas de acordo com a programação pré-estabelecida, requisitos de segurança e cuidados com o meio-ambiente, conforme estabelecido em contrato;
c) o processo de apoio de programação (PCP), que visa evitar perdas e bloqueios, bem como garantir que toda a documentação tramitada seja expedida conforme a legislação aduaneira do país;

d) e o processo de apoio operacional (Gerência de Engenharia e de Manutenção), com objetivo de evitar perdas operacionais e problemas ambientais (VALE, 2008a).

A Figura 2 ilustra os processos de um terminal especializado na exportação de minério.

Figura 2 - Estrutura dos processos envolvidos em terminais especializados em minério



Fonte: (VALE, 2008a).

A operação de um sistema portuário de minério de ferro se dá com a utilização de equipamentos de descarga de vagões, conhecidos como viradores de vagões; correias transportadoras, que levam o minério até o pátio de estocagem ou, em caso específico, direto para embarque em navios; grandes equipamentos especializados, as empilhadeiras, as recuperadoras e as empilhadeira-recuperadora, que formam as pilhas de produto e os recuperam para serem embarcados; e o carregador de navio, que embarca o minério nos navios programados (Figura 2).

3.3 Principais Equipamentos Utilizados em Terminais de Minério de Ferro

Os principais equipamentos envolvidos na operação de um terminal portuário especializado na exportação de minério são: os viradores de vagões; as empilhadeiras; as recuperadoras e as empilhadeiras-recuperadoras, que desempenham essas duas funções, conforme sua programação operacional e os carregadores de navios.

O Virador de Vagão (VV) é o equipamento utilizado para a descarregamento dos lotes de minério, trazidos em vagões, que compõem os trens. Os produtos descarregados são, posteriormente, encaminhados para empilhamento nos pátios de estocagem, sendo recuperados para transporte e embarque, conforme programação dos navios (VALE, 2010). O VV é capaz girar até 180º as composições de vagões conjugados, que possuem entre um vagão e outro uma parte fixa formando o par de vagão e engates móveis localizados nas extremidades que possibilitam o giro (MOURA, 2011a).

A programação de descarga informa a sequência dos trens, o tipo de produto, a quantidade de vagões, área e baliza para estocagem e o tipo de empilhamento para que a descarga e movimentação do minério sejam realizadas com segurança e qualidade. Para tanto, deve se contar com informações sobre as condições operacionais dos equipamentos como sua disponibilidade física, utilização, ocupação, manutenção, operação e passagem de turno.

A Empilhadeira (EP) forma as pilhas de minério nos pátios a céu aberto em localizações sinalizadas por balizas. Após ser descarregado pelo VV, o minério é conduzido por meio de Transportador de Correia (TC) até a empilhadeira. É importante que o operador tenha pleno conhecimento da máquina e procedimentos de operação, para executar a formação das pilhas com segurança e desempenho operacional exigidos (MOURA, 2011b).

Os minérios descarregados nos VV formarão pilhas nos padrões especificados de qualidade. A forma de se armazenar ou empilhar o minério está associada às suas características físicas e químicas, existindo algumas formas de seu empilhamento. Os principais métodos de formação de pilha são *Chevron*, *Windrow*, *Conevron* ou *Coneshel*l, e Simples Cone. O pátio, geralmente de grandes dimensões, recebe reforço de solo para as pilhas e para os trilhos dos equipamentos, e sistemas de drenagem para garantir a integridade das instalações (VALE, 2008a).

A Recuperadora (RC) é utilizada no processo de recuperação de minério do pátio, para serem carregados em navios, silos ou apenas movimentar o material de lugar. O equipamento é alimentado eletricamente, o que permite a utilização de um sistema de proteção para acionar ou não a correria transportadora ou a roda de caçambas, evitando que a correia de trás alimente

a correia da frente quando esta estiver parada, e, assim, o transbordamento de material (VALE, 2008b).

A grande diferença entre as EP, RC e a Empilhadeira-Recuperadora (ER) é que a ER tem a capacidade tanto de empilhar minério proveniente da descarga como de recuperar o minério do pátio para o embarque. O equipamento permite maior flexibilidade quando se trabalha com a operação de muitos pátios e grandes volumes de produto (VALE, 2010).

O Carregador de Navio (CN) é o equipamento utilizado nas operações de carregamento de granéis sólidos para navios nos porões no navio, conforme estipulado no plano de carregamento, associado ao tipo e classe do navio (VALE, 2008a). Moura (2011a) aponta que o processo de embarcar minério nos porões dos navios é resultado do gerenciamento de dados de operação portuária e de um sistema de rádio frequência de comunicação rápida coordenando as operações entre as máquinas dos processos e a sala de controle.

4 ESTUDO APLICADO EM UM TERMINAL DE GRANÉIS SÓLIDOS

O terminal de granéis sólidos estudado tem capacidade de movimentação de até 45 milhões de t/ano com uma área total de 740,7 mil m². As principais instalações para as operações com minério de ferro são: um píer com um berço dedicado, capazes de operar navios com capacidade de até 190 mil t; três pátios de estocagem; uma pera ferroviária para a recepção e manobras dos trens; estrutura para a descarregamento dos trens com três viradores de vagões; e um complexo sistema de equipamentos e máquinas que realizam a movimentação das cargas no terminal, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Mapa de implantação do terminal

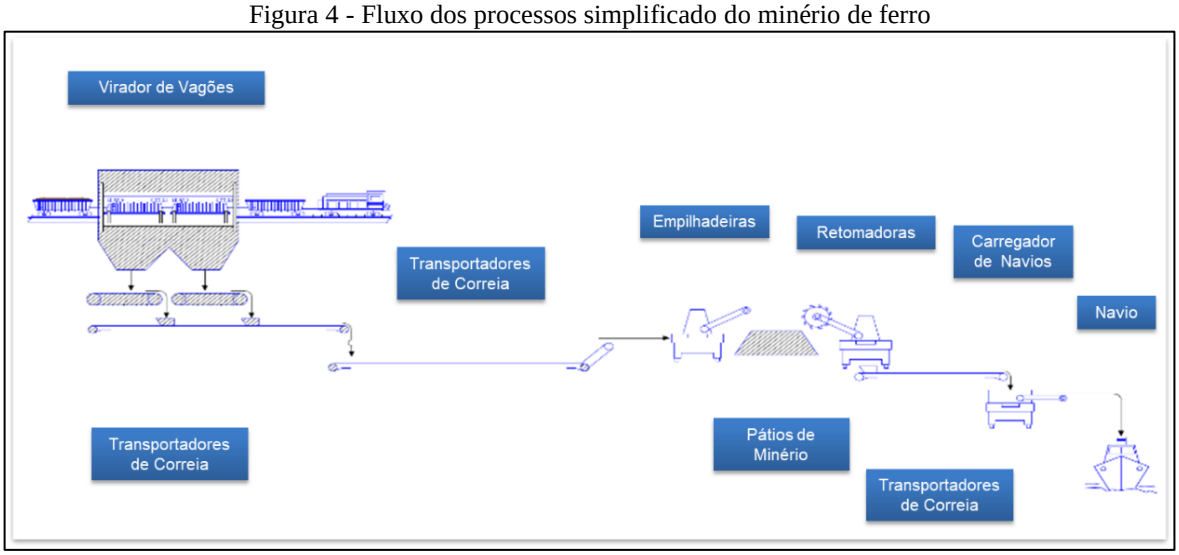
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

A área de estocagem tem capacidade estática de armazenamento de aproximadamente 1.3 milhões de t. A retroárea compreende sistema de correias transportadoras, o sistema viário interno, os pátios de estocagem de granéis sólidos, operando com empilhadeiras e recuperadoras, pera ferroviária com viradores de vagões (VVs) e além de instalações industriais e administrativas complementares.

O minério de ferro chega por trens que são descarregados nos VVs. Em seguida, o minério é conduzido por correias transportadoras até os pátios, aqui denominados como P#1, P#2 e P#3, para armazenagem ou para o embarque direto, quando houver navios disponíveis para o carregamento. Empilhadeiras formam as pilhas nos pátios com produtos variados, que

aguardam sua programação para serem recuperadas pelas recuperadas e embarcadas pelo carregador de navio, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxo dos processos simplificado do minério de ferro



Fonte: (CSN MINERAÇÃO, 2021)

A estrutura marítima é capaz de atender navios com capacidade de até 190.000 *t* em um berço dedicado. Berço é definido como um local específico ao lado de um cais ou píer onde um carregador de navios está disponível para carregar ou descarregar navios, acomodando apenas um navio de cada vez.

4.1 Acesso Ferroviário

Os trens operam composições com até 136 vagões e representam um lote de carga, com capacidade que varia entre 14.000 e 15.000 *t* por composição. Os trens são descarregados em três viradores de vagões (VV#1, VV#2 e VV#3).

Para garantir a ocupação dos viradores de vagões, a operadora ferroviária deve garantir um trem dentro do terminal aguardando a liberação de um dos viradores de vagões. O pátio de ferroviário não deve ser considerado como área de espera.

Cada virador de vagão é capaz de descarregar dois vagões simultaneamente. Sua capacidade nominal é determinada pelo tempo de ciclo e pela capacidade do vagão. A capacidade de descarga de trens em cada virador de vagão é um parâmetro que pode ser variar e ser testado em diferentes cenários.

4.2 Pátio de Estocagem

A estocagem de minério de ferro é distribuída em uma única área compartilhada, sendo os pátios P#1, P#2 e P#3 para o minério, conforme a Figura 5. O processo de empilhamento é necessário para corrigir ou melhorar algumas características físicas e químicas, como também para atender uma logística operacional da estocagem, que tem por função compatibilizar e harmonizar os fluxos de chegada e saída de produtos. É feito em pátios de estocagem a céu aberto por empilhadeiras ou por empilhadeiras-recuperadoras, seguindo procedimentos e técnicas apropriadas para cada produto estocado.

Figura 5 - Localização dos pátios de minério

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

O pátio é configurável sua ocupação, tanto em capacidade, como no tipo de produto. O empilhamento ideal consiste em um padrão de pilhas no pátio, tanto em tamanho como em tipo de produto. Uma mesma área pode ser utilizada para mais de um produto, contudo, nunca simultaneamente.

Considera-se que uma pilha não pode ser manipulada por dois equipamentos de pátio ao mesmo tempo. A recuperação dos produtos pode acontecer simultaneamente com até dois equipamentos, desde que haja pilhas disponíveis, equipamentos livres e sua necessidade. Inclusive, pode ocorrer operação de descarga de trem direto para navio concomitantemente à recuperação com um equipamento de pátio.

4.3 Estruturas Marítimas e Berços Operacionais

A infraestrutura básica marítima do terminal compreende o canal de acesso marítimo de entrada ao porto, bem como os dispositivos de apoio a navegação, como sinalização e iluminação e as

estruturas de atracação e amarração (Figura 6). A infraestrutura de auxílio a navegação possibilita a operação do terminal, uma vez que o dimensionamento e configuração adequada do canal reduz os custos gerais e aumenta a eficiência.

Figura 6 - Estrutura de atracação

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

O carregamento dos navios é controlado desde seu início até o final pelo operador do carregador de navios e pelo inspetor de embarque. Todas as ocorrências são registradas em relatório e informadas ao inspetor de embarque e para o técnico portuário alimentar o sistema de gestão de operações do terminal.

O sistema de controle gera os relatórios sobre o navio, carga embarcada e paralisações durante o carregamento, qualidade química e física do minério e ajuste no controle de estoque no pátio. No final do carregamento, é feita uma parada para uma inspeção visual pelo inspetor de embarque no calado do navio para calcular eventuais ajustes necessários para equilibrar o navio.

4.4 Movimentação de Carga no Terminal

Os equipamentos de movimentação de carga são utilizados para descarregar vagões, transportar os produtos até os pátios, formar e recuperar pilhas de estocagem nos pátios e carregar o minério nos navios. Estas operações são realizadas pelos viradores de vagões, correias transportadoras, empilhadeiras, recuperadoras, empilhadeiras-recuperadoras e carregadores de navio, com suas respectivas características e capacidades.

Os viradores de vagões realizam a descarga dos lotes de minério, conforme programação do PCP e podem ser direcionados para o empilhamento nos pátios ou diretamente para embarque. A recuperação dos minérios é realizada pelas recuperadoras, segundo diretrizes como a homogeneização do produto, altura variável e avanço na sua extensão, e liberação de espaço no pátio em bancadas.

Para este estudo, foi realizado diagnóstico operacional dos processos do terminal para identificar seus principais gargalos e oportunidades de melhorias da eficiência global do terminal. O diagnóstico levou em conta dados reais de um ano (2018), com registros diários e mensais, como detalhado a seguir.

4.5 Diagnóstico Operacional do Terminal

O diagnóstico e avaliação da capacidade do terminal analisado foram baseados em dados reais no período de um ano, identificando-se os eventos que mais impactaram seus processos operacionais e, consequentemente, sua eficiência como um todo. O estudo se referiu às operações desde a chegada dos trens carregados com minério de ferro até as manobras de saída dos navios carregados com minério para exportação.

As operações analisadas se referem às manobras dos trens, sua descarga nos VVs, empilhamento e estocagem de minério após descarga, chegada dos navios, recuperação, embarque de minério e desatracação dos navios. Na análise de desempenho do terminal identificou-se os eventos e seus respectivos grupos, conjunto de eventos de mesma natureza, que resultaram em paralização da operação e impactos no desempenho de cada processo.

4.5.1. Impactos na Descarga de Trens

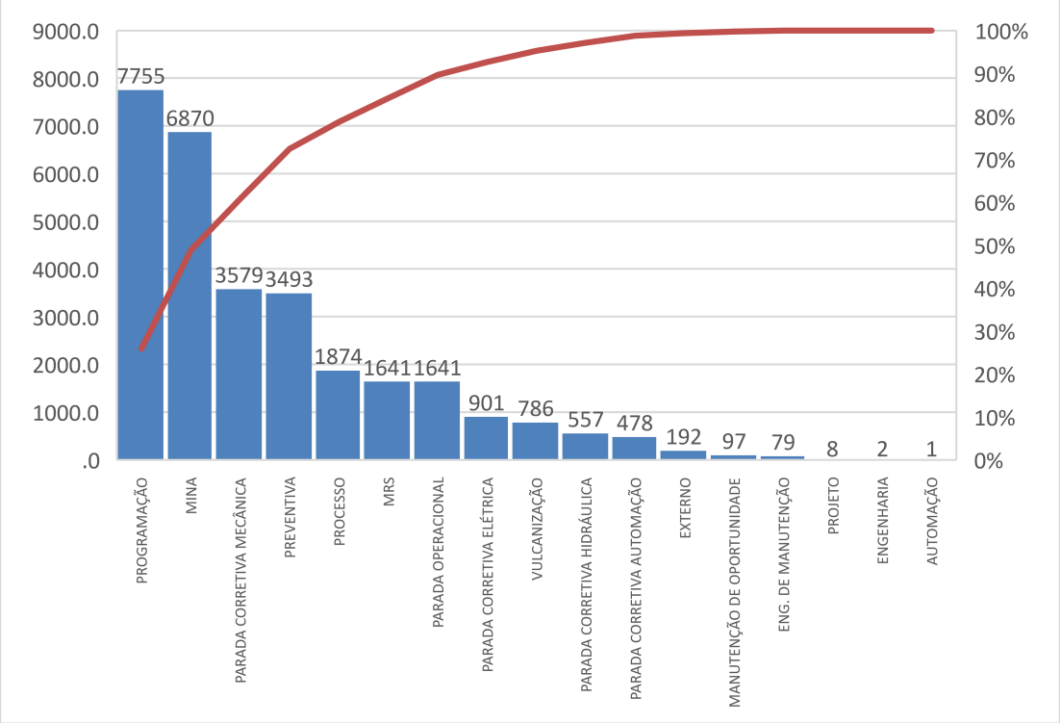
O Gráfico de Pareto (Gráfico 4) mostra a análise dos eventos do sistema de descarga nos três viradores de vagões, indicando os maiores impactos referente ao grupo de Programação (7.755 hs) e Mina (6.870 hs). No grupo Programação, a principal causa de paralisação foi o aguardar chegada de trem por responsabilidade do porto (5.844 hs) e no grupo Mina foi o aguardar chegada de trem por responsabilidade da mina (6.652 hs). O primeiro grupo está associado a ocorrências devidas à qualidade do material, oportunidade de descarregar direto trem para o embarque do navio, bloqueio entre equipamentos, indisponibilidade de rota e de

área, e troca de pilha para formar carga específica. O segundo grupo se refere à ociosidade por falta de lote, ou seja, a mina não conseguiu entregar carga ao terminal.

Outro grupo de eventos relativo à ociosidade é o grupo que corresponde a empresa operadora da ferrovia MRS Logísticas (1.641 hs), com o evento aguardando chegada de trem (MRS, 593 hs). Isso ocorre quando a operadora não consegue circular o trem até os viradores de vagões por motivos diversos de sua responsabilidade. Estes eventos representam oportunidade para a execução manutenções e, em alguns casos, a perda de operação efetiva.

A manutenção preventiva e corretiva se refere ao tempo de execução de manutenções necessárias ao terminal portuário por exemplo os grupos vulcanização e manutenção de oportunidade, ou seja, manutenção realizada por disponibilidade de tempo sem programação prévia.

Gráfico 4 - Grupos de paralisações do processo de descarga ferroviária



No grupo Processo (1.874 hs) destacam-se os tempos com circulação do trem, e troca de porão quando há trem a bordo, processo em que o material descarregado em um dos viradores vai direto para o carregamento do navio.

Na parada operacional (1.641 hs), o tempo dispendido com posicionamento da primeira dupla de vagões da composição do trem (564 hs) foi o mais significativo e se refere ao tempo que o trem leva para percorrer a pera ferroviária até os viradores vagões e outras manobras ferroviárias.

Os eventos do grupo Externo compreendem as paralisações por condições climáticas e ocorrências quais o terminal não possui responsabilidade (192 hs). Os mais relevantes são por ventos (56 hs), chuvas fortes (45 hs) e baixa visibilidade para a navegação (23 hs). As paralisações dos grupos Engenharia de manutenção (70 hs) e Projeto (8 hs) se referem às intervenções necessárias para a análise de falhas dos equipamentos e restrições impostas por divergências com o projeto ou com a condição operacional.

A programação de descarga dos trens está associada ao número de lotes destinados a um navio específico. Estes lotes são estocados em pilhas nos pátios ou destinados diretamente a bordo. Na formação de cada pilha são considerados o pátio e o balizamento, espaço referenciado para empilhamento e posterior retomada. Cada baliza, espaço no pátio delimitada por marco físico, possui 10 m de comprimento e o número de balizas utilizadas na formação da pilha indica a quantidade de material estocado.

A quantidade de destinos dos lotes descarregados está relacionada com o número de pilhas que irão formar a carga de um navio. Cada destino se refere a uma pilha no pátio, além do destino específico dos lotes descarregados diretamente para o embarque, pois há somente uma rota singela, linha única de transportadores de correia que transfere os produtos dos pátios para os navios.

A Tabela 2 mostra que o número médio de balizas programadas e utilizadas para a descarga dos trens e formação das pilhas como praticamente iguais, exceto no pátio P#3 que utilizou uma baliza a mais em relação ao programado.

Pátio	**Média de Balizas Programadas**	**Média de Balizas Realizadas**
P#1	13	13
P#2	6	6
P#3	6	7

Tabela 2 - Quantidade de balizas programadas e realizadas

Nota-se que são utilizados em média 4,7 destinos na descarga dos lotes, sendo 3,7 na formação de pilhas e um para o embarque direto. O número elevado de destinos mostra a necessidade de distribuir os lotes descarregados em pilhas menores nos pátios, consequentemente, menor quantidade de balizas utilizadas e menor capacidade de armazenagem por pilha. No caso de pilhas já formadas nos pátios para formar a carga de um

navio, o número de destinos da descarga dos lotes é mais baixo e, geralmente, ocorre quando uma pilha não foi recuperada totalmente ou precisou ser reprogramada por outros motivos.

Um lote de carga completo é formado por um trem composto com 136 vagões. Em média são programados 11,4 lotes por navio, com volume médio de aproximadamente 14.000 *t* por lote (Tabela 3). Quando há utilização de lotes quebrados, ou seja, de parte da composição, o número de lotes programados por navio aumenta e diminui quando pilhas já formadas são reaproveitadas.

Descarga	**Destinos Utilizados**	**Lotes Programados por Navio**	**Peso dos Lotes (t) 136 vagões**
Média	4,7	11,4	14.202,5
Máximo	9,0	25,0	15.732,0
Mínimo	1,0	1,0	10.010,0
Desvio Padrão	1,8	4,8	1.173,1
Variância	3,3	23,1	1.376.118,0

Tabela 3 - Destinos utilizados e lotes programados por navio

O processo de descarga está resulta da programação de chegada dos trens, alocação dos lotes nos pátios e fila de navios e sua importância justifica a proposição de um modelo de otimização e de apoio à gestão da programação de terminal. Atualmente, no terminal analisado, não há sistema de otimização de apoio à tomada de decisões dos gestores, que contam apenas com ferramentas básicas, suas experiências e conhecimento dos processos.

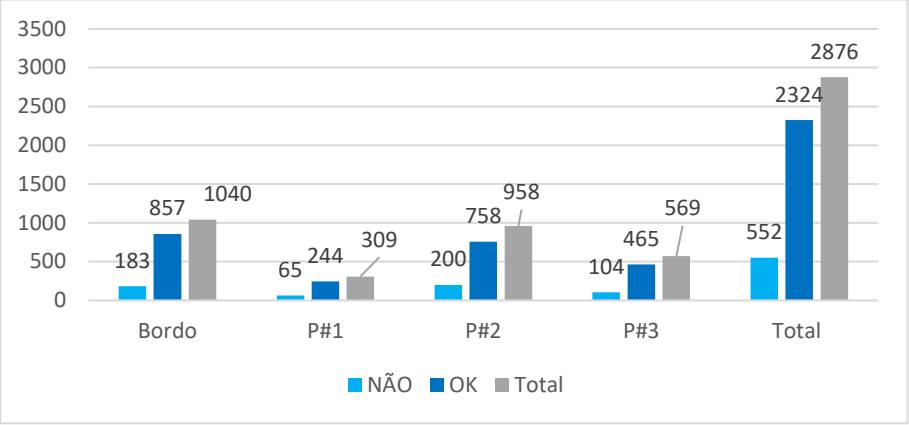
4.5.2. Aderência da Programação dos Pátios de Estocagem

A área de Programação e Controle da Produção (PCP) é responsável pela gestão da cadência dos trens, programação e alocação dos lotes direcionados para os pátios de estocagem ou para o embarque direto, quando houver oportunidade, ou seja, navio atracado e carga da mesma qualidade. A aderência corresponde a relação do que foi realizado igual ao programado.

O Centro de Controle Operacional (CCO) atende a programação do PCP, controlando as rotas e equipamentos utilizados na operação. O CCO auxilia o PCP na análise e nas decisões de programação ao manter contato direto com a operadora ferroviária e a agência de navegação, responsáveis pelos navios que serão carregados.

O Gráfico 5 mostra a quantidade de lotes programados por pátio e para bordo, bem como a sua aderência e os principais motivos que fizeram parte dos lotes serem reprogramados para outro destino no período de um ano.

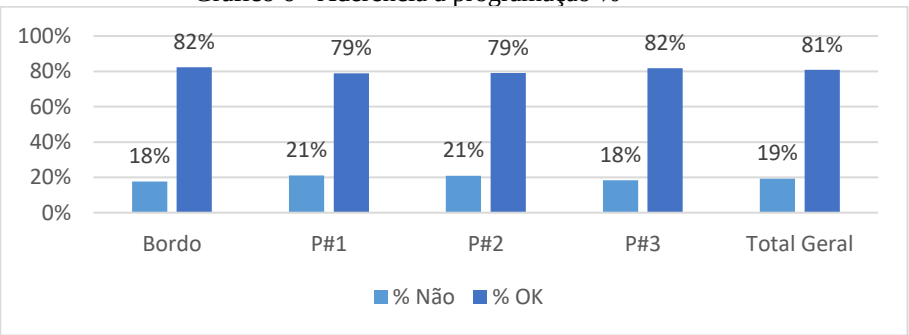
Gráfico 5 - Aderência à programação da descarga



O Gráfico 5 indica que foram programados 1.836 lotes para os pátios (63,8%) e 1.040 lotes para bordo (36,2%), o que supera a programação para empilhamento de cada pátio P1 (10,7%), P2 (33,3%) e P3 (19,7%).

Ao analisar o atendimento do programado de lotes (Gráfico 6), observou-se que 81% (2.324) tiveram aderência e 19% (552) foram reprogramados, sendo os lotes programados para bordo e para o pátio P#3 com maior aderência (82%), seguidos dos pátios P#1 (79%) e P#2 (79%).

Gráfico 6 - Aderência à programação %



A decisão de reprogramar determinado lote também é do PCP com base em diversos fatores. Dos 552 lotes reprogramados, apenas 492 (89%) lotes tiveram justificativas apontadas e 60 lotes (11%) não identificaram os motivos da reprogramação. As principais justificativas da não atendimento da programação foram:

a) decisão do CCO;
b) atraso no término do navio;
c) atraso na chegada de navio e de trem;
d) formação de carga incompleta para o navio;
e) início e término da descarga ou do embarque;

f) restrição operacional nas rotas e equipamentos;
g) baixo desempenho da descarga e do embarque;
h) execução de manutenção corretiva e preventiva;
i) área disponibilizada para manutenção preventiva;
j) bloqueio de rota por empilhamento e por recuperação;
k) eventos externos, condições climáticas e ocorrências fora dos limites do terminal;
l) decisão da mina, responsável pelo envio dos lotes ao porto, conforme qualidade especificada;
m) Preparação (*set up*) de equipamento de dupla modalidade, configuração para empilhamento ou recuperação;
n) decisão operacional, quando a equipe de operações identifica oportunidade de ganho ou restrição para operar*;*
o) decisão do PCP, alteração direta da programação estabelecida na busca de otimizar a descarga ou embarque;
p) qualidade do material fora do especificado, físico-química ou limite de umidade transportável (*Transportable Moisture Limit* - TML).

Os lotes transportados da mina ao porto seguem uma programação de descarga e um navio específico que será carregado. Ao alterar o planejamento e a programação dos lotes, o terminal terá que reprogramar seus processos para atender a essa demanda alterada, isso pode paralisar sua operação, inclusive, por falta de carga para determinado navio em fila ou falta de área para empilhar algum lote.

A tomada de decisão considera diversos fatores, como a busca de otimizar a descarga ou embarque e o atendimento das prioridades estabelecidas pelo terminal. Em um primeiro momento, a alteração da programação pode aparentemente trazer algum benefício ao processo, contudo, isso pode ocasionar perdas na produção anual.

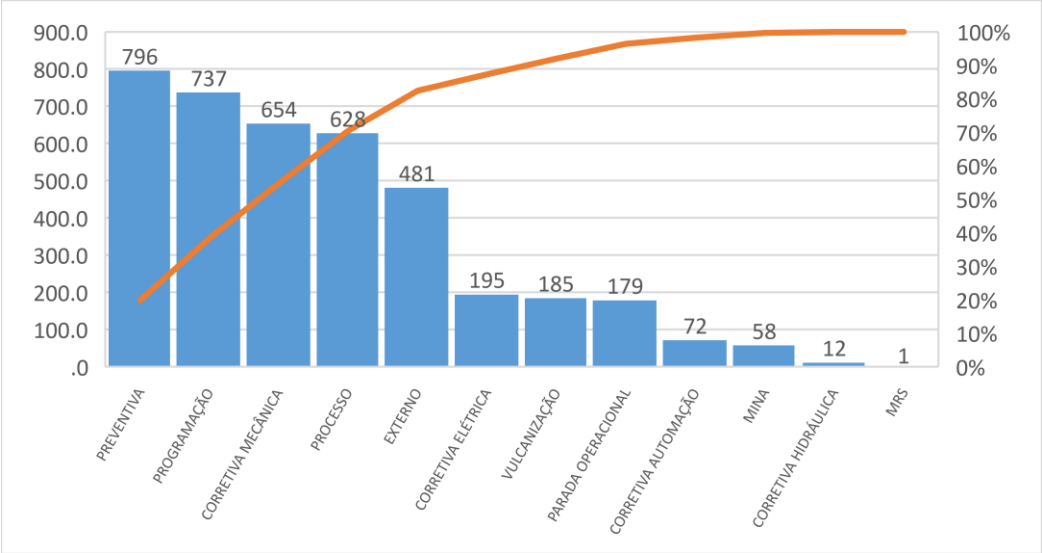
4.5.3. Impactos no Carregamento de Navios

O carregamento dos navios é o principal processo do terminal. Foram 4.763 horas de operação efetiva do C*N*, que representa 54% de sua utilização anual (Gráfico 7). Os impactos mais relevantes foram os eventos dos grupos de Manutenção preventiva (796 hs), Programação (737 hs), Manutenção corretiva mecânica (654 hs), Processo (628 hs) e Externo (481 hs). O embarque dos navios operou 56% do tempo com alguma restrição, não atingindo sua

capacidade plena de operação, o que aumentou o tempo de atendimento dos navios e, consequentemente, a fila e os gastos com *Demurrage*. Os principais motivos das restrições foram a necessidade de manutenção nos equipamentos (71%, 1857 hs), arqueação dos navios (8%, 205 hs) e por qualidade do material (TML 1%, 17 hs).

A manutenção preventiva representou 9,1% do tempo anual, com 93,6% de aderência. Chama atenção neste grupo, o tempo referente ao atraso na devolução do equipamento pela preventiva (40 hs) e falha na execução da manutenção (8 hs), tempo suficiente para carregar mais um navio em operação normal, média de 37 hs.

Gráfico 7 - Impactos do processo de embarque



O segundo grupo de maior impacto no processo de embarque foi a programação (737 hs), sendo o intervalo entre navios, o mais relevante (65%). Destacam-se também o tempo em que foi paralisado o embarque por umidade do material acima do TML (140 hs), píer ocioso por falta de navio (52 hs), troca de pilha ou material (60 hs) e intertravamento entre navios do carvão e minério ferro (32 hs).

As manutenções corretivas são eventos decorrentes de falhas nos equipamentos e máquinas repercutindo na confiabilidade dos processos. As manutenções corretivas por falha mecânica foram as mais significativas (654 hs), com destaque para a ocorrências por desalinhamento da correia transportadora (255 hs).

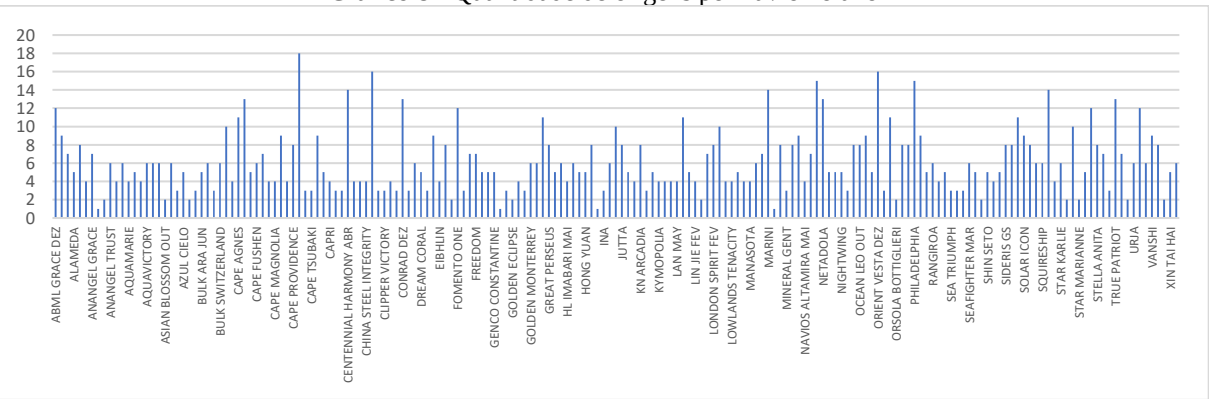
Os eventos do grupo Externo (428 hs) se referem a paralisações fora da responsabilidade direta do terminal, mas que influenciam a sua produtividade. Os principais eventos deste grupo Foram aguardar o início da manobra de desatracação (226 hs) e por motivos climáticos (144 hs), basicamente chuva e ventos fortes.

O canal marítimo de acesso ao terminal possui capacidade de navegação para apenas um navio por vez e é compartilhado com outros terminais. O agendamento das manobras de desatracação depende de regras de uso do canal, determinada pela Administração do Porto e pelo atendimento à programação da fila de navios. Se o embarque tiver bom desempenho e finalizar antes do previsto, o terminal aguardará a manobra pré-agendada, caso não seja possível antecipar o próximo navio. Se o término do carregamento atrasar, a manobra deverá ser reagendada e dependendo das prioridades e da fila de navios.

O grupo Mina (58 hs), embora de baixo impacto quando comparado a outros grupos de eventos, paralisou as operações de embarque de minério principalmente por aguardar formação de carga na mina (54 hs). Quando isso ocorre, um navio que está em fila precisa aguardar que sua carga esteja no terminal ou a caminho para iniciar o seu embarque, com relação direta com a programação de alocação dos lotes e com os gastos com *Demurrage*.

As origens que formam a carga de um navio são representadas por uma ou mais pilhas estocadas nos pátios e por uma origem dedicada aos lotes enviados direto a bordo, previamente estabelecidas na programação de descarga dos lotes. O Gráfico 8 apresenta em destaque a distribuição de alguns navios ao longo do ano e quantidade de origens utilizadas no embarque.

Gráfico 8 - Quantidade de origens por navio no ano



A análise das informações de controle dos navios atendidos no terminal ao longo do ano indicou que a quantidade média de origens utilizadas por navio (6,1) é superior a programada (4,6), refletindo diretamente a quantidade de lotes reprogramados. Quanto maior for a quantidade de origens utilizadas, menor tende a ser é o volume recuperado por pilha e maior é o tempo gasto com a movimentação dos equipamentos de pátio. Quanto menor for a quantidade de origens programadas, maior tende ser o reaproveitamento de material já estocado. Os lotes destinados a bordo sempre utilizarão apenas uma origem.

4.5.4. O Diagnóstico Operacional

Foram analisados dados de um ano dos processos e do desempenho operacional do terminal, identificando-se seus principais eventos, desde a chegada dos trens com minério de ferro até a manobra de saída dos navios carregados.

No sistema de descarga os eventos mais relevantes se referiram aos dos grupos de programação e mina, sobretudo os eventos de aguardando chegada de trem por responsabilidade do porto ou na mina, provocando ociosidade na operação. Outro evento importante o de manutenção corretiva e preventiva pelo longo tempo de utilização e baixa confiabilidade dos equipamentos, necessitando de manutenções mais frequentes.

A programação dos pátios de estocagem, que considera a chegada de trens e alocação dos lotes, apresentaram 81% de atendimento e 19% de reprogramações. Os lotes destinados a bordo superaram a de cada pátio, isso se deveu, na maioria das vezes, por restrição da capacidade de estocagem dos pátios, baixa confiabilidade das máquinas de pátio, problemas com qualidade no material e maior regularidade da operação com os viradores de vagão em relação as recuperadoras. Ao reprogramar seus processos, o terminal estará sujeito a paralisações por falta de carga de um navio específico e por falta de área para empilhar os lotes.

No embarque dos navios, os eventos mais significativos foram os dos grupos de manutenção preventiva, programação, manutenção corretiva mecânica, processo e externo. Na programação, identificou-se 60 hs utilizadas na troca de pilha ou material durante o carregamento do navio. A quantidade de horas despendida com troca de pilhas e translado das máquinas de pátio está diretamente relacionada com o número de origens programadas e realizadas no embarque (Tabela 4).

# Origens da Carga por Navio	Programada	Realizada
Média	4,6	6,1
Máximo	9,0	18,0
Mínimo	1,0	1,0
Desvio Padrão	1,8	3,3
Variância	3,3	11,1

Tabela 4 - Quantidade de origens programadas e realizadas por navio

Para cada navio em média são formadas 3,6 pilhas, porém, ao realizar o carregamento dos navios 5,1 pilhas são utilizadas, considerando que lotes descarregados para bordo sempre ocuparão uma origem.

Os pátios possuem restrições de capacidade, de rotas e de movimentação dos equipamentos e a formação e recuperação de muitas pilhas contribuem para o baixo desempenho da descarga de trens, da ocupação dos pátios e do carregamento dos navios. As principais consequências do uso de muitas pilhas, que este estudo busca resolver, são:

- aumento do tempo médio de descarga;
- menor volume descarregado;
- menor ocupação dos pátios e da capacidade de estocagem por pilha;
- maior tempo de paralisação por troca de pilhas e intertravamento de rota;
- maior necessidade de manutenção corretiva e dos custos com manutenção;
- menor volume embarcado e taxa comercial;
- maior tempo de atendimento dos navios;
- maior custo operacional e gastos com *Demurrage*.

A dificuldade do terminal em planejar e programar seus processos se apresenta nos tempos de ociosidade dos sistemas, necessidade de reprogramar as operações e no baixo desempenho do terminal. Atualmente, não se conta com sistema de apoio a tomada de decisões da programação, para o que este estudo pretende contribuir ao desenvolver e testar modelo otimizador de apoio à gestão de pátios e dos processos do terminal como um todo.

O modelo de otimização hierárquico proposto aborda problemas reais para decisões estratégicas da fila de navios e trens em conjunto, considerando a variação do estoque nos pátios e o fluxo de carregamento de navios como um dos dados de entrada do modelo. A experimentação do modelo utiliza parte de dados reais de tamanho de cargas de trens e navios, datas de chegada estimada (ETA) e datas esperadas para processar carregamentos e descarregamentos para período de um ano com dados mensais e diários observados.

4.6 O Gerenciamento de Pátio Integrado aos Processos Operacionais

As empresas do setor de mineração buscam gerenciar e otimizar seus processos de armazenagem, tanto em pátios nas plantas de beneficiamento quanto nos pátios de terminais portuários. Em alguns casos, a alocação e o gerenciamento de pátios de estocagem estão associados a restrições operacionais como incompatibilidade de rotas, eficiência no empilhamento e recuperação, características das pilhas e qualidade dos produtos, disponibilidade de equipamento, manutenções programadas e corretivas, entre outras.

Este estudo aborda problemas de gerenciamento de pátio de minério, integrado as decisões de alocação dos produtos, destinados às pilhas de estocagem ou para bordo, juntamente com as considerações das operações de descarga ferroviária e de carregamento dos navios.

A proposta de solução para os problemas de programação das operações e para o uso elevado de números de pilhas está estruturada em um modelo de otimização para auxiliar a tomada de decisões de alocação e recuperação dos produtos, com os objetivos de minimizar custos operacionais, de maximizar a ocupação dos espaços e dos equipamentos, assim como, melhorar o desempenho dos sistemas operacionais.

4.6.1. Caracterização Inicial dos Processos

Os produtos chegam em lotes em trens, com capacidades que variam entre 12.000 e 15.000 t/trem, até a estação de descarga. Viradores de vagões descarregam o minério de ferro e correias transportadoras em rotas programadas o movimentam para o empilhamento nos pátios de estocagem ou para o carregamento dos navios.

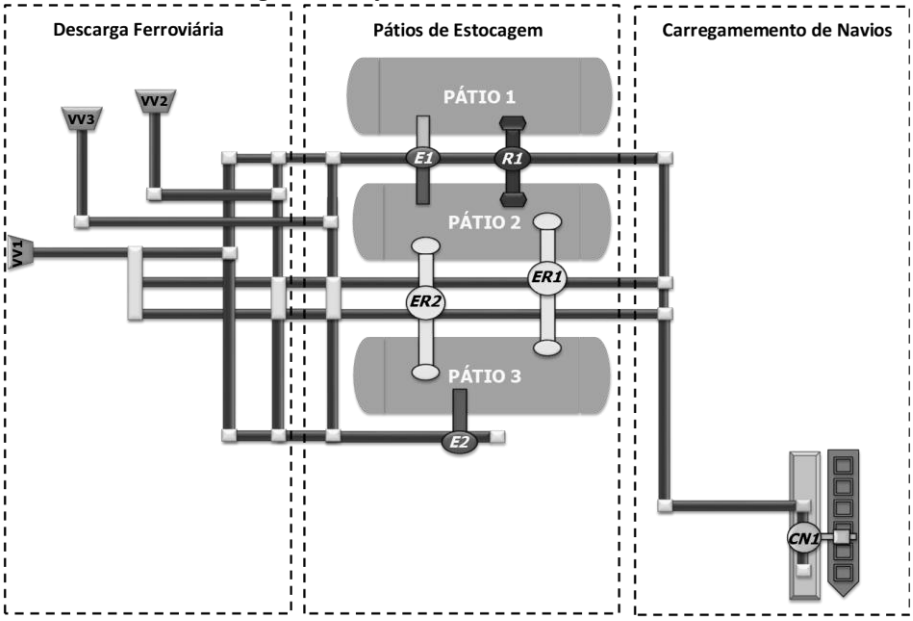
Depois que as pilhas estão alocadas e o estoque formado, processo que pode levar mais de um dia, o produto é recuperado do pátio para o carregamento de um navio, conforme programação. Os equipamentos e *layout* considerado para análise e desenvolvimento do modelo são apresentados na Tabela 5 e Figura 7.

Equipamento	**TAG**	**Área de Atendimento**
Virador de Vagões	VV1	Todos os Pátios
Virador de Vagões	VV2	Todos os Pátios
Virador de Vagões	VV3	Todos os Pátios
Empilhadeira	E1	Pátio P1 e P2
Empilhadeira	E2	Pátios P3
Empilhadeira-Recuperadora	ER1	Pátios P2 e P3
Empilhadeira-Recuperadora	ER2	Pátios P2 e P3
Recuperadora	R1	Pátios P1 e P2
Carregador de Navio	CN1	Berço Navios

Tabela 5 - Equipamentos de movimentação de carga

As pilhas de minério podem permanecer nos pátios de estocagem até que o navio programado e as instalações de berço estejam disponíveis para iniciar o carregamento. Há apenas um berço para carregamento dos navios. O agendamento de entrada e saída de navios deve respeitar a fila de uso do canal de navegação.

Figura 7 - Layout considerado no modelo



A capacidade diária de carregamento da quantidade dos trens nas minas e volume de produto é limitada. Espaços nos pátios de estocagem ou balizamentos possuem capacidades específicas. Dadas as restrições existentes, buscou-se verificar se combinações diferentes de alocação dos lotes nos pátios melhoram ou pioram a descarga nos viradores de vagão e o carregamento de navios.

4.6.2. Lógica da Descarga Ferroviária

Cada lote específico que chega ao terminal aguarda na fila seu momento de descarregar em qualquer um dos viradores existentes. Na chegada, existe uma linha de acesso a qualquer um dos viradores. Quando um virador de vagões está disponível e é programado para a descarga, o trem sai da fila e não retorna mais.

O sequenciamento dos trens se inicia no pátio ferroviário. Quando um determinado virador está próximo de finalizar a descarga de um trem, um outro é cadenciado e encaminhado para o terminal. O próximo trem pode se posicionar em sequência de outro, conforme programação.

Os trens devem chegar ao terminal de modo a garantir o balanço de massa entre a carga a ser descarregada e a carga a ser embarcada. Na possibilidade de descarregamento de trens direto para carregamento do navio, é avaliado se o produto atende ao do navio e se há disponibilidade de equipamento para que a operação seja realizada. O processo de estocagem é importante para correção da qualidade e melhoria de características físicas e químicas, como

também para atender uma logística operacional, de modo que evite filas e ociosidade de navios e trens.

Selecionados o trem e local no pátio, o virador é considerado ocupado e a descarga é realizada em duas etapas: a primeira vai do momento da saída do trem do pátio ferroviário até o posicionamento no VV, que já considera o tempo de manobra e circulação do trem; e a segunda vai do início da operação de descarga dos vagões até o término do último vagão, caracterizado como tempo total de descarga do trem.

4.6.3. Lógica do Planejamento e Alocação dos Estoques

O pátio é configurável em sua ocupação e capacidade por tipo de produto. Uma mesma área pode ser utilizada por mais de um produto, contudo, nunca simultaneamente. O modelo de otimização proposto considerou um padrão de pilha, tipo de produto e capacidade de estocagem para testar combinações de alocação dos produtos nos pátios.

Uma pilha não pode ser manipulada por dois equipamentos ao mesmo tempo. Pode haver combinação da recuperação simultânea com até dois equipamentos, desde que haja pilhas disponíveis e a capacidade limite de carregamento seja respeitada. Operação em quer o trem é descarregado e o produto direcionado para o carregamento do navio não ocorre concomitantemente à recuperação com um equipamento do pátio.

O modelo proposto não considera o conjunto de rotas do sistema. Neste caso, são analisadas as configurações de alocação dos produtos nos pátios, de acordo com os espaços vazios, de maneira a minimizar as distâncias entre as pilhas formadas com o mesmo tipo de produto e de translado das recuperadoras durante o carregamento de determinado navio.

4.6.4. Lógica da Chegada e Saída de Navios

Para que um navio seja atracado no terminal, é necessário a disponibilidade de berço para o carregamento, caso contrário o navio aguarda em fila na área de fundeio. A programação do carregamento deve garantir que um estoque mínimo de produtos esteja disponível nos pátios ou a caminho durante o atendimento do navio. O sequenciamento dos navios pode ser alterado, conforme disponibilidade de carga e projeção da incidência de gastos com *Demurrage*.

Apenas quando o navio finaliza a atracação, o seu tempo de espera em fila é finalizado. Quando um navio é atracado e liberado, ele aguarda um tempo de pré-operação até iniciar seu carregamento. Este tempo é necessário para finalizar as configurações dos sistemas, regularizar

documentação e para aguardar o material percorrer a rota do pátio até o píer. O início do carregamento se dá quando o produto começa a ser embarcado no navio.

A gestão do pátio procura a pilha com o produto e o equipamento de recuperação, que utiliza uma rota designada para o C*N*, sempre buscando maximizar a sua utilização. Durante a operação de embarque, uma quantidade de produto pode ser enviada a partir do VV. Neste caso, se configura trem a bordo ou embarque direto. Uma vez finalizado o carregamento, o CN é liberado e o navio aguarda um tempo de pós-operação para iniciar a operação de manobra de desatracação. Somente após a manobra de desatracação terminada, o navio é dado como finalizado e o berço é liberado para o próximo navio.

4.6.5. Lógica da Programação de Embarque

Cada navio tem, em função de sua capacidade, uma distribuição de número de porões e carga disponível, que podem ser de mais de um produto. O modelo proposto é simplificado e não considerou diferentes planos de carregamento. Na prática, é atribuída uma linha de embarque, respeitando uma capacidade máxima do sistema. O modelo utilizou o conceito de taxa comercial, que considera o tempo penalizado com a paralisações dos processos durante o atendimento do navio.

Caso o navio tenha atracado e sua carga esteja incompleta no pátio, situação rotineira e possível, este pode aguardar por embarque direto no berço. Ao recuperar por completo uma pilha, o espaço, ou seja, balizamento, é imediatamente liberado para a alocação de outro produto a ser empilhado.

O modelo buscou o número otimizado de balizas necessárias para descarregar determinada quantidade de produto, específico para formar a carga de um navio para reduzir os tempos de descarga dos trens e carregamento dos navios, maximizar a ocupação dos pátios, e reduzir os custos operacionais.

5 MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA GESTÃO INTEGRADA DE TERMINAL PORTUÁRIO

O modelo de otimização hierárquico proposto foi desenvolvido por meio da integração de dois modelos, um estratégico e um tático, utilizando técnicas Programação Linear (PL), para resolver problemas reais. O modelo para decisões estratégicas otimizou a programação e sequenciamento da fila de navios e trens em conjunto, considerando a variação do estoque nos pátios e o fluxo de carregamento de navios como um dos dados de entrada do modelo, assim minimizando os gastos com *Demurrage*.

O modelo para decisões táticas dos pátios realizou a alocação e retomada dos produtos para minimizar o tempo não operacional e garantir estoque durante o carregamento do navio, consequentemente, reduzindo o tempo na recuperação e tempo total de atendimento do navio. Os dados de sequenciamento de navios e trens são utilizados para designar a origem e destino, ou seja, cada baliza para um navio e cada carga de trem para uma baliza ou direto para bordo.

Em outras palavras, os modelos selecionaram para uma origem representada pelo par virador-produto, o melhor destino possível, isto é, qual o pátio e baliza estão disponíveis para a operação, e que seriam a melhor escolha naquele momento para descarregar e empilhar a carga de um trem em fila. A mesma consideração foi feita para uma origem representada pelo par pátio-baliza, que seria a melhor escolha naquele momento para recuperar e carregar o produto no navio.

O modelo foi implementado na linguagem de programação *Python*, utilizando as bibliotecas do *Solver* Gurobi para a realização da otimização com o método de *Branch and Bound*. O modelo tratou problemas no nível tático e no estratégico. A decisão no nível tático propicia aos tomadores de decisão do nível operacional mais flexibilidade e previsibilidade (KIM, KOO e PARK, 2009).

5.1 Modelo de Sequenciamento de Trens e Navios

O modelo otimizou a programação e sequenciamento da fila de navios e trens em conjunto, considerando estoque, movimentação dos produtos e equipamentos de pátio como um dos dados de entrada do modelo, assim reduzindo gastos com *Demurrage*. Este modelo visou otimizar programações com horizonte de até 30 dias de operação.

Índices:

i	índice de navio *i* = 1, 2, ..., *N;*
n	índice de posição na fila de navios *n* = 1º, 2º, ..., Nº;
m	índice de posição na fila de trens;
v	índice de virador*;*
d	índice de dia de trabalho;
t	índice de trem;
p	índice de produto.

Parâmetros:

B	Número infinitamente grande;
N	Quantidade de navios;
V	Quantidade de viradores disponíveis para descarregamento de trens;
M	Quantidade de trens atendidos por virador*;*
T	Quantidade de trens atendidos por dia;
D	Quantidade de dias no horizonte de planejamento;
P	Quantidade de produtos;
$CDemurrage_i$	Gastos com *Demurrage* do navio *i;*
$CDespatch_i$	Prêmio de *Despatch* do navio *i;*
TT_i	Tempo total de carregamento do navio *i;*
ETA_i	Data de disponibilidade do navio *i* para início de carregamento;
Turn Time_i	Tempo administrativo consumido pelo navio *i;*
TD_i	Tempo disponível para o navio *i* finalizar carregamento sem ser penalizado com *Demurrage*;
TT_{td}	Tempo gasto com descarregamento do trem *t* no dia *d;*
ETA_t	Data de disponibilidade do trem *t* para início de descarregamento;
DataDispT_{td}	Data limite para trem *t* do dia *d* finalizar seu descarregamento;
CargaNavio_{pi}	Carga do produto *p* no navio *i;*
CargaTrem_{ptd}	Carga do produto *p* no trem *t* do dia *d;*
EstoquePátio_p	Estoque do produto *p* no pátio no início do planejamento;

TDesat	Tempo médio do navio para desatracar do terminal a partir do término do carregamento.

Variáveis de decisão relacionadas aos navios:

T*Demurrage*$_i$	Tempo usado de *Demurrage* no navio *i;*
T*Despatch*$_i$	Tempo usado de *Despatch* no navio *i;*
DIC_n	Data início carregamento posição *n* da fila de navios;
DTC_n	Data término carregamento posição *n* da fila de navios;
DIC_i	Data início carregamento navio *i;*
DTC_i	Data término carregamento navio *i;*
$Folga1_DTC_{in}$	Variável de folga;
$Folga2_DTC_{in}$	Variável de folga;
Y_{in}	Variável binária igual a 1 se o navio *i* ocupa a posição *n* da fila de navio, 0 caso contrário.

Variáveis de decisão relacionadas aos trens:

Y_{mvdt}	Variável binária igual a 1 se o trem *t* ocupa a posição *m* na fila de trens do virador *v* no dia *d*, o caso conatrário*;*
$DIDesc_{mvd}$	Data de início de descarregamento do trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d;*
$DTDesc_{mvd}$	Data de término de descarregamento do trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia d.

Variáveis de decisão relacionadas ao relacionamento dos trens e navios, estoque disponível e carregamentos: **ETA Trem**

$EDPI_{pn}$	Estoque disponível no pátio do produto *p* no início do carregamento do navio na posição *n* da fila de navios;
$CargaProg_{pn}$	Carga do produto *p* no navio da posição *n* da fila de navios;
Qnt_{pn}	Quantidade de produto *p* descarregado pelos trens durante a execução de carregamento do navio alocado na posição *n;*

$\mathrm{CargaProgTrem}_{\mathrm{pmvd}}$ Carga do produto *p* no navio da posição *m* do virador *v* no dia d.

Variáveis de decisão para apoio e linearização do modelo:

$\mathrm{Bin_TD}_{\mathrm{mvdn}}$	Binária igual a 1 se o produto do trem descarregado na posição *m* do virador *v* no dia *d* está disponível para navio da posição *n* até o término do carregamento do navio, 0 caso contrário;
$\mathrm{FG_Sup_TD}_{\mathrm{mvdn}}$	Variável de folga positiva, indica que o trem terminou de descarregar antes do término do navio *n;*
$\mathrm{FG_Inf_TD}_{\mathrm{mvdn}}$	Variável de folga negativa, indica que trem terminou de descarregar após do término do navio *n;*
$\mathrm{CargaD}_{\mathrm{pmvdn}}$	Carga do produto *p* do trem descarregado na posição *m* do virador *v* no dia *d* disponível para navio da posição *n* até o término do carregamento do navio;
$\mathrm{Folga_I_CargaD}_{\mathrm{pmvdn}}$	Variável de Folga para cálculo do CargaDpmvd*n;*
$\mathrm{Folga_S_CargaD}_{\mathrm{pmvdn}}$	Variável de Folga para cálculo do CargaDpmvdn.

Função Objetivo:

$$\min \sum_{n=1}^{N} \mathrm{T}Demurrage_{\mathrm{i}} * \mathrm{C}Demurrage_{\mathrm{i}} - \sum_{i=1}^{N} \mathrm{T}Despatch_{\mathrm{i}} * \mathrm{C}Despatch_{i}$$

Restrições relacionadas aos Navios:

$$DTC_n - DIC_n = \sum_{i=1}^{N} \mathrm{Y_{in}} * \mathrm{TT_i} \qquad \forall n \in \{1, N\} \qquad \text{N1}$$

$$DIC_n \geq DTC_{n-1} \qquad \forall n \in \{2, N\} \qquad \text{N2}$$

$$\sum_{i=1}^{N} Y_{in} = 1 \qquad \forall n \in \{1, N\} \qquad \text{N3}$$

$$\sum_{n=1}^{N} Y_{in} = 1$$
$$\forall i \in \{1, N\} \qquad \text{N4}$$

$$DIC_n \geq \sum_{i=1}^{N} Y_{in} * ETAi$$
$$\forall n \in \{1, N\} \qquad \text{N5}$$

$$(ETA_i + Turntime_i + TD_i) + \mathrm{T}Demurrage_i = DTC_i + \mathrm{T}Despatch_\mathrm{i}$$
$$\forall i \in \{1, N\} \qquad \text{N6}$$

$$DTC_i - DIC_i = TT_i$$
$$\forall i \in \{1, N\} \qquad \text{N7}$$

$$DTC_i - DTC_n + \mathrm{Folga1DTC_{in}} - \mathrm{Folga2DTC_{in}} = 0$$
$$\forall n, i \in \{1, N\} \qquad \text{N8}$$

$$(\mathrm{Folga1DTC_{in}} + \mathrm{Folga2DTC_{in}}) \leq \mathrm{B}(1 - \mathrm{Y_{in}})$$
$$\forall n, i \in \{1, N\} \qquad \text{N9}$$

$$\mathrm{YCi, n} = (\mathrm{Bin} - 0 \text{ ou } 1)$$
$$\forall n, i \in \{1, N\} \qquad \text{N10}$$

$$\mathrm{Folga1_{DTC_{in}}}, \mathrm{Folga2_{DTC_{in}}}, DTC_i, DIC_i, DTC_n, DIC_n, \mathrm{T}Demurrage_i, \mathrm{T}Despatch_{\mathrm{i}} \geq 0$$
$$\forall n, i \in \{1, N\} \qquad \text{N11}$$

A restrição N1 garante que a diferença entre o início e o fim do carregamento do navio na posição *n* da fila deve ser o tempo total estimado do carregamento. A N2 mantém o fluxo do tempo de início e fim de carregamento do navio na posição *n* na Fila. A N3 e N4 garantem o fluxo da fila de navios. A N5 garante que a data de início de carregamento de um navio seja somente após seu ETAi. A N6 é uma função linearizada para cálculo de tempo utilizado em *Despatch* e *Demurrage*. A N7, N8 e N9, baseado na data de término de carregamento DTCn do navio na posição *n* do navio, definem a data de término do carregamento DTCi do navio *i* que

ocupa a posição *n* da fila. Já as restrições N10 e N11 são restrições que garante o tipo de variável.

Restrições relacionadas aos Trens:

$$DTDesc_{mvd} - DIDesc_{mvd} = \sum_{t=1}^{T} TT_{td} * Y_{tmvd}$$
$$\forall m \in \{1, M\}, \forall v \in \{1, V\}, \forall d \in \{1, D\} \qquad \text{T1}$$

$$DIDesc_{mvd} + \left(1 - \sum_{t=1}^{T} Y_{tmvd}\right) \geq DTDesc_{(m-1)vd}; \forall m > 1$$
$$\forall m \in \{2, M\}, \forall v \in \{1, V\}, \forall d \in \{1, D\} \qquad \text{T2}$$

$$\sum_{m=1}^{M} \sum_{v=1}^{V} Y_{tmvd} = 1$$
$$\forall t \in \{1, T\}, \forall d \in \{1, D\} \qquad \text{T3}$$

$$\sum_{t=1}^{T} T_{tmvd} = 1$$
$$\forall m = 1, \dots, M; \forall v = 1, \dots, V; \forall d = 1, \dots, D \qquad \text{T4}$$

$$\mathrm{DIDesc_{mvd}} \geq \sum_{t=1}^{T} Y_{tmvd} * ETA_{td}$$
$$\forall m = 1, \dots, M; \forall v = 1, \dots, V; \forall d = 1, \dots, D \qquad \text{T5}$$

$$\mathrm{DTDesc_{mvd}} \leq \sum_{t=1}^{T} Y_{tmvd} * \mathrm{DataDispT_{td}}$$
$$\forall m = 1, \dots, M; \forall v = 1, \dots, V; \forall d = 1, \dots, D \qquad \text{T6}$$

$$\sum_{t=1}^{T} Y_{tmvd} \leq \sum_{t=1}^{T} Y_{t(m-1)vd}$$
$$\forall m \in \{2, M\}, \forall v \in \{1, V\}, \forall d \in \{1, D\} \qquad \text{T7}$$

$$\mathrm{Ytmvd} = (\mathrm{Bin} - 0 \text{ ou } 1); \mathrm{DTDesc_{mvd}}, \mathrm{DIDesc_{mvd}} \geq 0$$
$$\forall m = 1, \dots, M; \forall v = 1, \dots, V; \forall d = 1, \dots, D; \forall t = 1, \dots, T \qquad \text{T8}$$

A restrição T1 garante que a diferença entre a data de início e fim do descarregamento do trem na posição *m* do virador *v* no dia *d* seja igual ao tempo total gasto no descarregamento do trem *t* no dia *d* alocado nesta posição. A T2 garante o fluxo de tempo. A T3 e T4 garantem o fluxo da fila. A T5 permite o início de descarregamento de trem somente após seu ETAt e a T6 obriga o descarregamento do trem ocorrer dentro do prazo, T7 garante fluxo da fila nos viradores e T8 representa tipo de variáveis.

Os fatores de integração entre as duas filas, navios e trens, são suas respectivas cargas e disponibilidade de estoque, sendo considerado estoque no pátio e estoque em trânsito, nos trens programados, de forma que um trem programado para finalizar o descarregamento durante o carregamento de um navio pode ter seu estoque alocado diretamente no navio sem passar pelo pátio.

Restrições de integração de sequenciamento de trens e navios:

$$\mathrm{EDPI_{pn}} + \mathrm{Qnt_{pn}} - \mathrm{CargaProg_{pn}} >= 0$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\} \qquad \text{TN1}$$

$$\mathrm{CargaProg_{pn}} = \sum_{i=1}^{N} \mathrm{Y_{in}} * \mathrm{CargaNavio_{pi}}$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\} \qquad \text{TN2}$$

$$\mathrm{CargaProgTrem_{pmvd}} = \sum_{t=1}^{T} \mathrm{Y_{tmvd}} * \mathrm{CargaTrem_{ptd}}$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{m} \in \{1, \mathrm{M}\}; \forall \mathrm{v} \in \{1, \mathrm{V}\}; \forall \mathrm{d} \in \{1, \mathrm{D}\} \qquad \text{TN3}$$

$$\mathrm{EDPI_{pn}} = \mathrm{EstoquePátio_{p}}$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \mathrm{n} = 1 \qquad \text{TN4}$$

$$\mathrm{EDPI_{pn}} = \mathrm{EDPI_{p(n-1)}} + \mathrm{Qnt_{p(n-1)}} - \mathrm{CargaProg_{p(n-1)}}$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{n} \in \{2, \mathrm{N}\} \qquad \text{TN5}$$

$$\mathrm{Qnt_{pn}} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{v=1}^{V} \sum_{d=1}^{D} \mathrm{CargaD_{pmvdn}}$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \mathrm{n} = 1 \qquad \text{TN6}$$

$$\mathrm{Qnt_{pn}} = \left(\sum_{m=1}^{M} \sum_{v=1}^{V} \sum_{d=1}^{D} \mathrm{CargaD_{pmvdn}} - \sum_{k=1}^{n-1} \mathrm{Qnt_{p[k]}} \right)$$
$$\forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{n} \in \{2, \mathrm{N}\} \qquad \text{TN7}$$

$$\mathrm{DTC_n} - (\mathrm{TDesat}) - \mathrm{DTDesc_{mvd}} - \mathrm{FGSupTD_{mvdn}} + \mathrm{FGInfTD_{mvdn}} = 0$$
$$\forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\}; \forall \mathrm{m} \in \{1, \mathrm{M}\}; \forall \mathrm{v} \in \{1, \mathrm{V}\}; \forall \mathrm{d} \in \{1, \mathrm{D}\} \qquad \text{TN8}$$

$$\mathrm{FGSupTD_{mvdn}} \leq \mathrm{B} * \mathrm{BinTD_{mvdn}}$$
$$\forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\}; \forall \mathrm{m} \in \{1, \mathrm{M}\}; \forall \mathrm{v} \in \{1, \mathrm{V}\}; \forall \mathrm{d} \in \{1, \mathrm{D}\} \qquad \text{TN9}$$

$$\mathrm{CargaD_{pmvdn}} - \mathrm{CargaProgTrem_{pmvd}} + \mathrm{BinTD_{mvdn}} - \mathrm{FolgaSCargaD_{pmvdn}} + \mathrm{FolgaICargaD_{pmvdn}} = 1$$
$$\forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\}; \forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{m} \in \{1, \mathrm{M}\}; \forall \mathrm{v} \in \{1, \mathrm{V}\}; \forall \mathrm{d} \in \{1, \mathrm{D}\} \qquad \text{TN10}$$

$$\mathrm{FolgaSCargaD_{pmvdn}} \leq \mathrm{B} * (1 - \mathrm{BinTD_{mvdn}})$$
$$\forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\}; \forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{m} \in \{1, \mathrm{M}\}; \forall \mathrm{v} \in \{1, \mathrm{V}\}; \forall \mathrm{d} \in \{1, \mathrm{D}\} \qquad \text{TN11}$$

$$\mathrm{FolgaICargaD_{pmvdn}} \leq \mathrm{B} * (1 - \mathrm{BinTD_{mvdn}})$$
$$\forall \mathrm{n} \in \{1, \mathrm{N}\}; \forall \mathrm{p} \in \{1, \mathrm{P}\}; \forall \mathrm{m} \in \{1, \mathrm{M}\}; \forall \mathrm{v} \in \{1, \mathrm{V}\}; \forall \mathrm{d} \in \{1, \mathrm{D}\} \qquad \text{TN12}$$

$$EDPI_{pn}, CargaProg_{pn}, Qnt_{pn}, CargaProgTrem_{pmvd}, FGSupTD_{mvdn} \geq 0$$
$$FGInfTD_{mvdn}, CargaD_{pmvdn}, FolgaICargaD_{pmvdn}, FolgaSCargaD_{pmvdn} \geq 0$$
$$BinTD_{mvdn} = (\mathrm{Bin} - 0 \text{ ou } 1) \qquad \text{TN13}$$

A coesão do estoque no pátio com a quantidade carregada nos navios é garantida pela restrição TN1. A TN2 calcula a carga de produto *p* a ser carregada no navio da posição n. A TN3 calcula a carga de produto *p* descarrega na posição m, do virador *v*, no dia d. A TN4 garante que a variável de estoque disponível no pátio no início de carregamento do primeiro navio seja equivalente ao estoque inicial no pátio. A TN5 estima o estoque no pátio baseado no carregamento programado de saída e entradas de produtos até o momento do carregamento do navio. As restrições TN6 e TN7 estimam a quantidade de produtos no pátio até o momento do carregamento do navio. As restrições TN8 e TN9 conferem as datas de carregamento dos navios e descarregamento dos trens para verificar se as cargas dos trens estarão disponíveis no pátio durante o carregamento do navio.

As restrições TN10, TN11 e TN12 são restrições disjuntivas que indicam se a binária Bin_TDmvdn for igual a 1, o carregamento do trem nos índices *mvd* está disponível para o navio na posição de índice n. Por fim, a restrição TN13 indica o tipo de dado de cada variável

5.2 Modelo de Otimização de Pátios

O modelo objetivou planejar a organização ótima do pátio, de modo a melhorar o processo de escolha de balizas a serem recuperadas para navios e balizas para receberem cargas dos trens, organizando o pátio para seu melhor uso. Para tanto, este modelo tem dois objetivos:

a) o primeiro: Minimizar os tempos esperados com a efetiva recuperação dos produtos e com o translado das recuperadoras sem produção, quando se finaliza uma pilha e o equipamento precisa encontrar em outra posição o produto para continuar o carregamento do navio, e em seguida, organiza o pátio para obter melhor ocupação, indicando as melhores balizas para empilhar os produtos descarregados dos trens e para serem recuperados durante o embarque;
b) o segundo: Relacionado a escolha das balizas para alocar o descarregamento dos trens, minimizar o tempo gasto empilhando produto no pátio e minimizar acréscimo de tempo de translado esperado das recuperadoras, definido como o tempo esperado que a recuperadora gastaria simplesmente transladando da pilha alocada até uma outra mais próxima com o mesmo tipo produto.

A programação da fila de trens e navios, assim como o mapa do pátio no início no horizonte de planejamento, são os principais dados de entrada do modelo para fazer o planejamento do pátio. É considerado que produtos diferentes devem ficar afastados pela distância de uma baliza.

A parametrização do modelo considerou que, se no início do carregamento do navio há produto suficiente no pátio, então é recuperado somente produtos do pátio. Caso contrário, o modelo de sequenciamento dos trens e navios entende que durante o tempo de carregamento do navio chegará trens o suficiente para atender a toda demanda. Assim, a carga recuperada do pátio para um navio equivale a carga programada para o navio menos a soma das cargas programadas para chegar de trem durante a recuperação de produto, dando prioridade para o transbordo direto do produto do trem ao navio.

Operacionalmente, na situação de transbordo direto ao navio, se trens tiverem de descarregar simultaneamente, o de maior carga é descarregado direto a bordo e o de menor para

uma pilha temporária no pátio, para em seguida ser recuperada. Trens com produtos diferentes da carga do navio que está sendo carregado serão alocados no pátio normalmente.

Nos índices do modelo, é considerado N+1 navios, variando de 0 a *N*, onde "0" indica um momento antes do carregamento de qualquer navio e "1, 2, ..., N" indicam um navio específico. Considerou-se que apenas dois equipamentos de recuperação podem atuar simultaneamente, nunca em uma mesma baliza ao mesmo tempo, e que no início do carregamento de um navio estarão disponíveis todas as balizas com produto no pátio somadas as balizas que há trens descarregando, isto é, trens que chegam antes do início do carregamento do navio e terminam durante. Desta forma, toda a carga no pátio é garantida para recuperação.

Índices:

l	índice de pátio;
b	índice de baliza;
p	índice de produto;
n	índice navio para n de 0 a N, onde n = 1, 2, ..., n indicam um navio específico e n = 0 indica nenhum navio, ou antecede a todos os navios;
t	índice de trem;
r	índice de Recuperadora;
m, m'	índice de posição na fila do virador que trem é descarregado;
v, v'	índice de virador;
d	índice do dia em que o trem ocupa uma posição na fila do virador;

Parâmetros:

TL	Quantidade total de pátios;
TB	Quantidade total de balizas por pátio;
TP	Quantidade total de produtos;
M	Quantidade de posições na fila do virador;
V	Quantidade de viradores operantes;
D	Quantidade de dias com trens realizando entregas no horizonte de planejamento;
B	Número infinitamente grande;

$EstoqueInicioPátio_{lbp}$	Estoque inicial no pátio *l* na baliza *b* com o produto p;
K_l	Capacidade de armazenamento de cada baliza no pátio l;
$CargaRecuperada_{np}$	Carga que será recuperada diretamente do pátio para o navio *n* do produto p;
$CargaRecuperadaTrem_{np}$	Carga descarregada dos trens embarcadas diretamente no navio *n* com o produto p;
$CargaRecuperadaTremPátio_{np}$	Carga descarregada dos trens, alocada temporariamente no pátio, e recuperada para o navio *n* com o produto p;
DIC_n	Data de início de carregamento do navio *n*, para *n* >= 1;
DTC_n	Data de término de carregamento do navio *n*, para *n* >= 1;
F_{lbr}	Parâmetro binário igual a 1 se no pátio *l* na baliza *b* a recuperadora *r* não puder atuar em atividade de recuperação, 0 caso contrário;
$CargaAlocada_{mvdp}$	Carga do produto *p* no trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* a ser alocada no pátio;
$BcargaAlocada_{mvdp}$	Binária igual a 1 se não há carga a ser alocada do produto *p* do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d*, 0 caso haja;
$DTDesc_{mvd}$	Data de térmi descarga do trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d;*
$DIDesc_{mvd}$	Data de início de descarga do trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d;*
$TXRecup_r$	Taxa comercial de recuperação da recuperadora *r;*
TXEmbTrem	Taxa comercial para descarga de trem direto do virador para o navio;
CBaliza	Comprimento médio de uma baliza;
VM_r	Velocidade média de translação da recuperadora *r;*
TEmp	Tempo médio gasto empilhando uma baliza;
α e β	Pesos de importância dada a cada objetivo.

Variáveis de decisão:

$EstoqueInicial_{lbnp}$	Estoque no pátio *l*, baliza *b* com produto *p* no início do carreamento do navio *n*, onde *n* = 0 indica o estoque antes de iniciar carregamento de qualquer navio;
$EstoqueFinal_{lbnp}$	Estoque no pátio *l*, baliza *b* com produto *p* ao término do carregamento do navio *n;*
$EstoqueReferenciaParaTrem_{lbpmvd}$	Quantidade de produto *p* no pátio *l* na baliza *b*, de referência do mapa do pátio, para o trem na posição *m* do virador *v* no dia *d* em seu instante de chegada ao pátio. A variável é utilizada para

	verificar onde não pode haver alocação, a fim de evitar contaminação entre produtos diferentes;
$Qrecuperada_{rlbpn}$	Quantidade recuperada pela recuperadora r, no pátio *l*, na baliza *b* com produto *p* para o navio *n;*
$Brecuperada_{rlbpn}$	Binária igual a 1 caso haja quantidade recuperada pela recuperadora r, no pátio *l*, na baliza *b* com produto *p* para o navio *n*, 0 caso contrário;
$QchegueTremParaEstocar_{lbpn}$	Quantidade de produto *p* que chegará de trens durante o carregamento do navio *n* para ser alocado no pátio *l* na baliza b;
$QchegueDeCadaTremParaEstocar_{lbpnmvd}$	Quantidade de produto *p* que chegará de trens na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* durante o carregamento do navio *n* para ser alocado no pátio *l* na baliza b;
$Qalocada_{lbpmvd}$	Quantidade de produto *p* alocado no pátio *l* na baliza *b* do trem que ocupa a posição *m* da fila do virador *v* no dia *d;*
$Balocada_{lbpmvd}$	Binária igual a 1 se produto *p* foi alocado no pátio *l* na baliza *b* do trem que ocupa posição *m* da fila do virador *v* no dia *d;*
$BbalizaIndisp_{lbpmvd}$	Binária igual a 1 se a baliza *b* no pátio *l* não puder ser ocupada pelo produto *p* do trem na posição *m* do virador *v* no dia *d*, por estar ocupada por outro produto ou respeitar uma baliza de segurança entre produtos diferentes, 0 caso contrário;
$BTD_{lbpmvdm'v'}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* está descarregando produto na baliza *b* no pátio *l* produto *p* e seu descarregamento inicia enquanto o trem na posição m' da fila do virador v' do dia *d* já está descarregando, 0 caso contrário;
$BbalizaIndispPorTremJaTrabalhando_{lbpmvd}$	Binária igual a 1 se a baliza *b* no pátio *l* estiver indisponível para o trem na posição *m* do virador *v* do dia *d* por haver outro trem descarregando o produto p;
$BTIAIN_{nmvd}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* inicia a descarga antes do início do carregamento do navio *n*, 0 caso contrário;
$BTTATN_{nmvd}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* termina a descarga antes do término do carregamento do navio *n*, 0 caso contrário;
$BTTDIN_{nmvd}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* termina a descarga depois do término do carregamento do navio *n*, 0 caso contrário;
$BCTN_{nmvd}$	Binária igual a 1 se a carga do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* puder ser considerada

	disponível no pátio para o navio *n* em seu início de carregamento;
$BTDDCN_{nmvd}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* inicia e termina descarregamento durante o carregamento do navio *n*, 0 caso contrário;
$BMT_{mvdm'v'}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* inicia a descarga enquanto o trem na posição m' do virador v' no dia *d* está descarregando, 0 caso contrário;
$BIAT_{mvdm'v'}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* inicia a descarga antes do término do trem na posição m' do virador v' no dia *d*, 0 caso contrário;
$BIDI_{mvdm'v'}$	Binária igual a 1 se o trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* inicia a descarga depois do início do trem na posição m' do virador v' no dia *d*, 0 caso contrário.

Variáveis para cálculo de tempo de trabalho no pátio:

BE_{rbn}	Binária igual a 1 se o acúmulo da quantidade recuperada do pátio da baliza 1 para a *b* do navio *n* pela recuperadora *r;*
BD_{rbn}	Binária igual a 1 se o acúmulo da quantidade recuperada do pátio da baliza *b* para a TB do navio *n* pela recuperadora *r;*
QT_{rn}	Quantidade de balizas por onde a recuperadora r translada durante carregamento do navio *n;*
W_n	Binária igual a 1 se recuperadora 1 gasta mais tempo com translado e recuperação que a recuperadora 2, 0 caso contrário.
T_{rn}	Tempo gasto com translado e recuperação pela recuperadora r durante carregamento do navio *n;*
TT_n	Tempo total associado ao navio *n* gasto com a recuperação e translado da recuperadora.

Variáveis para estimar o tempo esperado de acréscimo na atividade de recuperação:

$BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}$	Binária igual a 1 se a baliza *b* no pátio *l* na chegada do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* não está carregada com o produto *p*, 0 caso contrário;
$AcumEsquerda_{lbpmvd}$	Quantidade de balizas até a última pilha de produtos no pátio, quando se analisa o pátio *l* da baliza 1 até a *b* no início do descarregamento do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* com o produto *p*, 0 caso contrário;
$AcumDireita_{lbpmvd}$	Quantidade de balizas até a última pilha de produtos no pátio quando se analisa o pátio *l* da baliza *b* até a TB no início do descarregamento do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* com o produto *p*, 0 caso contrário;

$\text{BacumEsquerda}_{\text{lbpmvd}}$	Binária igual a 1 se a quantidade de balizas até a última pilha de produtos no pátio quando se analisa o pátio *l* da baliza 1 até a *b* no início do descarregamento do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* com o produto *p* pode ser considera na estimativa de acréscimo de tempo para recuperadora, 0 caso contrário;
$\text{BacumDireita}_{\text{lbpmvd}}$	Binária igual a 1 se a quantidade de balizas até a última pilha de produtos no pátio quando se analisa o pátio *l* da baliza *b* até a TB no início do descarregamento do trem na posição *m* na fila do virador *v* no dia *d* com o produto *p* pode ser considera na estimativa de acréscimo de tempo para recuperadora, 0 caso contrário;
$\text{DistemBalizas}_{\text{lbpmvd}}$	Quantidade de balizas com distância até a pilha mais próxima da baliza *b* no pátio *l* em que foi alocado o carregamento do produto *p* vindo no trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d;*
$\text{WDistemBalizas}_{\text{lbpmvd}}$	Binária usada para calcular DistemBalizas_lbpmvd e é igual a 1 se AcumDireita_lbpmvd >= AcumEsquerda_lbpmvd para a baliza *b* no pátio *l* em que foi alocado o carregamento do produto *p* vindo no trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d*, 0 caso contrário;
$\text{TempoEsperado}_{\text{mvd}}$	Tempo relacionado ao distanciamento das pilhas alocadas no pátio e as balizas em que o trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* descarrega o produto *p;*
$\text{TEPorRecup}_{\text{rmvd}}$	Tempo relacionado ao distanciamento das pilhas alocadas no pátio e as balizas em que o trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia *d* descarrega o produto *p* dentro da área de atividade da recuperadora *r;*
$\text{WTEPorRecup}_{\text{mvd}}$	Binária igual a 1 se TEPorRecup_1mvd >= TEPorRecup_2mvd

Função Objetivo:

$$\min \alpha * \sum_{n=1}^{N} TT_n + \beta * \sum_{m=1}^{M} \sum_{v=1}^{V} \sum_{d=1}^{D} \text{TempoEsperado}_{\text{mvd}}$$

Restrições:

$$\sum_{r=1}^{2} \sum_{l=1}^{TL} \sum_{b=1}^{TB} \text{Qrecuperada}_{\text{rlbpn}} = \text{CargaRecuperada_np} \quad \forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP] \qquad \text{P1}$$

$$\sum_{r=1}^{2} \sum_{p=1}^{TP} \text{Brecuperada}_{\text{rlbpn}} \leq 1 \quad \forall n \in [1, N]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB] \qquad \text{P2}$$

$$\mathrm{Qrecuperada_{rlbpn}} - B * \mathrm{Brecuperada_{rlbpn}} \leq 0$$
$$\forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall r \in [1,2] \qquad \text{P3}$$

$$\mathrm{Brecuperada_{rlbpn}} - B * \mathrm{Qrecuperada_{rlbpn}} \leq 0$$
$$\forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall r \in [1,2] \qquad \text{P4}$$

$$\mathrm{Brecuperada_{rlbpn}} + \mathrm{F_{lbr}} \leq 1$$
$$\forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall r \in [1,2] \qquad \text{P5}$$

$$\mathrm{EstoqueFinal_{lbnp}} = \mathrm{EstoqueInicial_{lbnp}} - \sum_{r=1}^{2} \mathrm{Qrecuperada_{rlbpn}}$$
$$\forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB] \qquad \text{P6}$$

$$\mathrm{EstoqueInicial_{lbnp}} = \mathrm{EstoqueFinal_{lb(n-1)p}} + \mathrm{QchegueTremParaEstocar_{lbpn}}$$
$$\forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB] \qquad \text{P7}$$

$$\mathrm{EstoqueInicial_{lb0p}} = \mathrm{EstoqueInicioPátio_{lbp}} + \mathrm{QchegueTremParaEstocar_{lbp0}}$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB] \qquad \text{P8}$$

$$\sum_{p=1}^{TP} \mathrm{EstoqueInicial_{lbnp}} + \mathrm{QchegueTremParaEstocar_{lbpn}} \leq K_l$$
$$\forall n \in [0, N]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB] \qquad \text{P9}$$

$$\sum_{r=1}^{2} \mathrm{Qrecuperada_{rlbpn}} \leq \mathrm{EstoqueInicial_{lbnp}}$$
$$\forall n \in [1, N];\ \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB] \qquad \text{P10}$$

$$3 - (\mathrm{BTIAIN_{nmvd}} + \mathrm{BTTATN_{nmvd}} + \mathrm{BTTDIN_{nmvd}}) \leq B * (1 - \mathrm{BCTN_{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P11}$$

$$(1 - \mathrm{BCTN_{nmvd}}) \leq B * \left(3 - (\mathrm{BTIAIN_{nmvd}} + \mathrm{BTTATN_{nmvd}} + \mathrm{BTTDIN_{nmvd}})\right)$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P12}$$

$$\mathrm{DIC_n} - DIDesc_{mvd} \leq B * \mathrm{BTIAIN_{nmvd}}$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P13}$$

$$DIDesc_{mvd} - \mathrm{DIC_n} \leq B * (1 - \mathrm{BTIAIN_{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P14}$$

$$DTC_n - DTDesc_{mvd} \leq B * \mathrm{BTTATN_{nmvd}}$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P15}$$

$$DTDesc_{mvd} - DTC_n \leq B * (1 - \mathrm{BTTATN_{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P16}$$

$$DTC_n - DIDesc_{mvd} \leq B * (1 - \mathrm{BTTDIN_{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1, N]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P17}$$

$$DIDesc_{mvd} - DTC_n \leq B * \mathrm{BTTDIN_{nmvd}} \qquad \text{P18}$$

$$\forall n \in [1,N]; \forall \mathrm{m} \in [1,]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D]$$

$$1 - \mathrm{BTDDCN}_{\mathrm{nmvd}} \leq B(\mathrm{BTIAIN}_{\mathrm{nmvd}}) + B(1 - \mathrm{BTTATN}_{\mathrm{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1,N]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P19}$$

$$\mathrm{BTDDCN}_{\mathrm{nmvd}} \leq B(1 - \mathrm{BTIAIN}_{\mathrm{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1,N]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P20}$$

$$\mathrm{BTDDCN}_{\mathrm{nmvd}} \leq B * (\mathrm{BTTATN_nmvd})$$
$$\forall n \in [1,N]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P21}$$

$$\mathrm{QchegueTremParaEstocar}_{\mathrm{lbpn}} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{v=1}^{V} \sum_{d=1}^{D} \mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbpnmvd}}$$
$$\forall n \in [0,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB] \quad \text{P22}$$

$$\mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} - \mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbpnmvd}} \leq B * (1 - \mathrm{BCTN}_{\mathrm{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P23}$$

$$\mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbpnmvd}} - \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * (1 - \mathrm{BCTN}_{\mathrm{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P24}$$

$$\mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbp0mvd}} - \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * \mathrm{BTTDIN}_{1\mathrm{mvd}}$$
$$\forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P25}$$

$$\mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbp0mvd}} \leq B * (1 - \mathrm{BTTDIN}_{1\mathrm{mvd}})$$
$$\forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P26}$$

$$\mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} - \mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbpnmvd}} \leq B * (1 - \mathrm{BTDDCN}_{\mathrm{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P27}$$

$$\mathrm{QchegueDeCadaTremParaEstocar}_{\mathrm{lbpnmvd}} - \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * (1 - \mathrm{BTDDCN}_{\mathrm{nmvd}})$$
$$\forall n \in [1,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P28}$$

$$\sum_{l=1}^{TL} \sum_{b=1}^{TB} \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} = \mathrm{CargaAlocada}_{\mathrm{mvdp}}$$
$$\forall p \in [1,TP]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P29}$$

$$\mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * \mathrm{Balocada}_{\mathrm{lbpmvd}}$$
$$\forall n \in [1,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P30}$$

$$\mathrm{Balocada}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}}$$
$$\forall n \in [1,N];\ \forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P31}$$

$$\mathrm{EstoqueInicial}_{\mathrm{lb0p}} - \mathrm{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * (1 - BCTN_{1mvd})$$
$$\forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P32}$$

$$\mathrm{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\mathrm{lbpmvd}} - \mathrm{EstoqueInicial}_{\mathrm{lb0p}} \leq B * (1 - BCTN_{1mvd})$$
$$\forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D] \quad \text{P33}$$

$$\text{EstoqueFinal}_{\text{lb(n−1)p}} - \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lbpmvd}} \leq B * (1 - BCTN_{nmvd})$$
$$\forall n \in [2, N]; \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \text{m} \in [1,]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P34}$$

$$\text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lbpmvd}} - \text{EstoqueFinal}_{\text{lb(n−1)p}} \leq B * (1 - BCTN_{nmvd})$$
$$\forall n \in [2, N]; \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P35}$$

$$\text{EstoqueInicial}_{\text{lb0p}} - \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lbpmvd}} \leq B * (1 - BTDDCN_{1mvd})$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P36}$$

$$\text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lbpmvd}} - \text{EstoqueInicial}_{\text{lb0p}} \leq B * (1 - BTDDCN_{1mvd})$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P37}$$

$$\text{EstoqueFinal}_{\text{lb(n−1)p}} - \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lbpmvd}} \leq B * (1 - BTDDCN_{nmvd})$$
$$\forall n \in [2, N]; \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P38}$$

$$\text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lbpmvd}} - \text{EstoqueFinal}_{\text{lb(n−1)p}} \leq B * (1 - BTDDCN_{nmvd})$$
$$\forall n \in [2, N]; \forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P39}$$

$$\sum_{p\prime=1, P\prime \neq p}^{TP} \sum_{b'=1}^{2} \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lb}\prime\text{p}\prime\text{mvd}} \leq \text{B} * \text{BbalizaIndisp}_{\text{l1pmvd}}$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P40}$$

$$\sum_{p\prime=1, P\prime \neq p}^{TP} \sum_{b'=TB-1}^{TB} \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lb}\prime\text{p}\prime\text{mvd}} \leq \text{B} * \text{BbalizaIndisp}_{\text{l(TB)pmvd}}$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P41}$$

$$\sum_{p\prime=1, P\prime \neq p}^{TP} \sum_{b'=b-1}^{b+1} \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lb}\prime\text{p}\prime\text{mvd}} \leq \text{B} * \text{BbalizaIndisp}_{\text{lbpmvd}}$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [2, TB - 1]; \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P42}$$

$$\text{BbalizaIndisp}_{\text{l1pmvd}} \leq \text{B} * \sum_{p\prime=1, P\prime \neq p}^{TP} \sum_{b'=1}^{2} \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lb}\prime\text{p}\prime\text{mvd}}$$
$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall \text{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P43}$$

$$\text{BbalizaIndisp}_{\text{l(TB)pmvd}} \leq \text{B} * \sum_{p\prime=1, P\prime \neq p}^{TP} \sum_{b'=TB-1}^{TB} \text{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\text{lb}\prime\text{p}\prime\text{mvd}} \quad \text{P44}$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$

$$\mathrm{BbalizaIndisp}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq \mathrm{B} * \sum_{p'=1, P' \neq p}^{TP} \sum_{b'=b-1}^{b+1} \mathrm{EstoqueReferenciaParaTrem}_{\mathrm{lb'p'mvd}}$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [2, TB-1]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P45}$$

$$\mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * \left(1 - \mathrm{BbalizaIndisp}_{\mathrm{lbpmvd}}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P46}$$

$$2 - (\mathrm{BIAT}_{\mathrm{mvdm'v'}} + \mathrm{BIDI}_{\mathrm{mvdm'v'}}) \leq B * (1 - \mathrm{BMT}_{\mathrm{mvdm'v'}})$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P47}$$

$$1 - \mathrm{BMT}_{\mathrm{mvdm'v'}} \leq \left(2 - (\mathrm{BIAT}_{\mathrm{mvdm'v'}} + \mathrm{BIDI}_{\mathrm{mvdm'v'}})\right)$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P48}$$

$$DTDesc_{m'v'd} - DIDesc_{mvd} \leq B * \mathrm{BIAT}_{\mathrm{mvdm'v'}}$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P49}$$

$$DIDesc_{mvd} - DTDesc_{m'v'd} \leq B * (1 - \mathrm{BIAT}_{\mathrm{mvdm'v'}})$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P50}$$

$$\mathrm{BIDI}_{\mathrm{mvdm'v'}} = 0$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \forall \mathrm{m} = \mathrm{m}' AND\ v = v' \quad \text{P51}$$

$$DIDesc_{mvd} - DIDesc_{m'v'd} \leq B * \mathrm{BIDI}_{\mathrm{mvdm'v'}}$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P52}$$

$$DIDesc_{m'v'd} - DIDesc_{mvd} \leq B * (1 - \mathrm{BIDI}_{\mathrm{mvdm'v'}})$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P53}$$

$$\mathrm{BTD}_{\mathrm{lbpmvdm'v'}} \leq B * \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpm'v'd}}$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P54}$$

$$\mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbpm'v'd}} \leq B * \mathrm{BTD}_{\mathrm{lbpmvdm'v'}} + B * (1 - \mathrm{BMT}_{\mathrm{mvdm'v'}})$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D]; \forall \neq m' AND v \neq v' \quad \text{P55}$$

$$\mathrm{BTD}_{\mathrm{lbpmvdm'v'}} = 0$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D]; \forall m = m' AND v = v' \quad \text{P56}$$

$$\sum_{p=1}^{TP} \sum_{l=1}^{TL} \sum_{b=1}^{TB} \mathrm{BTD}_{\mathrm{lbpmvdm'v'}} \leq B * \mathrm{BMT}_{\mathrm{mvdm'v'}}$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall \mathrm{m}' \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall v' \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P57}$$

$$\sum_{m'=1}^{M} \sum_{v'=1}^{V} \mathrm{BTD}_{\mathrm{lbpmvdm'v'}} \leq B * \mathrm{BbalizaIndispPorTremJaTrabalhando}_{\mathrm{lbpmvd}}$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P58}$$

$$\mathrm{BbalizaIndispPorTremJaTrabalhando}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B * \sum_{m'=1}^{M} \sum_{v'=1}^{V} \mathrm{BTD}_{\mathrm{lbpmvdm'v'}}$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P59}$$

$$\sum_{p'=1}^{TP} \mathrm{Qalocada}_{\mathrm{lbp'mvd}} \leq B * (1 - \mathrm{BbalizaIndispPorTremJaTrabalhando}_{\mathrm{lbpmvd}})$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \quad \text{P60}$$

$$\sum_{b'=1}^{b} \sum_{l=1}^{TL} \sum_{p=1}^{TP} \mathrm{Qrecuperada}_{\mathrm{rlb'pn}} \leq B * (1 - \mathrm{BE}_{\mathrm{rbn}})$$

$$\forall n \in [1, N]; \forall b \in [1, TB]; \forall r \in [1, 2] \quad \text{P61}$$

$$(1 - \mathrm{BE}_{\mathrm{rbn}}) \leq B * \sum_{b'=1}^{b} \sum_{l=1}^{TL} \sum_{p=1}^{TP} \mathrm{Qrecuperada}_{\mathrm{rlb'pn}}$$

$$\forall n \in [1, N]; \forall b \in [1, TB]; \forall \in [1, 2]; \forall b \in [1, TB]; \quad \text{P62}$$

$$\sum_{b'=b}^{TB}\sum_{l=1}^{TL}\sum_{p=1}^{TP}\mathrm{Qrecuperada}_{\mathrm{rlb'pn}} \leq B * (1-\mathrm{BD}_{\mathrm{rbn}})$$

$$\forall n \in [1,N]; \forall b \in [1,TB]; \forall r \in [1,2]; \forall b \in [1,TB]; \qquad \text{P63}$$

$$(1-\mathrm{BD}_{\mathrm{rbn}}) \leq B * \sum_{b'=b}^{TB}\sum_{l=1}^{TL}\sum_{p=1}^{TP}\mathrm{Qrecuperada}_{\mathrm{rlb'pn}}$$

$$\forall n \in [1,N]; \forall b \in [1,TB]; \forall r \in [1,2]; \forall b \in [1,TB]; \qquad \text{P64}$$

$$TB - \sum_{b=1}^{TB}\mathrm{BE}_{\mathrm{rbn}} + \mathrm{BD}_{\mathrm{rbn}} \leq QT_{rn}$$

$$\forall n \in [1,N]; \forall r \in [1,2]; \qquad \text{P65}$$

$$T_{rn} = \frac{\sum_{b=1}^{TB}\sum_{l=1}^{TL}\sum_{p=1}^{TP}\mathrm{Qrecuperada}_{\mathrm{rlbpn}}}{TXRecup_r} + \frac{QT_{rn} * \mathrm{CBaliza}}{\mathrm{VM_r}} + \frac{\sum_{p=1}^{TP}\mathrm{CargaRecuperadaTremPátio}_{\mathrm{np}}}{2 * \sum_{r'=1}^{2} TXRecup_{r'}} + \frac{\sum_{p=1}^{TP}\mathrm{CargaRecuperadaTrem}_{\mathrm{np}}}{\mathrm{TXEmbTrem}} \qquad \text{P66}$$

$$\forall n \in [1,N]; \forall r \in [1,2];$$

$$T_{1n} - T_{2n} \leq B * W_n$$

$$\forall n \in [1,N] \qquad \text{P67}$$

$$T_{2n} - T_{1n} \leq B * (1-W_n)$$

$$\forall n \in [1,N] \qquad \text{P68}$$

$$T_{1n} - TT_n \leq B * (1-W_n)$$

$$\forall n \in [1,N] \qquad \text{P69}$$

$$T_{2n} - TT_n \leq B * W_n$$

$$\forall n \in [1,N] \qquad \text{P70}$$

$$1 - \mathrm{BbalizaSemprodutoDesc}_{\mathrm{lbpmvd}} \leq B\left(EstoqueReferenciaParaTrem_{lbpmvd} + \mathrm{BcargaAlocada}_{\mathrm{mvdp}}\right) \qquad \text{P71}$$

$$\forall p \in [1,TP]; \forall l \in [1,TL];\ \forall b \in [1,TB]; \forall \mathrm{m} \in [1,M]; \forall v \in [1,V]; \forall d \in [1,D]$$

$$BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd} - AcumEsquerda_{lbpmvd} \leq B(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd})$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b = 1; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P72}$$

$$AcumEsquerda_{lbpmvd} - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd} \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b = 1; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P73}$$

$$\left(AcumEsquerda_{l(b-1)pmvd} + BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right) - AcumEsquerda_{lbpmvd} \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [2, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P74}$$

$$AcumEsquerda_{lbpmvd} - \left(AcumEsquerda_{l(b-1)pmvd} + BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right) \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [2, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P75}$$

$$1 - BacumEsquerda_{lbpmvd} \leq B\left(TB - b + 1 - \sum_{b'=b}^{TB} BbalizaSemprodutoDesc_{lb'pmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P76}$$

$$\left(AcumDireita_{l(b+1)pmvd} + BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right) - AcumDireita_{lbpmvd} \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB - 1]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P77}$$

$$AcumDireita_{lbpmvd} - \left(AcumDireita_{l(b+1)pmvd} + BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right) \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB - 1]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P78}$$

$$BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd} - AcumDireita_{lbpmvd} \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b = TB; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P79}$$

$$AcumDireita_{lbpmvd} - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd} \leq B\left(1 - BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b = TB; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P80}$$

$$1 - BacumDireita_{lbpmvd} \leq B\left(b - \sum_{b'=1}^{b} BbalizaSemprodutoDesc_{lb'pmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P81

$$\left(AcumDireita_{lbpmvd} + AcumEsquerda_{lbpmvd}\right) \leq B * (BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd})$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P82

$$AcumEsquerda_{lbpmvd} - AcumDireita_{lbpmvd} - TB * BacumEsquerda_{lbpmvd} + TB * BacumDireita_{lbpmvd} \leq B * WDistemBalizas_{lbpmvd}$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P83

$$AcumDireita_{lbpmvd} - AcumEsquerda_{lbpmvd} + TB * BacumEsquerda_{lbpmvd} - TB * BacumDireita_{lbpmvd} \leq B * (1 - WDistemBalizas_{lbpmvd})$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P84

$$AcumEsquerda_{lbpmvd} - DistemBalizas_{lbpmvd} \leq B\left(1 - WDistemBalizas_{lbpmvd}\right) + B\left(1 - Balocada_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P85

$$AcumDireita_{lbpmvd} - DistemBalizas_{lbpmvd} \leq B\left(WDistemBalizas_{lbpmvd}\right) + B\left(1 - Balocada_{lbpmvd}\right)$$

$$\forall p \in [1, TP]; \forall l \in [1, TL];\ \forall b \in [1, TB]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P86

$$\mathrm{TEPorRecup}_{\mathrm{rmvd}} = \sum_{p=1}^{TP}\sum_{l=1}^{TL}\sum_{b=1}^{TB}(1 - \mathrm{F}_{\mathrm{lbr}}) * DistemBalizas_{lbpmvd} + \mathrm{TEmp} * \sum_{p=1}^{TP}\sum_{l=1}^{TL}\sum_{b=1}^{TB} Balocada_{lbpmvd}$$

$$\forall r \in [1, 2]; \forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P87

$$\mathrm{TEPorRecup}_{2\mathrm{mvd}} - \mathrm{TEPorRecup}_{1\mathrm{mvd}} \leq B(1 - \mathrm{WTEPorRecup}_{\mathrm{mvd}})$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$ P88

$$\mathrm{TEPorRecup_{1mvd}} - \mathrm{TEPorRecup_{2mvd}} \leq B(\mathrm{WTEPorRecup_{mvd}})$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P89}$$

$$\mathrm{TEPorRecup_{1mvd}} - \mathrm{TempoEsperado_{mvd}} \leq B * (1 - \mathrm{WTEPorRecup_{mvd}})$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D] \qquad \text{P90}$$

$$\mathrm{TEPorRecup_{2mvd}} - \mathrm{TempoEsperado_{mvd}} \leq B * (\mathrm{WTEPorRecup_{mvd}}) \qquad \text{P91}$$

$$\forall \mathrm{m} \in [1, M]; \forall v \in [1, V]; \forall d \in [1, D]$$

$$EstoqueInicial_{lbnp}, EstoqueFinal_{lbnp} = INT$$
$$EstoqueReferenciaParaTrem_{lbpmvd}, Qrecuperada_{rlbpn} \geq 0$$
$$QchegueTremParaEstocar_{lbpn}, QchegueDeCadaTremParaEstocar_{lbpnmvd} \geq 0$$
$$Qalocada_{lbpmvd} \geq 0$$

$$Brecuperada_{rlbpn}, Balocada_{lbpmvd}, BbalizaIndisp_{lbpmvd} = \{BIN - 0\ ou\ 1\}$$
$$BbalizaIndispPorTremJaTrabalhando_{lbpmvd}, BTD_{lbpmvdm'v'} = \{BIN - 0\ ou\ 1\}$$

$$BTIAIN_{nmvd}, BTTATN_{nmvd}, BTTDIN_{nmvd}, BCTN_{nmvd} = \{BIN - 0\ ou\ 1\} \qquad \text{P92}$$

$$BTDDCN_{nmvd}, BMT_{mvdm'v'}, BIAT_{mvdm'v'}, BIDI_{mvdm'v'} = \{BIN - 0\ ou\ 1\}$$

$$BE_{rbn}, BD_{rbn}, W_n = \{BIN - 0\ ou\ 1\}$$

$$QT_{rn}, T_{rn}, TT_n \geq 0$$
$$AcumEsquerda_{lbpmvd}, AcumDireita_{lbpmvd}, DistemBalizas_{lbpmvd} \geq 0$$
$$TempoEsperado_{mvd}, TEPorRecup_{rmvd} \geq 0$$

$$BbalizaSemprodutoDesc_{lbpmvd}, BacumEsquerda_{lbpmvd} = \{BIN - 0\ ou\ 1\}$$
$$BacumDireita_{lbpmvd}, WDistemBalizas_{lbpmvd}, WTEPorRecup_{mvd} = \{BIN - 0\ ou\ 1\}$$

a) P1 garante que seja programada para recuperação exatamente a carga prevista para ser recuperada diretamente do pátio para o navio;
b) P2 impede as recuperadoras trabalharem em uma mesma baliza por segurança operacional;
c) P3 e P4 garantem que a binaria indique 1 se, e somente se, houver quantidade a ser recuperada na baliza;
d) P5 impede que uma recuperadora trabalhe em baliza fora de seu alcance;

e) P6 atualiza o nível de estoque final no pátio;
f) P7 e P8 atualizam o estoque disponível no pátio no início do carregamento do navio;
g) P9 restringe a capacidade de armazenamento das balizas;
h) P10 garante que não se recupere mais que a quantidade disponível no estoque;
i) P11 e P12 indicam se a carga do trem deve ou não ser considerada para carregar o navio;
j) P13 e P14 indicam se o trem inicia a descarga antes do início do carregamento do navio;
k) P15 e P16 indicam se o trem termina a descarga antes do término do embarque do navio;
l) P17 e P18 indicam se o trem termina a descarga após o início do carregamento do navio;
m) P19, P20 e P21 indicam se o trem tem sua operação de descarregamento durante o carregamento de um navio. As duas restrições P20 e P21 trabalham juntas, caso a binaria igual a 1 as duas variáveis ficam exatamente iguais;
n) P22 consolida as pilhas alocadas no pátio pelos trens que estarão disponíveis para ser recuperado para um navio;
o) P23, P24, P25, P24, P25, P26, P27, P28 e P29 calculam o valor da quantidade de produto que chega de trem e fica disponível para recuperação;
p) P30 garante que a quantidade de produto alocado no pátio seja igual a carga do trem;
q) P31, P32, P33 e P34 atualiza a binária que indica se houve alocação de produtos no pátio;
r) P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37, P38, P39 e P40 estimam o estoque de referência;
s) P41, P42, P43, P44, P45, P46 e P47 são restrições que garantem que não haja mistura de produto no pátio;
t) P48, P49, P50, P51, P52, P53 e P54 indicam se os trens descarregam simultaneamente;
u) P55, P56, P57 e P58 indicam se a baliza já está sendo ocupada por pelo descarregamento de outro trem;
v) P59 e P60 consolidam a matriz de indisponibilidade por haver trens descarregando;
w) P61 impede que trem descarregue em mesma baliza que outro trem esteja trabalhando;
x) P62, P63, P64 e P65 indicam balizas por onde recuperadora realizará a recuperação da carga;
y) P66 indica a quantidade de balizas que a recuperadora irá transladar durante carregamento do navio, assim, indicando a distância percorrida e tempo penalizado;
z) P67 calcula a soma do tempo gasto com recuperação e translado associado a cada recuperadora, e o tempo associado aos carregamentos direto a bordo;

aa) P68, P69, P70 e P71 estimam o tempo total gasto nas operações do pátio durante carregamento dos navios;

bb) P72 a P92 estimam o tempo esperado das operações de empilhamento de produto e acréscimo de tempo esperado na recuperação.

5.3 Hierarquia do Modelo

A execução do modelo ocorreu de forma sequencial, executando primeiro o modelo de sequenciamento de trens e navios para gerar a primeira programação das operações, com as sequencias e respectivas datas de início e fim dos carregamentos dos navios e descarregamentos dos trens como parâmetros, usados no modelo do pátio.

As variáveis de decisão relacionadas aos navios DIC_n (data início carregamento posição *n* da fila de navios) e DTC_n (data término carregamento posição *n* da fila de navios), assim como as variáveis de decisão relacionadas aos trens $DIDesc_{mvd}$ (data de início de descarregamento do trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia d) e $DTDesc_{mvd}$ (data de término de descarregamento do trem na posição *m* da fila do virador *v* no dia d) são resultados do modelo de sequenciamento de trens e navios (*output*), a serem utilizados como parâmetros de otimização de pátios.

A hierarquia do modelo ocorre de forma automática e as funções que correspondem a essa interação são: P13 e P14, indicam se o trem inicia a descarga antes do início do carregamento do navio; P15 e P16, indicam se o trem termina a descarga antes do término do embarque do navio; P17 e P18, indicam se o trem termina a descarga após o início do carregamento do navio; P49, P50, P52 e P53, indicam se os trens descarregam simultaneamente.

Embora os nomes dos navios e trens não sejam aplicados diretamente no modelo, estes devem ser utilizados para configurar saídas dos sistemas. Para todos os casos, os nomes e horários dos navios e trens são identificados depois do sequenciamento e empregados como *output* para o modelo de otimização dos pátios.

Em seguida é executado o modelo do pátio. Como todos os parâmetros de tempo foram convertidos para a unidade de 1 hora, α e β, unidades de conversão de tempo, são iguais a 1. Considerou-se que todo trem que realizar por completo sua operação de descarga durante o carregamento de um navio, com o mesmo produto, deve ser direcionada direto para bordo do navio e, se mais de um trem esteja nessa situação simultaneamente, o trem de maior carga deve ser considerado para sua carga ir direto a bordo e os demais devem ser alocados temporariamente nos pátios para em seguida ser recuperado.

Os fatores de integração entre as filas de navios e trens são as suas respectivas cargas, Carga_pn e Cargapmvd, e disponibilidade de estoque nos pátios EDPIpn e estoque em trânsito nos trens programados Qntpn. O parâmetro EstoqueInicioPátio_lbp, equivalente ao mapa de pátio, é fornecido pelo usuário, que deve respeitar as capacidades de armazenamento de cada baliza K_l nos pátios.

O parâmetro CargaRecuperadaTrem_np é a soma das cargas dos trens que descarregar direto a bordo para o navio *n* e CargaRecuperadaTremPátio_np é o parâmetro que equivale a soma das cargas que foram alocados temporariamente no pátio para o carregamento de determinado do navio em fila. O parâmetro CargaRecuperada_np representa a carga do navio *n* subtraída de CargaRecuperadaTrem_np e CargaRecuperadaTremPátio_np. Já a $\mathrm{CargaAlocada}_{\mathrm{mvdp}}$ equivale à carga do trem, exceto, no caso em que a carga irá direto a bordo ou temporariamente ao pátio, que será igual a zero. A binária $\mathrm{BcargaAlocada}_{\mathrm{mvdp}}$ será igual a 1 se e somente se $\mathrm{CargaAlocada}_{\mathrm{mvdp}}$=1.

A taxa comercial de recuperação da recuperadora *r* TXRecup_r e taxa comercial para descarga de trem direto do virador para o navio TXEmbTrem representam os parâmetros de produtividade dos equipamentos. O comprimento médio de uma baliza CBaliza e velocidade média da recuperadora *r* VM_r são usados para calcular o tempo em que uma recuperadora translada em busca de outra pilha para ser recuperada, que é acrescido no tempo total de carregamento de um navio.

Como resultante se tem uma programação otimizada das operações em um planejamento integrado de produção. Desta forma, são definidos os horários de início e término do atendimento dos navios e trens, assim como a disposição dos produtos nos pátios durante o período analisado.

6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A validação do modelo e identificação das limitações da solução foram identificadas por meio de experimentos e testes. A seguir, são apresentados os cenários utilizados para a análise do procedimento de execução do modelo e os resultados dos experimentos, que se mostraram satisfatórios.

6.1 A Construção do Planejamento e Programação na Prática

A construção do planejamento de produção diária buscou atender os planos mensais, trimestral e anual. A análise das nomeações de navios e a documentação para a área inspetoria de embarque, área responsável pela segurança das operações de carregamento de navios foram feitas com base nas informações das áreas comercial, planejamento e controle de manutenção e de produção, da mina, ferrovia e do porto.

Em seguida, a programação de embarque foi atualizada e encaminhada com as instruções de embarque. Ao término de cada embarque, os planejadores atualizam, manualmente, a fila de navios e a programação do próximo navio. Para cada navio se faz a análise dos gastos com *Demurrage* com influência direta da fila de navios e atendimento à programação.

O planejamento da fila de navios e programação de embarque devem respeitar o controle de estoque físico e contábil. Para isso, os planejadores criam pilhas com produtos específicos direcionados aos carregamentos, informações necessárias para o plano de recuperação. O plano de recuperação explicita o navio nomeado, a localização de cada pilha, ou seja, o pátio, balizas de início e fim das pilhas, e o trem que deve ser descarregado direto para o navio durante o seu atendimento.

A programação de chegada dos trens depende diretamente do planejamento de produção e do carregamento de trens na mina, assim como da disponibilidade de trens no circuito da operadora ferroviária. À medida que os produtos são recuperados dos pátios e navios carregados, a programação diária de chegada dos trens e o mapa de pátio são atualizados. Para cada trem, o planejador deve verificar se há disponibilidade de área nos pátios, de equipamentos de empilhamento e descarga, e interferência de possíveis rotas de transportadores.

Na prática, o que os planejadores fazem diariamente é analisar a programação de carregamento de trem na mina, que chegará no dia seguinte (D+1), verificar o plano de manutenção da semana, acompanhar e atualizar a programação diária a cada seis horas,

controlar estoque e atualizar mapa de pátio, e por fim, atualizam a programação da fila de navios do mês.

Quando as operações não ocorrem conforme programado, a programação das operações e planejamento de produção devem ser atualizados, o que, na maioria das vezes, afeta os processos e a cadeia logística como um todo. Como não há sistema de otimização, que auxilie a programação e planejamento com dados disponibilizados em tempo real, cabe aos planejadores sua atualização e revisão manuais. Esta é uma tarefa complexa e demanda tempo, pois muitas variáveis e alternativas de soluções devem ser analisadas antes de tomada de decisão. Os planejadores verificam as projeções e não retornam ao plano inicial, de imediato, para analisar o que ocorreu. Nesta situação, valem a experiência e o conhecimento tácito dos gestores e planejadores.

Nesse sentido, o desenvolvimento do modelo de otimização foi feito inteiramente por uma programação linear, que atendesse às dificuldades dos profissionais responsáveis pelo planejamento da produção e programação das operações. Entendemos, que este modelo atende e substitui adequadamente o que os planejadores e gestores fazem, eliminando a intuição como fator de decisão. Está claro, que essa solução pode ser refinada antes de sua implantação. Se o planejamento ou condição operacional mudem por algum motivo, o modelo deve ser processado novamente com os novos parâmetros.

O modelo se mostrou capaz de otimizar a fila de navios, alterando a ordem dos embarques, reduzindo os gastos com *Demurrage*, respeitando as restrições de qualidade e estoque de produtos em pátio e em trânsito. Além disso, otimiza a alocação de produtos nos pátios e a chegada de trens, bem como permite a descarga de trens direto para o navio, reduzindo o tempo de recuperação dos produtos durante o carregamento dos navios, contribuição importante para a gestão de pátios.

6.2 Construção de Cenários para Análise do Modelo

Foram criados cenários do momento do planejamento com dois produtos a serem movimentados nos processos de estocagem, carregamento de navios e descarga de trens, fila com cinco, 10 e 14 navios, planejamento de três, sete e 15 dias de abastecimento dos pátios, e 12 trens no plano de entrega.

O modelo considera uma quantidade fixa de trens entregando por dia, em situação real, criando trens virtuais, com parâmetros nulos. Como exemplo, em situação que há apenas 11

trens em um dia, pode-se adicionar o 12º trem com carga zero, chegando no terminal na primeira hora do dia, consumindo zero horas de um virador de vagões.

Os cenários de pátios consideram três pátios, cada um com balizas de mesma capacidade, criadas para atender cada par de situação de trens e navios, simulando pátios com 30 e 50 balizas disponíveis, totalizando 18 cenários. A Tabela 6 apresenta as configurações de cenário criadas.

Quant. Dias	**Quant. Navios**	**Quant. Balizas No Pátio:**	
		30	50
3	5	Possível	Possível
	10	Impossível	Possível
	14	Impossível	Impossível
7	5	Possível	Possível
	10	Possível	Possível
	14	Impossível	Possível
15	5	Possível	Possível
	10	Possível	Possível
	14	Possível	Possível

Tabela 6 - Resumo dos cenários criados

Uma vez que os cenários objetivam simular cargas e capacidades semelhantes de um problema real, quatro configurações se mostraram impossíveis , pois a quantidade de balizas não é suficiente para armazenar as condições iniciais de estoque. Uma alternativa seria aumentar a quantidade ou a capacidades das balizas.

Os parâmetros comuns aos cenários consideram que:

a) o parâmetro F_{lbr} considera que a recuperadora 1 não pode atuar em qualquer baliza do pátio 3 e a recuperadora 2 não pode atuar em qualquer baliza do pátio 1;
b) as taxas das recuperadoras 1 e 2 equivalem a TXRecupr = 2.500 t/h;
c) adis taxa de carregamento quando há trem para bordo TXEmbTrem = 5.000 t/h;
d) o comprimento das balizas CBalizas utilizadas é de 10 m em cada;
e) a velocidade de translação de cada recuperadora VM_r é de 20 m/min;
f) as empilhadeiras levam um tempo TEmp = 10 min para se posicionar em uma baliza;
g) a quantidade diária mínima contratual para carregamento Prancha = 80.000 t/dia;
h) o tempo descontado por eventos intrínsecos aos processos definidos em contrato (Turn Time equivale a 8 horas, convertido em decimal como 0.33...;
i) o custo diário com atraso dos navios *Demurrage* = $50.000,00;
j) o prêmio por adiantamento da fila de navios *Despatch* = $25.000,00.

A estes parâmetros foram atribuídos valores determinísticos constantes, baseados em médias de uma situação real. A seguir, são apresentadas como os cenários de navios, trens e pátios foram criadas.

6.2.1. Cenários de Navios

Cada cenário tem uma quantidade de navios e, para cada navio, seu conjunto de parâmetros (Tabela 7). O Nome do Navio refere-se ao título no sistema dado ao navio. Embora não diretamente usado no modelo, o Nome do Navio configura saídas de sistema, isto é, identifica o navio depois do sequenciamento.

Navio	**Produtos**	**Carga**	**Turn Time**	**Prancha**	**C*Demurrage***	***Despatch***	**ETA**
N001	P002	166015	0.333333333	80000	50	25	43927.46417
N002	P002	126554	0.333333333	80000	50	25	43929.26958
N003	P001	137031	0.333333333	80000	50	25	43930.69331
N004	P001	129111	0.333333333	80000	50	25	43932.14927
N005	P002	147932	0.333333333	80000	50	25	43933.71474
N006	P001	171105	0.333333333	80000	50	25	43935.37897
N007	P001	161630	0.333333333	80000	50	25	43937.38946
N008	P001	131188	0.333333333	80000	50	25	43939.40983
N009	P002	125373	0.333333333	80000	50	25	43941.01688
N010	P001	169552	0.333333333	80000	50	25	43942.38032

Tabela 7 - Exemplo de cenário de navios

O Produto refere-se ao produto que será embarcado no navio. Nos cenários, considerou-se a existência de dois produtos (P001 e P002), selecionando-se, aleatoriamente, um para cada navio. No modelo proposto pode haver mais de um produto a ser embarcado no navio, no entanto, como exemplo e por facilidade de implantação computacional, apontou-se um único produto por navio.

A Carga refere-se à quantidade do produto a ser embarcado. Como o tamanho da carga de um navio costuma variar entre 120.000 e 200.000 t, o tamanho das cargas foram sorteados aleatoriamente, com distribuição uniforme, dentro desse intervalo.

Por fim, a data (dia e hora) estimada que o navio estará disponível para carregamento (ETA) é convertida em decimais. As datas foram baseadas em dados reais do banco de dados do terminal portuário estudado.

6.2.2. Cenários de Trens

Nos cenários de trem existe informação da quantidade de viradores de vagões disponíveis por dia, tamanho de fila máxima por virador, quantidade de dias de abastecimento e quantidade de trens por dia, além dos parâmetros de cada trem (Tabela 8).

De forma fixa, três viradores de vagões estão disponíveis todos os dias, 12 trens entregando produtos todos os dias, o plano de entregas informa quantos dias de abastecimento dos pátios haverá no período planejado e os respectivos parâmetros de cada navio. De forma semelhante aos cenários de Navio, o nome do trem não é usado no modelo, mas se apresenta na saída do sistema para identificação do roteiro de carregamento.

Trem	Produto	Carga	ETA Trem	Dia	DataDispT_td
T001	P002	12208	43926.2611	1	43927
T002	P002	14024	43926.0149	1	43927
T003	P001	14798	43926.2059	1	43927
T004	P002	14158	43926.2405	1	43927
T005	P001	13747	43929.0442	2	43930
T006	P001	12894	43929.0448	2	43930
T007	P001	12995	43929.0363	2	43930
T008	P002	13731	43929.0538	2	43930
T009	P002	12227	43932.1915	3	43933
T010	P002	12040	43932.1945	3	43933
T011	P001	12920	43932.0312	3	43933
T012	P001	13118	43932.1781	3	43933

Tabela 8 - Exemplo de cenário de trens

O Produto nos trens e o tamanho da Carga foram atribuídos de forma aleatória, conforme distribuição uniforme entre 12.000 e 15.000 t. Considera-se que cada trem transporte um único tipo de produto por vez.

O ETA Trem, data que o trem está disponível par o porto, foi criado escolhendo três dias de entrega diferentes, aleatoriamente, no período de planejamento para cada dia, cada trem recebe o ETA em um dos dias, somado a uma hora aleatória, assim no dia 43926 por exemplo, o ETA de um trem tornou-se 43926.2611 onde 0,2611representa a hora de chegada do trem no dia especificado.

O Índice do Dia de Abastecimento representa a sequência cronológica do dia e é um índice para o modelo. O Prazo para Finalizar Descarga de Trem foi definido para todos como zero hora do dia seguinte ao ETA Trem, assim, todo trem deve ser atendido no mesmo dia.

6.2.3. Cenários de Pátios

Os cenários de pátios foram criados manualmente, um para cada combinação de pares dos cenários de trem e navio, para cada possibilidade de quantidade de balizas (30 ou 50). Os três pátios possuem capacidades por baliza de 6.000, 10.000 e 12.000 t.

O estoque total no pátio foi criado para simular situação em que não há produto suficiente para atender todos os navios, assim, forçando determinado navio esperar a chegada de trens para finalizar seu carregamento. O estoque total no pátio equivale, para cada produto, a diferença entre a quantidade a ser carregada nos navios e as quantidades a serem entregues por trens.

A matriz de disposição do estoque de cada produto foi feita manualmente, respeitando uma baliza de separação entre produtos para evitar a contaminação entre os diferentes tipos de carga (Tabela 09). As balizas foram organizadas para se ter espaços vazios em cada pátio. Buscou-se ocupar cada baliza em seu máximo, exceto a última baliza preenchida , suficiente apenas para atender a quantidade estocada no pátio.

P001	**B1**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**	**B11**	**B12**
Pátio 1	0	0	5210	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Pátio 2	10000	10000	10000	10000	10000	0	0	0	0	0	0
Pátio 3	0	12000	12000	12000	0	0	0	0	0	0	0
P002	**B1**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B32**	**B33**	**B34**	**B35**	**B36**	**B37**
Pátio 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio 2	0	0	0	0	0	0	10000	10000	10000	10000	10000
Pátio 3	0	0	0	0	0	12000	12000	12000	12000	12000	12000

Tabela 9 - Exemplo de cenário de pátio

Alguns cenários de pátio não puderam ser criados pela falta de capacidade de armazenamento em função da quantidade de balizas por pátio e suas capacidades, para os parâmetros de carga atribuídos aos trens e navios. Este tipo de problema pode ser evitado reduzindo a quantidade de carregamentos nos cenários, porém, optou-se por mantê-los para demonstrar que, em situações reais é importante fazer análises das cargas, e das datas de trens e navios para se avaliar se pátios terão capacidade de atender as demandas dos navios e se haverá espaço suficiente para armazenamento.

Os cenários foram estabelecidos manualmente devido à complexidade de criar um modelo capaz de estabelecer cenários de simulação de situações reais. Inicialmente, utilizou-se algoritmo aleatório que não conseguiu representar adequadamente a realidade e foi abandonado.

6.2.4. Resultados do Conjunto de Cenários

Para experimentação numérica, o modelo utilizou a linguagem de programação *Python*, utilizando as bibliotecas do *Solver* Gurobi para a realização da otimização com métodos de *Branch and Bound* nativos do *Solver*.

Os resultados dos 18 cenários demostraram a dificuldade do modelo em resolver problemas complexos com dados reais no limite convencionado de uma hora, tempo máximo considerado para o modelo buscar uma solução ótima. Em situação real, é o tempo ideal para os planejadores analisarem, tomarem decisões e revisarem a programação. A coluna *Gap*, quando igual a zero, indica que o modelo chegou a um resultado ótimo, quando diferente de zero, indica que não foi possível convergir no limite de tempo considerado (Tabela 10 e Tabela 11).

Cenário	Tempo (ms)	(-) *Demurrage* (+) *Despatch* (R$)	Lower Bound (Min)	Gap (%)
TREMNAVIO_5N3D2P	4,029.50	-95.80	-95.80	0
TREMNAVIO_5N7D2P	3,601,332.20	-95.46	-95.67	0
TREMNAVIO_5N15D2P	3,601,815.20	-94.91	-95.09	0
TREMNAVIO_10N3D2P	508,013.90	-162.91	-162.91	0
TREMNAVIO_10N7D2P	3,612,113.50	-162.52	-162.66	0
TREMNAVIO_10N15D2P	3,603,827.50	-161.92	-440.56	-172
TREMNAVIO_14N7D2P	471,632.40	-239.89	-239.89	0
TREMNAVIO_14N15D2P	3,601,102.60	-28.97	-356.12	-1,129

Tabela 10 - Resultados dos cenários do modelo de sequenciamento de trem e navio

Cenários	Tempo (ms)	Tempo de Operação (Min)	Lower Bound (Min)	Gap (%)
PÁTIO_5N15D50B2P	3,734,817.30	2,562.65	1,337.81	48
PÁTIO_5N3D30B2P	3,612,999.40	668.15	658.40	1
PÁTIO_5N3D50B2P	3,623,395.70	668.40	641.90	4
PÁTIO_5N7D50B2P	3,648,061.90	1,587.15	1,427.37	10
PÁTIO_10N15D30B2P	3,731,166.50	2,706.65	1,502.20	44
PÁTIO_10N15D50B2P	3,773,505.10	2,669.44	2,074.12	22
PÁTIO_10N3D50B2P	3,651,918.70	835.19	805.10	4
PÁTIO_10N7D30B2P	3,669,679.50	1,489.75	599.31	60
PÁTIO_10N7D50B2P	3,740,008.20	1,540.10	564.40	63
PÁTIO_14N7D50B2P	3,680,293.30	1,694.30	1,393.20	18

Tabela 11 - Resultados dos cenários do modelo dos pátios

Em apenas dois cenários, TREMNAVIO_10N15D2P e TREMNAVIO_14N15D2P, o modelo de sequenciamento de trem e navio não foi capaz de resolver em uma hora. A quantidade de 10 e 15 navios somada ao prazo de 15 dias de abastecimento do sistema passou a exigir mais do modelo, não se encontrando um resultado ótimo.

O modelo do pátio de minimização do tempo total do navio despendido na recuperação e translado da recuperadora e do tempo devido ao distanciamento das pilhas alocadas no pátio

e as balizas em que o trem em fila vai descarregar não conseguiu resolver os cenários propostos no tempo limite. Os cenários se mostraram complexos para serem resolvidos no tempo limite adotado.

Como alternativa para resolver essa questão pode-se aumentar a capacidade das balizas e pátios ou reduzir a quantidade de carga dos navios. Para provar a utilidade do modelo, foram considerados cenários reduzidos para testar os limites do modelo, conforme mostrado a seguir.

6.3 Experimentação em Cenários Reduzidos

6.3.1. Cenário Reduzido 1

Este cenário para avaliação e experimentação do modelo utilizou dados reais de tamanho de cargas de trens e navios, datas de chegada estimada (ETA) e datas esperadas para processar carregamentos e descarregamentos. Foram considerados dois viradores operando em três pátios, cada um com capacidades de respectivamente seis, 10 e 12 mil *t* por baliza.

Adotou-se também um período em que três navios foram carregados com um dos produtos disponíveis nos pátios. Neste período, foram descarregados 100 trens com diferentes tipos de produto, todavia, nos experimentos, foram considerados 12 trens que transportam os dois produtos correspondentes aos carregamentos dos navios considerados. Para o mapa do pátio no início do planejamento, foi criado um exemplo reduzido com 10 balizas em cada pátio e produtos estocados (P001 e P002), conforme apresenta a Tabela 12.

P001	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**
Pátio 1	6000	6000	3000	0	0	0	0	0	0	0
Pátio 2	0	0	0	0	10000	10000	0	0	0	0
Pátio 3	12000	12000	12000	12000	12000	0	0	0	0	5900
P002	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**
Pátio 1	0	0	0	0	6000	6000	576	6000	6000	6000
Pátio 2	10000	10000	10000	0	0	0	0	10000	10000	10000
Pátio 3	0	0	0	0	0	0	12000	12000	0	0

Tabela 12 - Mapa do pátio no início do planejamento do cenário reduzida 1

Os parâmetros operacionais de navios, trens e pátio são os descritos no item 6.2. Os parâmetros *N*, V, M e P utilizados são três navios e dois Viradores, considerando que cada virador pode atender até 2 trens por dia e 2 Produtos. Além disso, foram considerados D = 3 dias, chegando *t* = 4 trens por dia.

O estoque nos pátios tem parâmetro $EstoquePátio_p$ igual a 100.900 *t* do produto P001 e 114.576 *t* do produto P002, com TL = 3 pátios, TB = 10 balizas por pátio, K_L = 6, 10 e 12 mil *t* e, $EstoqueInicioPátio_{lbp}$ equivalente aos valores da Tabela 12.

A Tabela 13 apresenta o cenário com os dados dos navios e a Tabela 14 o cenário com os dados dos trens.

Navio	**Produto**	**Carga**	**Turn Time**	**Prancha** t/dia	**C*Demurrage*** $K/dia	***Despatch*** $K/dia	**ETA_i**	**TD_i** Dias	**TT_i** Dias
N001	P002	89300	08:00:00	80000	50	25	6/4/20 3:00	1,12	1,04
N002	P002	97600	08:00:00	80000	50	25	7/4/20 12:00	1,22	1,11
N003	P001	100900	08:00:00	80000	50	25	8/4/20 1:00	1,26	1,13

Tabela 13 - Dados dos navios usados no cenário reduzido 1

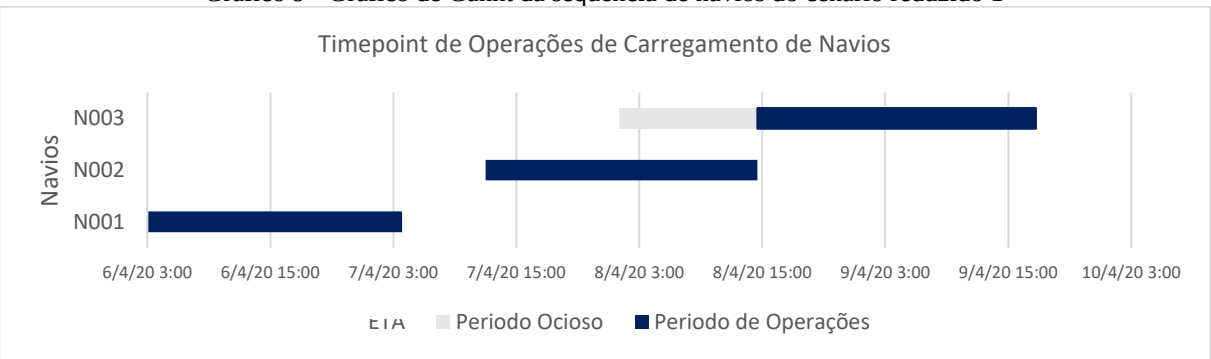
Trem	**Produto**	**Carga**	**ETA_td**	**Dia (d)**	**DataDispT_td**	**TT_td**
T001	P001	14201	5/4/20 9:36	1	43927	04:14:25
T002	P002	13828	5/4/20 14:24	1	43927	04:09:56
T003	P001	12258	5/4/20 14:24	1	43927	03:51:06
T004	P001	14393	5/4/20 16:48	1	43927	04:16:43
T005	P002	12027	6/4/20 4:48	2	43928	03:48:19
T006	P002	13221	6/4/20 12:00	2	43928	04:02:39
T007	P001	13654	6/4/20 14:24	2	43928	04:07:51
T008	P002	14070	6/4/20 16:48	2	43928	04:12:50
T009	P001	12228	7/4/20 2:24	3	43929	03:50:44
T010	P002	12819	7/4/20 4:48	3	43929	03:57:50
T011	P001	14458	7/4/20 7:12	3	43929	04:17:30
T012	P002	12359	7/4/20 17:45	3	43929	03:52:18

Tabela 14 - Dados dos trens usados do cenário reduzido 1

Resultados do Experimento do Cenário Reduzido 1

A solução dos modelos indicou que se deve seguir primeiro a sequência N001, seguida de N002 e N003. O Gráfico 9 mostra as datas de início e fim do carregamento de navio se o período em que o porto teria ficado ocioso.

Gráfico 9 - Gráfico de Gannt da sequência de navios do cenário reduzido 1



As Tabelas 15 e 16 mostram a consolidação dos resultados. A coluna “Cargas a Bordo” representa as cargas de trens que devem ir direto a bordo ou parcialmente ao pátio para cada navio; a coluna “Balizas Recuperadas” indica as balizas que serão recuperadas para carregar cada navio e o código “P1 B1 - 6000” indica que 6.000 *t* devem ser recuperadas no Pátio 1 na Baliza 1 e, por fim, a coluna “Destino” indica onde a carga de cada trem deve ser alocada.

Navio	**Produtos**	**Início**	**Fim**	**C*Demurrage***	***Despatch***	**Balizas Recuperadas**	**Cargas a Bordo**
N001	P002	6/4/20 3:00	7/4/20 3:51	0.00	2.01	Recuperadora 1: P1 (B1 - 6000;B4 - 12000; B7 - 12000;B9 - 12000); Pátio 2: (B3 - 10000); Recuperadora 2: P2 (B10 - 7589); Pátio 3 (B6 - 16000; B8 - 14000);	
N002	P002	7/4/20 12:00	8/4/20 14:31	0.00	2.87	Recuperadora 1: P1 (B5 - 12000;B6 - 8317; B8 - 12000); Pátio 2: (B2 - 14000; B4 - 1641; B5 - 4000; B7 - 1642; B9 - 10000); Recuperadora 2: P3 (B5 - 4000; B7 - 14000; B8 - 16000)	
N003	P001	8/4/20 14:31	9/4/20 17:42	21.73	0.00	Recuperadora 1: P1 (B1 - 6000;B3 - 12000; B6 - 900; B10 - 12000) Recuperadora 2: P2 (B5 - 14000); P3 (B4 - 12000; B5 - 12000; B8 - 16000; B10 - 16000)	

Tabela 15 - Consolidação de programação de navios cenário reduzido 1

Os resultados da experimentação mostraram que foi respeitado o sequenciamento dos navios, conforme os dados planejados. Não houve atraso para iniciar os navios N001 e N002. Somente o navio N003 foi penalizado com gastos de *Demurrage* ($k 21.73). Navios N001 e N002 receberam prêmio *Despatch* ($k 2,01 e $k 2,87) por finalizar o atendimento dos navios antes do tempo disponível, conforme previsto no planejamento.

Os gastos de *Demurrage* têm influência direta na fila de navios e no atendimento da programação. O modelo considerou as prioridades dos navios relacionadas ao nível de estoque de produto mais crítico e otimizou a programação e sequenciamento da fila de navios e trens em conjunto e, assim, reduzindo este custo com possibilidade de se alterar o sequenciamento dos navios, conforme disponibilidade de carga e projeção dos gastos com *Demurrage*.

Trem	Produto	Carga	Destino	Data início operação	Data fim operação	Atraso (h)	Duração (h)
T001	P001	14201	P3 - B3 - 14201	5/4/20 9:36	5/4/20 13:50	0,0	04:14:25
T002	P002	13828	P2 - B5 - 13828	5/4/20 15:17	5/4/20 19:27	0,0	04:09:56
T003	P001	12258	P2 - B2 - 12258	5/4/20 14:24	5/4/20 18:15	0,0	03:51:06
T004	P001	14393	P3 - B1 - 14393	5/4/20 16:48	5/4/20 21:04	0,0	04:16:43
T005	P002	12027	P1 - B6 - 6000; P1 - B10 - 2027	6/4/20 4:48	6/4/20 8:36	0,0	03:48:19
T006	P002	13221	P1 - B5 - 3354; P1 - B9 - 6000; P3 - B7 - 3867	6/4/20 12:00	6/4/20 16:02	0,0	04:02:39
T007	P001	13654	P1 - B2 - 3554; P3 - B10 - 10100	6/4/20 14:24	6/4/20 18:31	0,0	04:07:51
T008	P002	14070	P1 - B5 - 2646; P1 - B7 - 11424	6/4/20 16:48	6/4/20 21:00	0,0	04:12:50
T009	P001	12228	P2 - B5 - 12228	7/4/20 2:24	7/4/20 6:14	0,0	03:50:44
T010	P002	12819	P2 - B5 - 12819	7/4/20 4:48	7/4/20 8:45	0,0	03:57:50
T011	P001	14458	P3 - B3 - 14458	7/4/20 7:12	7/4/20 11:29	0,0	04:17:30
T012	P002	12359	P2 - B7 - 12359	7/4/20 17:45	7/4/20 21:37	0,0	03:52:18

Tabela 16 - Consolidação da programação de trens cenário reduzido 1

Neste cenário reduzido, o navio N003 iniciou seu carregamento após o ETA programado, sendo o tempo de atendimento superior ao tempo disponível, apesar de se contar com toda a carga no pátio no início do carregamento. O navio N002, carregado com o produto P002, teve seu último lote de carga (trem T012) finalizando a descarga no instante 7/4/20 21:37, antes do término previsto (Tabela 15).

Não foram descarregados trens direto para bordo, todos os produtos foram descarregados nos pátios para serem recuperados. Os trens TT05, TT06, TT07 e TT08 tiverem dois destinos para o empilhamento dos produtos nos pátios (Tabela 16).

Este cenário que simula a condição ideal de operação com disponibilidade de carga e ordenamento do ETA dos navios, permitiu avaliar o comportamento do modelo com o carregamento de apenas um produto por navio. Em situação real, os navios podem ser carregados com mais de um produto, geralmente um por vez.

6.3.2. Cenário Reduzido 2

Este cenário foi criado para avaliação e experimentação do modelo na condição de um navio carregar mais de um produto. Para tanto, foram utilizados dados reais de tamanho de

cargas de trens e navios, datas de chegada estimada (ETA) e datas esperadas para os processos. Foi considerado situação com dois viradores operando em três pátios com capacidades 12, 16 e 18 mil *t* por baliza.

No período analisado foram carregados três navios e 100 trens descarregados. Nos experimentos foram considerados apenas alguns trens transportando dois produtos correspondentes aos carregamentos dos navios. O mapa do pátio no início do planejamento considerou 10 balizas em cada pátio e produtos estocados, conforme apresenta a Tabela 17.

P001	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**
Pátio 1	4000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio 2	0	0	0	10000	10000	10000	10000	10000	0	0
Pátio 3	0	0	0	0	0	0	0	8000	0	12000
P002	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**
Pátio 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio 3	0	11000	10000	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 17 - Mapa do pátio no início do planejamento do cenário reduzido 2

Como no Cenário Reduzido 1 os parâmetros operacionais de navios, trens e pátio considerados no Cenário Reduzido 2 foram os mesmos do Cenário 1. Os parâmetros *N*, V, M e P utilizados são de três navios, dois Viradores, sendo que cada virador pode atender até quatro trens por dia e dois Produtos. Ouros parâmetros considerados foram D = 3 dias, chegando *t* = 8 trens por dia.

Navio	**Produtos**	**Carga**	**Turn Time**	**Prancha** (t/dia)	**C*Demurrage*** (*Demurrage Rate*)	***Despatch*** (*Despatch Rate*)	**ETA_i**	**TD_i** (Dias)	**TT_i** (Dias)
N001	P001	120.000	08:00:00	80000	50	25	7/4/20 11:08	1,50	1,29
N001	P002	-	08:00:00	80000	50	25			
N002	P001	58.000	08:00:00	80000	50	25	8/4/20 7:10	1,81	1,50
N002	P002	87.000	08:00:00	80000	50	25			
N003	P001	-	08:00:00	80000	50	25	9/4/20 2:16	1,79	1,48
N003	P002	143.000	08:00:00	80000	50	25			

Tabela 18 - Dados dos navios usados do cenário reduzido 2

O estoque nos pátios, tem parâmetro $EstoquePátio_p$ igual a 74.000 *t* do produto P001 e 21.000 *t* do produto P002, com TL = 3 pátios, TB = 10 balizas por pátio, K_L = 12, 16 e 18 mil *t* e, $EstoqueInicioPátio_{lbp}$ equivalente aos valores da Tabela 17. As Tabelas 18 e 19 mostram os dados dos cenários de navios e trens.

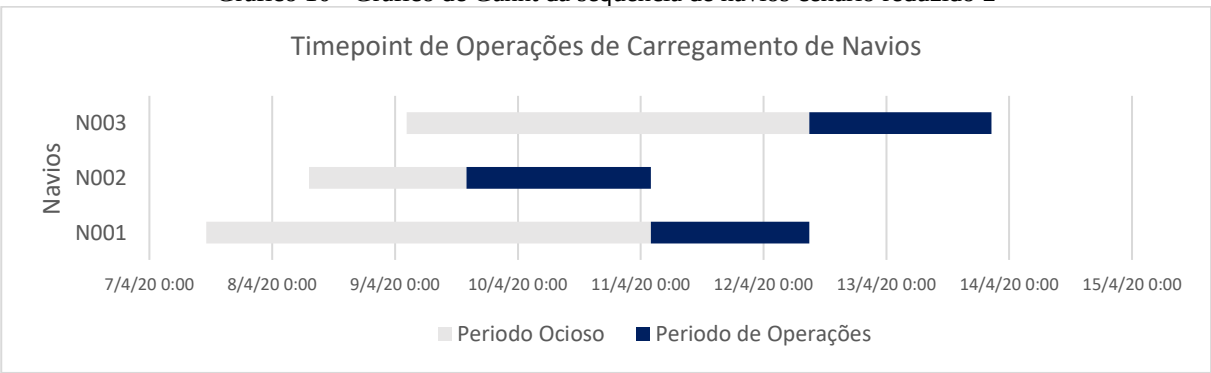
Trem	Produto	Carga	ETA_td	Dia (d)	DataDispT_td	TT_td
T001	P002	14000	8/4/20 0:27	1	09/04/2020	04:19:12
T002	P002	13000	8/4/20 2:29	1	09/04/2020	04:00:00
T003	P002	14000	8/4/20 2:33	1	09/04/2020	04:12:00
T004	P002	14000	8/4/20 2:05	1	09/04/2020	04:12:00
T005	P002	13000	8/4/20 6:29	1	09/04/2020	04:00:00
T006	P002	13000	8/4/20 10:09	1	09/04/2020	04:00:00
T007	P002	13000	8/4/20 12:59	1	09/04/2020	04:00:00
T008	P002	12000	8/4/20 15:03	1	09/04/2020	03:48:00
T009	P002	12000	9/4/20 2:15	2	10/04/2020	03:48:00
T010	P002	14000	9/4/20 5:10	2	10/04/2020	04:12:00
T011	P002	12000	9/4/20 3:32	2	10/04/2020	03:48:00
T012	P002	12000	9/4/20 6:30	2	10/04/2020	03:48:00
T013	P002	14000	9/4/20 10:38	2	10/04/2020	04:12:00
T014	P002	13000	9/4/20 6:22	2	10/04/2020	04:00:00
T015	P002	14000	9/4/20 15:34	2	10/04/2020	04:12:00
T016	P002	12000	9/4/20 12:26	2	10/04/2020	03:48:00
T017	P001	13000	10/4/20 3:23	3	11/04/2020	04:00:00
T018	P001	14000	10/4/20 5:55	3	11/04/2020	04:12:00
T019	P001	14000	10/4/20 2:43	3	11/04/2020	04:12:00
T020	P001	13000	10/4/20 6:07	3	11/04/2020	04:00:00
T021	P001	12000	10/4/20 9:30	3	11/04/2020	03:48:00
T022	P001	12000	10/4/20 10:39	3	11/04/2020	03:48:00
T023	P001	14000	10/4/20 13:45	3	11/04/2020	04:12:00
T024	P001	12000	10/4/20 16:57	3	11/04/2020	03:48:00

Tabela 19 - Dados dos trens usados do cenário reduzido 2

Resultados do Experimento do Cenário Reduzido 2

Os resultados dos modelos indicaram que se deve seguir primeiro a sequência N002, seguida das N001 e N003. O Gráfico 10 mostra as datas de início e fim do carregamento de navios e o período em que o porto teria ficado ocioso.

Gráfico 10 - Gráfico de Gannt da sequência de navios cenário reduzido 2



A Tabelas 20 e Tabela 21 apresentam os resultados e a coluna “Cargas a Bordo” representa as cargas de trens que devem ir direto a bordo ou parcialmente ao pátio para cada navio; a coluna “Balizas Recuperadas” indica as balizas que serão recuperadas para carregar cada navio e o código “P1 B1 - 3000” indica que 3.000 *t* devem ser recuperadas no Pátio 1 na Baliza 1, e a coluna “Destino” indica onde a carga de cada trem deve ser alocada.

Navio	**Produtos**	**Início**	**Fim**	**C*Demurrage***	***Despatch***	**Balizas Recuperadas**	**Cargas a Bordo**
N001	P001	11/04/2020 01:57:39	12/04/2020 08:57:39	153,79	-	Recuperadora 1: [P001: (P1 - B1 - 3000; P1 - B2 - 11750; P1 - B3 - 9250; P2 - B1 - 12000; P2 - B2 - 16000; P2 - B3 - 8000)] Recuperadora 2: [P001: (P2 - B5 - 8000; P2 - B6 - 10000; P2 - B7 - 8000; P3 - B5 - 9000; P3 - B6 - 10292; P3 - B7 - 14708)]	-
N002	P001	09/04/2020 13:57:39	11/04/2020 01:57:39	31,85	-	Recuperadora 1 :[P001: (P1 - B5 - 6000; P1 - B6 - 6000; P2 - B6 - 6000; P2 - B7 - 8000; P2 - B8 - 8000; P2 - B9 - 7291);P002: (P1 - B7 - 2584; P1 - B8 - 6000; P1 - B9 - 6000)] Recuperadora 2: [P001: (P2 - B3 - 8000; P3 - B5 - 8709); P002: (P2 - B4 - 11000; P3 - B3 - 12000; P3 - B4 - 18000; P3 - B6 - 15416)]	-
N002	P002						
N003	P002	12/04/2020 08:57:39	13/04/2020 20:33:39	132,07	-	Recuperadora 1: [P002: (P1 - B3 - 6375; P1 - B4 - 10500; P1 - B5 - 9000; P1 - B6 - 9000; P2 - B3 - 8000; P2 - B4 - 12000; P2 - B5 - 8000; P2 - B6 - 8000)] Recuperadora 2: [P002: (P2 - B8 - 12000; P2 - B9 - 12000; P2 - B10 - 14000; P3 - B8 - 15750; P3 - B9 - 6625; P3 - B10 - 11750)]	-

Tabela 20 - Consolidação de programação de navios cenário reduzido 2

Os resultados da experimentação mostraram o sequenciamento dos navios foi alterado em relação ao planejado. Houve atraso para iniciar os três navios N001, N002 e N003, provavelmente por falta de carga nos pátios ou a caminho para atender o ETA dos navios. O modelo entendeu que foi melhor atrasar os navios para recuperar carga dos pátios, em vez de considerar trem direto para bordo.

Neste cenário, todos navios foram penalizados com gastos de *Demurrage* N001 ($K 153,79), N002 ($k 31,85) e N003 ($k 132,07), por finalizar o atendimento dos navios após o tempo previsto no horizonte do plano.

Trem	Produto	Carga	Destino	Data início operação	Data fim operação	Atraso (h)	Duração (h)
T001	P002	14000	P3 - B10 - 14000;	08/04/2020 00:27	08/04/2020 04:46	00:00:00	04:19:12
T002	P002	13000	P2 - B1 - 13000;	08/04/2020 04:46	08/04/2020 08:46	02:16:57	04:00:00
T003	P002	14000	P3 - B8 - 14000;	08/04/2020 06:17	08/04/2020 10:29	03:43:29	04:12:00
T004	P002	14000	P3 - B1 - 14000;	08/04/2020 02:05	08/04/2020 06:17	00:00:00	04:12:00
T005	P002	13000	P3 - B4 - 13000;	08/04/2020 08:46	08/04/2020 12:46	02:17:11	04:00:00
T006	P002	13000	P1 - B3 - 13000;	08/04/2020 10:29	08/04/2020 14:29	00:19:44	04:00:00
T007	P002	13000	P2 - B7 - 13000;	08/04/2020 12:59	08/04/2020 16:59	00:00:00	04:00:00
T008	P002	12000	P2 - B4 - 12000;	08/04/2020 15:03	08/04/2020 18:51	00:00:00	03:48:00
T009	P002	12000	P1 - B9 - 5998; P3 - B7 - 6002;	09/04/2020 02:15	09/04/2020 06:03	00:00:00	03:48:00
T010	P002	14000	P1 - B4 - 14000;	09/04/2020 06:03	09/04/2020 10:15	00:53:02	04:12:00
T011	P002	12000	P1 - B1 - 12000;	09/04/2020 03:32	09/04/2020 07:20	00:00:00	03:48:00
T012	P002	12000	P1 - B3 - 4000; P2 - B1 - 8000;	09/04/2020 07:20	09/04/2020 11:08	00:49:44	03:48:00
T013	P002	14000	P1 - B8 - 6000; P2 - B10 - 8000;	09/04/2020 11:08	09/04/2020 15:20	00:29:46	04:12:00
T014	P002	13000	P1 - B2 - 13000;	09/04/2020 10:15	09/04/2020 14:15	03:53:11	04:00:00
T015	P002	14000	P2 - B4 - 5000; P3 - B8 - 9000;	09/04/2020 15:34	09/04/2020 19:46	00:00:00	04:12:00
T016	P002	12000	P1 - B4 - 6000; P3 - B3 - 6000;	09/04/2020 14:15	09/04/2020 18:03	01:48:43	03:48:00
T017	P001	13000	P2 - B3 - 5000; P2 - B8 - 8000;	10/04/2020 03:23	10/04/2020 07:23	00:00:00	04:00:00
T018	P001	14000	P1 - B5 - 6000; P3 - B2 - 8000;	10/04/2020 06:55	10/04/2020 11:07	00:59:37	04:12:00
T019	P001	14000	P3 - B1 - 9000; P3 - B10 - 5000;	10/04/2020 02:43	10/04/2020 06:55	00:00:00	04:12:00
T020	P001	13000	P1 - B10 - 4291; P3 - B5 - 8709;	10/04/2020 07:23	10/04/2020 11:23	01:16:08	04:00:00
T021	P001	12000	P2 - B3 - 3000; P3 - B9 - 9000;	10/04/2020 11:07	10/04/2020 14:55	01:37:29	03:48:00
T022	P001	12000	P1 - B1 - 6000; P1 - B6 - 6000;	10/04/2020 11:23	10/04/2020 15:11	00:44:15	03:48:00
T023	P001	14000	P2 - B6 - 6000; P2 - B7 - 8000;	10/04/2020 14:55	10/04/2020 19:07	01:10:19	04:12:00
T024	P001	12000	P1 - B7 - 4709; P2 - B9 - 7291;	10/04/2020 16:57	10/04/2020 20:45	00:00:00	03:48:00

Tabela 21 - Consolidação da programação de trens cenário reduzido 2

O navio N002 com dois produtos a serem carregados resultou em um número maior de movimentos nos pátios para recuperar os produtos. Além disso, não foram descarregados trens direto para bordo, sendo todos os produtos descarregados nos pátios para serem recuperados. Dos trens apresentados, 13 foram destinados para o empilhamento em mais de um destino, ou seja, o conjunto de pátio e baliza.

O modelo respeita a ordem dos trens e não permite alterar o seu sequenciamento, como poderia ser feito na fila de navios. Isso se deve pelo fato de que a fila de trens é ditada pela capacidade produtiva da mina e o plano de vendas dos produtos. Na prática, o terminal portuário não tem capacidade de alterar o plano de chegada dos trens, determinado pela mina. Cabe ao terminal portuário organizar a descarga dos trens, conforme disponibilidade de equipamentos e espaço nos pátios.

Este cenário avaliou o comportamento do modelo para uma situação de carregamento de navios com dois produtos, comum ao terminal portuário. Os resultados demonstraram que o modelo atende esta condição com a utilização de dados reais.

Podem ser simulados e estudados diversos cenários, no entanto, ainda se observa para situações com complexidade alta, a dificuldade do modelo em resolvê-las em tempo aceitável. A combinação de métodos heurísticos para otimizar o tempo de processamento pode ser uma alternativa para a evolução da abordagem deste estudo.

6.3.3. Resultados das Cenários Reduzidos Sem o Uso do Modelo

Para se verificar se o modelo traz resultados melhores que as práticas usuais a mão, os cenários foram analisados como se planejadores tivessem de fazer a programação. A comparação dos resultados resultou das estimativas de gastos com *Demurrage*, considerado no modelo de sequenciamento de trens e navios.

A solução realizada como o praticado no terminal estudado considerou:

a) os navios foram sequenciados, conforme regra FIFO, o primeiro navio a entrar na fila é o primeiro a ser atendido, não sendo possível a alteração da ordem dos navios;
b) a data de início de navios equivale ao máximo entre o ETA do navio e a data de término do navio anterior;
c) a data de término do navio equivale a data de início somado ao tempo total de operação de carregamento (TT_I), se houver estoque suficiente. Caso contrário, equivale a data

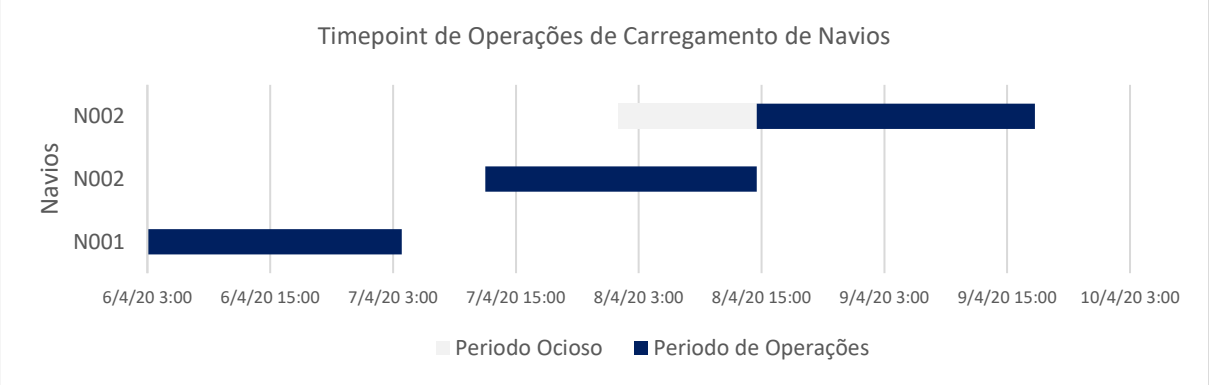
de término do descarregamento do último trem a fornecer carga suficiente para atender demanda do navio;

d) acréscimo de 3,5 horas equivalentes ao tempo de liberação do navio e término da manobra para desatracar navio;

e) o estoque inicial e a caminho por trens são iguais.

De forma semelhante aos Cenário Reduzido 1 foi simulada a condição ideal de operação com disponibilidade de carga, bom espaçamento entre o ETA dos navios e carregamento de apenas um produto. A solução estimada sem recurso de otimização foi igual ao resultado com o modelo (Gráfico 11 e Tabela 22).

Gráfico 11 - Gráfico de Gannt do cenário reduzido 1 sem uso do modelo

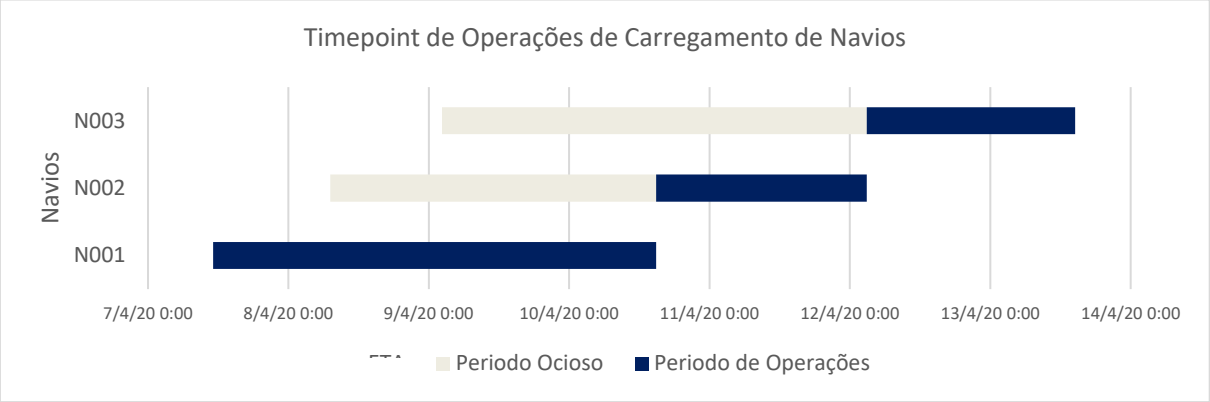


Navio	Produtos	Início	Fim	C*Demurrage*	*Despatch*	Balizas Recuperadas	Cargas a Bordo
N001	P002	6/4/20 3:00	7/4/20 3:51	0.00	2.01		
N002	P002	7/4/20 12:00	8/4/20 14:31	0.00	2.87		
N003	P001	8/4/20 14:31	9/4/20 17:42	21.73	0.00		

Tabela 22 - Programação de navios do cenário reduzido 1 sem uso do modelo

O Cenário Reduzido 2 simula situações com atrasos em potencial por falta de produtos no pátio e carregamento de navios com dois produtos. Com a regra FIFO, o navio N001 teve seu período de operação estendido por aguardar chegar carga para atender a demanda, extrapolando o tempo disponível e aumentando o tempo ocioso dos navios N002 e N003. Em situação real, é difícil recuperar atrasos na fila dos navios, isso exige bons desempenho e atendimento à programação. Os resultados são mostrados no Gráfico 12 e Tabela 23.

Gráfico 12 - Gráfico de Gannt do cenário reduzido 2 sem uso do modelo



Navio	Produtos	Início	Fim	C*Demurrage*	*Despatch*	Balizas Recuperadas	Cargas a Bordo
N001	P001	07/04/2020 11:08	10/04/2020 14:53	82.83	-		Trens 17, 18 e 19 (Carga completa) Trem 20 - 5000
N002 N002	P001 P002	10/04/2020 14:53	12/04/2020 02:53	100.47	-		
N003	P002	12/04/2020 02:53	13/04/2020 14:29	136.10	-		

Tabela 23 - Programação de navios do cenário reduzido 2 sem uso do modelo

Os dados da Tabela 24 comparam os resultados para as soluções do Cenário reduzido 2 com e sem o uso do modelo de otimização, demonstrando que os gastos totais com *Demurrage* foi menor com a solução com o modelo ($ 317.71) do que a sem o modelo ($ 319.40), ou seja, $ 1.69 a menos.

Navio	Produto	Carga	Resultado com Modelo			Resultado sem Modelo		
			Início	Fim	*Demurrage*	Início	Fim	*Demurrage*
N001	P001	120,000	11/04/2020 01:57	12/04/2020 08:57	153.79	07/04/2020 11:08	10/04/2020 14:53	82.83
N002 N002	P001 P002	58,000 87,000	09/04/2020 13:57	11/04/2020 01:57	31.85	10/04/2020 14:53	12/04/2020 02:53	100.47
N003	P002	143,000	12/04/2020 08:57	13/04/2020 20:33	132.07	12/04/2020 02:53	13/04/2020 14:29	136.10
***Demurrage* Total**					**317.71**			**319.40**

Tabela 24 - Comparativo das soluções para o cenário reduzido 2

Nota-se que, no primeiro caso, a ordem do navio foi alterada, no segundo foi respeitada a regra FIFO. O modelo se mostrou mais indicado para situações com potencial risco de atraso dos navios por falta de produtos no pátio. Além disso, observou-se que o modelo é capaz de decidir se deve ou não interferir na fila FIFO.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo alcançou seus objetivos ao entender e propor solução para problemas diários de terminais portuários de exportação de minério de ferro como o gerenciamento inadequado de pátios de estocagem, a dificuldade de alocação dos produtos nos pátios, a perda de tempo efetivo operacional por eventos diversos, e problemas na programação de atendimento dos trens e navios por decisões equivocadas. Para tanto, foi desenvolvido e testado um modelo hierárquico de otimização para gestão integrada de terminal portuário de exportação de minério, que recebe produtos por modal ferroviário, estocam em pátios e depois os exportam.

A revisão bibliográfica realizada identificou um número reduzido de trabalhos científicos focalizando a otimização e a gestão integrada de pátio de estocagem e processos portuários de granéis sólidos. No entanto, ficou claro que problemas dessa magnitude requerem modelos complexos, difíceis de serem modelados apenas por Programação Linear. A maioria dos autores identificados aplicou técnicas que combinam programação linear e métodos heurísticos, tendo em vista a complexidade de se modelar programas não-lineares para obter resultados satisfatórios em rápido processamento. A contribuição desta revisão está no Capítulo 2, onde podem ser observadas as discussões sobre o uso de modelos de otimização, para gestão de integrada de terminais de granéis sólidos, que orientam este estudo.

Para embasamento, o estudo apresentou as características de terminais portuários especializados na exportação de minério de ferro, abordando-se seus diferentes sistemas, instalações, equipamentos e processos operacionais, desde a chegada da carga por terra até o embarque nos navios. O estudo de caso foi feito em um terminal, especializado em granéis sólidos, onde foram realizadas visitas e reuniões estratégicas para coletar dados, identificar os principais gargalos e oportunidades de melhorias, assim como entender como o planejamento e programação das operações podem influenciar o desempenho global do sistema. Dessa forma, pôde-se caracterizar a gestão de pátio integrado aos seus processos operacionais, o que orientou o desenvolvimento do modelo.

A gestão integrada dos processos e a tomada de decisão de planejamento portuário envolvem diversos aspectos, entre eles, a otimização da alocação dos produtos nos pátios, o processo de descarga de trens e o carregamento de navios. Os pátios possuem restrições de capacidade, de rotas e de movimentação dos equipamentos. Foi identificada a dificuldade do terminal em planejar e programar seus processos, resultando em tempos de ociosidade dos sistemas, necessidade de reprogramar as operações e baixo desempenho do terminal. Atualmente, o terminal estudado não possui modelo de otimização ou sistema integrado de

apoio às decisões de programação, justificando a contribuição e relevância deste estudo de desenvolvimento de modelo de otimização para apoio à tomada de decisões na gestão portuária.

O modelo proposto foi desenvolvido por meio da integração de dois modelos, um estratégico e um tático, com técnicas de Programação Linear (PL), aplicadas a problemas reais. Para decisões estratégicas, o modelo otimiza a programação e sequenciamento da fila de navios e trens em conjunto, considerando a variação de estoque nos pátios e o fluxo de carregamento de navios como dados de entrada do modelo, assim possibilitando a redução dos gastos com *Demurrage*. Para decisões táticas dos pátios, o modelo possibilita a alocação e retomada dos produtos para redução dos tempos não operacionais e garantia da existência de estoque dos produtos durante o carregamento do navio, reduzindo o tempo na recuperação e tempo total de atendimento do navio.

Neste estudo o modelo permite analisar operações com produto de qualidades diferentes. Mais de um tipo de produto pode ser carregado no navio, porém, um por vez. Além disso, o navio pode iniciar seu carregamento mesmo que toda a carga não esteja alocada nos pátios, para isso, a carga que chegará de trem durante o carregamento do navio é contabilizada no tempo total de atendimento do navio. É relevante destacar que os trens podem ser descarregados direto para o navio, desde que seja o mesmo produto, condição ainda não encontrada na literatura, seja o fluxo da carga direto do trem para o navio, assim como do navio para o trem.

Considerou-se que as taxas de transferências para os navios e dos trens são conhecidas, incorporando o tempo de eventuais falhas do sistema. Assim, o modelo se concentrou em otimizar a alocação dos produtos nos pátios para reduzir o tempo de translado das recuperadoras durante o carregamento do navio. Por se tratar de modelo voltado para terminais dedicados à exportação de minério, onde se faz necessário descarregar trens e carregar navios, o estudo focalizou encontrar a melhor ocupação do pátio para reduzir o tempo de translado das recuperadoras durante o embarque, ou seja, o tempo efetivo em produção somado ao tempo em que o equipamento busca no pátio o produto para finalizar o carregamento do navio, em um só berço.

O desenvolvimento desses modelos permitiu selecionar para uma origem representada pelo par virador-produto, o melhor destino possível, isto é, qual o pátio e baliza que estão disponíveis e qual seria a melhor escolha no momento para descarregar e empilhar a carga de um trem em fila. O mesmo se mostrou válido para uma origem representada pelo par pátio-baliza como melhor escolha no momento para recuperar e carregar o produto no navio.

Este estudo foi desenvolvido para um terminal portuário existente. No seu diagnóstico operacional, foi possível identificar vários eventos que afetam diretamente sua eficiência global e, assim, utilizar os dados de programação para os testes computacionais. O modelo de otimização desenvolvido e testado permitiu avaliar diferentes cenários com dados de planos reais.

Inicialmente, foram criados 18 cenários para análise com dois produtos, cenários com cinco, 10 e 14 navios, cenários de planejamento para três, sete e 15 dias de abastecimento dos pátios e cenários com plano de 12 trens para entrega. Os resultados demostraram a dificuldade do modelo em resolver problemas complexos com dados reais dentro do limite imposto de uma hora. Não foi possível resolver no limite de tempo estipulados dois cenários no modelo de sequenciamento de trem e navio e no modelo do pátio, concluindo-se que esses cenários são complexos para serem resolvidas nesse tempo limite.

A seguir, no teste de utilidade e limites do modelo foram criados cenários reduzidos. O primeiro cenário reduzido avaliou a situação em que apenas um produto pode ser carregado no navio. O segundo cenário reduzido contemplou até dois produtos, um por vez, sendo carregado no navio.

Os resultados mostraram que para o Cenário Reduzido 1, o sequenciamento dos navios foi respeitado, conforme planejado. Não houve atraso para iniciar os navios N001 e N002. Apenas o navio N003 foi penalizado com gastos com *Demurrage* ($k 21.73) por não finalizar o atendimento dos navios no tempo disponível e previsto no planejamento.

No Cenário Reduzido 2, o sequenciamento dos navios foi alterado em relação ao planejado. Houve atraso para iniciar os navios N001, N002 e N003, por falta de carga disponível para atender seu ETA, consequentemente, todos navios foram penalizados gastos com *Demurrage* N001 ($K 153,79), N002 ($k 31,85) e N003 ($k 132,07). O modelo entendeu que foi melhor atrasar os navios para recuperar carga dos pátios do que considerar trem direto para bordo.

Por fim, para verificar que o modelo produz resultados melhores que as práticas comuns manuais, foi realizada uma análise comparativa dos cenários e soluções do modelo e as sem seu uso. No Cenário Reduzido 1, os resultados foram iguais. O cenário corresponde a um exemplo reduzido de solução simples, onde se buscou simular condição ideal de operação.

O Cenário Reduzido 2, que simulou situações com atrasos em potencial, resultou em um período estendido de operação para o navio N001 por aguardar chegar carga para atender a demanda, aumentando o tempo ocioso dos navios N002 e N003. Os gastos totais com *Demurrage* indicaram a solução com o modelo como de menores gastos ($ 317.71), quando

comparada com a solução sem o modelo ($ 319.40), ou seja, redução de $ 1.69. Deve-se nota que, em situações reais, dificilmente se recupera atrasos na fila dos navios, o que exigiria bons desempenhos e atendimento à programação.

Pode-se concluir que o modelo pode ser utilizado para apoiar as decisões de gestão de pátios, melhorando a ocupação dos espaços e utilização dos ativos, assim como aumentando a eficiência do terminal como um todo. O modelo mostrou-se capaz de otimizar a alocação de produtos nos pátios e chegada de trens, reduzindo o tempo de recuperação dos produtos durante o carregamento dos navios. Apesar do modelo resolver um problema real, a modelagem se mostrou complexa de ser implantada apenas com Programação Linear.

Os resultados se mostraram satisfatórios, no entanto, para cenários com níveis elevados de detalhamento das operações é recomendado a combinação de métodos heurísticos para otimizar o tempo de processamento e a proposição de modelos.

Como o modelo é hierárquico, por meio de dois modelos, a integração estruturada em um só modelo pode reduzir o tempo de processamento e garantir bons resultados. Modificações e adaptações conforme as diferentes rotinas dos portos podem ser implementadas. Incorporar condições operacionais como falhas nos processos, manutenções corretivas e preventivas, qualidade dos produtos e paralisações por causas externas é complexo e exige o abastecimento de informações em tempo real, contudo, possibilita o desenvolvimento de modelos de otimização dinâmica.

A abordagem apresentada é inédita na utilização de modelo hierárquico de otimização para gestão integrada de pátios de estocagem e processos portuários para exportação de minério de ferro, desenvolvido inteiramente com técnica de Programação Linear (PL).

O estudo pode ser estendido posteriormente, ao se considerar:

a) estruturar o modelo hierárquico em si para reduzir o tempo de processamento com bons resultados;
b) permitir a coleta e integração de dados em tempo real para se obter otimização dinâmica dos processos a níveis operacionais;
c) permitir criar trens virtuais, com parâmetros nulos, para uma quantidade fixa de trens por dia chegando ao terminal;
d) cenários de pátios podem ser criadas com diferentes quantidades de pátios e baliza, assim como capacidade por balizas para avaliar níveis de serviços de estocagem;
e) estudar conjunto de restrições que respeite conflito de rota entre os pátios, sequência de movimentos das máquinas de pátio, falhas e problemas de nível operacional não conhecido com antecedência;

f) investigar e testar outros pacotes computacionais para problemas de programação linear complexos e de grande porte;
g) testar métodos heurísticos para aumentar o nível de complexidade e o tamanho do sistema;
h) integrar o modelo desenvolvido para terminal portuário com modelos de otimização para produção da mina.

O estudo pretende contribuir para o desenvolvimento futuro de ferramentas para o planejamento e programação do sistema de produção de granéis sólidos minerais e para otimizar os processos desde o beneficiamento nas minas, compra de minério de ferro, transporte ferroviário até a entrega de produtos aos clientes nos diversos mercados de atuação.

As economias dos países e suas organizações estão sempre interessadas em soluções e tecnologias de melhoria da eficiência, redução de custos operacionais, melhor utilização dos seus ativos e recursos, em um planejamento integrado das cadeias de suprimentos envolvidas. Outra consideração diz respeito às questões ambientais, não objeto deste estudo, mas que podem ser incorporadas em desenvolvimentos futuros.

REFERÊNCIAS

ABDEKHODAEE, A. et al. **Integration of Stockyard and Rail Network:** A Scheduling Case. Clayton South: CSIRO Mathematical and Information Sciences, 2004.

ALDERTON, P. M. **Lloyd's Practical Shipping Guides, Port Management and Operations**. 3ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2008.

BARROS, V. H. et al. **Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints**. [S.l.]: Elsevier Ltd, v. Computers & Industrial Engineering 60 (2011) 606–613, 2011.

BOLAND, N. et al. **Improved stockyard management strategies for coal**. Perth: 19th International Congress on Modelling and Simulation, 2011.

BOLAND, N.; GULCZYNSKI, D.; SAVELSBERGH, M. **A stockyard planning problem**. [S.l.]: EURO J Transp Logist (2012) 1:197–236, 2012.

BRASIL. **Presidência da República. Lei Nº 12.815, de 5 de Junho de 2013.** [S.l.]: [s.n.], 2013. Disponivel em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12815.htm>. Acesso em: 2018.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. Londres: Martin Bulmer, 1989.

CAUCHICK MIGUEL, A. **Metologia da Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier:ABEPRO, 2012.

CSN MINERAÇÃO. **Plano Diretor de Operações**. Itaguaí: [s.n.], 2021.

DAHAL, K. et al. **A Port System Simulation Facility with an Optimization Capability**. Derby: International Journal of Computational Intelligence and Applications, v. Vol. 3, No. 4 (2003) 395

FLORES, R. G. et al. **Medium-term Rail Planning at Rio Tinto Iron Ore**. Perth,: [s.n.], 2011.

GOOGLE EARTH. **Porto de Itaguaí**. [S.l.]: [s.n.], 2022.

GOOT, M. V. D. **Master's Thesis:** Optimizing performance of a dry bulk terminal by integrating the seaside and the stockyard. Rotterdam: Erasmus University Rotterdam, 2017.

IBRAM. **Relatório Anual de Atividades:** Julho de 2017 - Junho de 2018. [S.l.]: [s.n.], 2018.

IRFANBABU, S. A.. K.. et al. **Minimizing delay of ships in bulk terminals by simultaneous ship scheduling, stockyard planning and train scheduling**. [S.l.]: [s.n.], v. Maritime Economics & Logistics (2015) 17, 464–492, 2015.

KIM, B.-I.; KOO, J.; PARK, B. S. **A raw material storage yard allocation problem for a large-scale steelworks.** [S.l.]: Int J Adv Manuf Technol (2009) 41:880–884, 2009.

MARCOS JUNIOR, W. J. S. et al. **Modelo matemático para otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem de portos e carregamento de navios**. Ponta Grossa: ABEPRO, v. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2018.

MENEZES, G. C.; MATEUS, G. R.; RAVETTI, M. G. **Heuristic methods to solve a production planning and scheduling problem in bulk ports**. [S.l.]: [s.n.], 2016a. Acesso em: Outubro 2019.

MENEZES, G. C.; MATEUS, G. R.; RAVETTI, M. G. **A hierarchical approach to solve a production planning and scheduling problem in bulk cargo terminal**. [S.l.]: Elsevier Ltd, v. Computers & Industrial Engineering 97 (2016) 1–14, 2016b.

MENEZES, G. C.; MATEUS, G. R.; RAVETTI, M. G. **A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports**. Belo Horizonte: European Journal of Operational Research 258 (2017) 926–937, 2016c.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **COMEX STAT**. [S.l.]: [s.n.], 2022. Disponivel em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. Acesso em: Março 2022.

MOURA, J. P. **Operação Portuária Virador de Vagão**. São Luís: UFMA – Universidade Federal do Maranhão e VALE, 2011a.

MOURA, J. P. **Operação Portuária Operação de Empilhadeira**. São Luís: UFMA – Universidade Federal do Maranhão e VALE, 2011b.

PEIXOTO, G. S. **Estruturas Portuárias**. São Luis: UFMA, 2011.

PEREIRA, F. G. G.; BOTTER, R. C. **Implantação de terminal portuário no corredor logístico de exportação do Arco Norte:** fatores de decisão entre porto público e terminal de uso privado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2017.

PRATAP, S. et al. **Rule based optimization for a bulk handling port operations**. New York: Springer Science+Business Media New York 2015, 2015.

PRATAP, S. et al. **Integrated scheduling of rake and stockyard management with ship berthing:** a block based evolutionary algorithm. Kharagpur,: International Journal of Production Research, v. Vol. 54, No. 14, 4182–4204, 2016.

TANG, L.; SUN, D.; LIU, J. **Integrated Storage Space Allocation and Ship Scheduling Problem in Bulk Cargo Terminals**. Leicestershire,: Loughborough University Institutional Repository, 2015.

UNSAL, O.; OGUZ, C. **An exact algorithm for integrated planning of operations in dry bulk terminals**. Istanbul,: College of Engineering, Koc University, v. Transportation Research Part E 126 (2019) 103–121, 2019.

VALE. **Book Portuário**. [S.l.]: GAOPG - Gerência de Gestão Portuária, 2008a.

VALE. **Operação de Recuperadora:** Trilha Técnica de Operação Portuária. [S.l.]: VALER – Educação VALE, 2008b.

VALE. **Regulamento de Operações Portuárias – Porto de Ponta da Madeira**. Nº: REG-0006-GAOPG. 2010a. ed. [S.l.]: DIID – Diretoria de Inovação e Desenvolvimento, 2010.

WANG, C.; LU, X.-W.; SITTERS, R. **Scheduling Reclaimer Operations in the Stockyard to Minimize Makespan**. National Natural Science Foundation of China. ed. [S.l.]: Acta Mathematicae Applicatae Sinica, English Series, v. Vol. 34, No. 3 (2018) 597–609, 2018. Disponivel em: <http://www.ApplMath.com.cn & www.SpringerLink.com>. Acesso em: Setembro 2019.

GLOSSÁRIO

Branch and Bound	Método de ramificar e limitar, algoritmo para encontrar soluções ótimas
Bulk Port Terminal	Terminal Portuário de Granéis Sólidos
Chevron	Método de empilhamento de granéis sólidos Chevron
Commodity	Termo que corresponde a produtos básicos globais não industrializados
Commodities	Plural de *Commodity*
Coneshell	Método de empilhamento de granéis sólidos *Coneshell*
Conevron	Método de empilhamento de granéis sólidos *Conevron*
Demurrage	Penalidade paga pelo afretador quando for excedido o tempo permitido para ser atendido
Despatch	Prêmio pago para o afretador por completar a operação do navio antes do tempo permitido
Evolutionary Algorithm	Algoritmo Evolutivo
Genetic Approach Algorithm	Algoritmo de Abordagem Genética
Greedy Heuristic	Heurística gananciosa ou gulosas
Heuristics Methods	Métodos heurísticos
Input	Dados de Entrada
Np-Hard	Conjunto de problemas difíceis
Optimization Model	Modelo de otimização
Output	Dados de saída
Simulated Annealing	Recozimento simulado, meta-heurística para otimização
Software	Programa de computador
Stockpile Allocation	Alocação de pilhas de estocagem
Stakeholders	Partes interessadas
Survey	Pesquisa destinada a extrair dados específicos através de formulário de perguntas
Turn Time	Tempo descontado por eventos intrínsecos aos processos definidos em contrato
Windrow	Método de empilhamento de granéis sólidos *Windrow*
Squeaky Wheel Optimization	Otimização de Roda Estridente