

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS DE BARROS PIMENTA

**PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES E DA UTILIZAÇÃO DOS
RECURSOS NA OPERAÇÃO DE VAGÕES EM TERMINAIS
FERROVIÁRIOS**

VITÓRIA
2018

LUCAS DE BARROS PIMENTA

**PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES E DA UTILIZAÇÃO DOS
RECURSOS NA OPERAÇÃO DE VAGÕES EM TERMINAIS
FERROVIÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

P644p Pimenta, Lucas de Barros, 1986-
Planejamento das atividades e da utilização dos recursos na
operação de vagões em terminais ferroviários / Lucas de Barros
Pimenta. – 2018.
106 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Terminais ferroviários – Programas de atividades.
2. Alocação de recursos. 3. Planejamento. 4. Modelos
matemáticos. 5. Atividades operacionais. 6. Tempo de setup.
I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

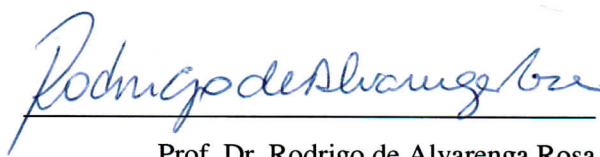
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES E DA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS NA OPERAÇÃO DE VAGÕES EM TERMINAIS FERROVIÁRIOS

Lucas de Barros Pimenta

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

Aprovada no dia **22 de março de 2018** por:



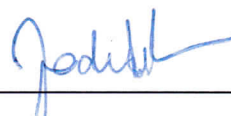
Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientadora - UFES



Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais
Examinador Interno - UFES



Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo
Doutor em Engenharia Elétrica
Examinador Externo - IFES



Prof. Dr. Jodelson Aguilar Sabino
Doutor em Engenharia de Produção
Examinador Externo – Vale do Rio Doce

Vitória – ES, março de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, à quem tudo devo.

Agradeço à Juliana, pelo seu enorme incentivo e paciência. Agradeço a toda minha família o apoio e torcida para conclusão desse mestrado.

Agradeço ao Rodrigo pela orientação, por todo o conhecimento passado a mim, pela disponibilidade de atendimento e paciência nesse período.

Agradeço à banca por todas as sugestões e críticas construtivas dadas desde a qualificação. Agradeço ao grupo do Laboratório de Modelagem Matemática e Meta-heurísticas Aplicadas à Engenharia de Produção (LAMMEP) por todo o apoio.

Agradeço à Vale S.A., pela disponibilização dos dados e, sobretudo, pela liberação e incentivo na conclusão dessa etapa, em especial Alfredo Santana e Fernando Alcântara.

Aos amigos, de perto e de longe, pela torcida pela conclusão do mestrado.

De maneira geral, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para essa realização.

RESUMO

O transporte ferroviário cresceu no Brasil nos últimos anos e, assim, é necessário aumentar a capacidade das ferrovias. Uma forma de aumentar a capacidade das ferrovias é tornar os terminais ferroviários mais eficientes reduzindo o tempo de operação dos lotes de vagões nesses terminais. Esses, por sua vez, vêm recebendo investimentos em novos recursos, o que acresce a complexidade de planejamento nestes terminais, o que pode acarretar que os lotes de vagões fiquem mais tempo parados aguardando para serem operados, gerando custos e diminuindo a capacidade de transporte das ferrovias. Assim, esta dissertação tem o objetivo de propor um modelo matemático baseado no *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP) para realizar o planejamento das atividades no terminal em função dos lotes de vagões que serão recebidos visando minimizar estadia desses lotes, incluindo o conceito de retenção para planejamento das atividades, a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo em função de manutenção e, ainda, a alternativa dessas atividades serem processadas por modos diferentes (operação por múltiplos modos), considerando, além disso, o tempo de preparação de recursos (denominado tempo de *setup*). Durante a revisão da bibliografia, não foi encontrado nenhum modelo matemático baseado no MRCPSP que considera o conceito de retenção parcial dos recursos após processamento da atividade para aguardar a atividade sucessora ser concluída e, somado a isso, não foi identificada a aplicação desse modelo matemático a pátios ou terminais ferroviários levando em consideração diversos recursos por atividade, múltiplos modos de operação, possibilidade de indisponibilidade de recursos ao longo do tempo e tempo de *setup*. O modelo matemático foi testado com dados reais de um terminal ferroviário utilizando o CPLEX 12.6 para executar o modelo matemático proposto, com resultados melhores do que o planejamento das atividades realizado no terminal.

Palavras-chave: *Terminal ferroviário. Múltiplos recursos. Múltiplos modos. Tempo de setup. Retenção. Planejamento de atividades.*

ABSTRACT

Railroad transportation has grown in Brazil in recent years and, therefore, it is necessary to increase railroad capacity. One way to increase the railroad capacity is to make rail terminals more efficient by reducing the operation time of wagons lots in these terminals. These, in turn, have been receiving investments and additional resources, which add complexity to terminals operational planning, and may cause wagon lots to wait longer for being operated, generating costs and reducing the railways transport capacity. Thus, this dissertation proposes a mathematical model based on the Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) to carry out the planning of terminal activities in function of the wagons lots to be received. This aims to minimize the staying of those lots in the terminal area, including the concept of blocking for planning, the variation of the resources availability over time due to maintenance and the alternative of these activities to be processed by different modes (operation by multiple modes), considering, in addition, the setup time of resources. During the literature review, no MRCPSP-based mathematical model was found which considered the concept of the resources' partial blocking after activity processing to wait the successor activity to be completed. Besides, the application of this mathematical model to railway yards or terminals was not identified considering several resources per activity, multiple modes of operation, possibility of unavailability of resources throughout the time and setup time. The mathematical model was tested with real data of a rail terminal using CPLEX 12.6 to execute the proposed mathematical model, with better results of staying of those lots in the terminal area when compared to the performance of actual terminal planning activity.

Key-words: Railroad terminal. Multiple resources. Multiple modes. Setup time. Blocking. Scheduling.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Exemplo retenção recurso – tempo 1</i>	14
<i>Figura 2: Exemplo retenção e liberação recursos – tempo 2</i>	14
<i>Figura 3: Classificação dos modelos de RCPSP</i>	21
<i>Figura 4: Fases da metodologia de pesquisa</i>	37
<i>Figura 5: Mapa da EFVM</i>	40
<i>Figura 6: Foto de uma pá-carregadeira com engate adaptado em operação</i>	42
<i>Figura 7: Foto de uma pá-carregadeira em operação em galpão de grãos</i>	43
<i>Figura 8: Mapa de pátio simplificado do Terminal Ferroviário em estudo</i>	43
<i>Figura 9: Fluxos de operação dos lotes pelo terminal: a) Descarregamento e Carregamento, b) Apenas descarregamento</i>	44
<i>Figura 10: Exemplo do planejamento da atividade segundo o MRCPSP-R</i>	64
<i>Figura 11: Exemplo dos valores assumidos pelas variáveis de decisão $x_{a,m,t}$, $w_{a,m,t}$, $y_{a,m,t}$ e $z_{a,m,t}$</i>	66
<i>Figura 12: Exemplo das variáveis de decisão $x_{a,m,t}$, $w_{a,m,t}$, $y_{a,m,t}$, $z_{a,m,t}$ e $u_{a,m,t}$</i>	67
<i>Figura 13: Gráfico de Gantt para apresentação do planejamento das atividades</i>	74
<i>Figura 14: Planejamento das atividades Descarga das Instâncias 1 e 2 – sobreposição</i>	76
<i>Figura 15: Planejamento das atividades Descarga das Instâncias 2 e 3</i>	77
<i>Figura 16: Planejamento das atividades das Instâncias 3 e 4 nos tempos de 1 a 1078</i>	
<i>Figura 17: Planejamento das atividades Descarga das Instâncias 3 e 4 nos tempos de 11 a 30</i>	79
<i>Figura 18: Planejamento das atividades da Instância 4 nos tempos 1 a 38</i>	81
<i>Figura 19: Planejamento das atividades da Instância 5 nos tempos 1 a 38</i>	83
<i>Figura 20: Planejamento parcial das atividades das Instâncias 6 e 7 – disponibilidade Manobreiro</i>	85
<i>Figura 21: Planejamento parcial das atividades das Instâncias 7 e 8 – disponibilidade Moega 2</i>	87
<i>Figura 22: Resultados da FO para as Instâncias 6, 8 e 9</i>	88
<i>Figura 23: Resultados da FO para as Instâncias 10, 11 e 12</i>	90
<i>Figura 24: GAP para as Instâncias 10, 11 e 12</i>	90

<i>Figura 25: Resultado da estadia do cenário Real em comparação com a FO da Instância 13.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 26: Resultado da estadia do cenário Real em comparação com a FO da Instância 14.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 27: Planejamento das atividades das Instâncias 1 e 2.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 28: Planejamento das atividades das Instâncias 2 e 3.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 29: Planejamento das atividades das Instâncias 3 e 4.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 30: Planejamento das atividades das Instâncias 6 e 7.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 31: Planejamento das atividades das Instâncias 7 e 8.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 32: Planejamento das atividades da Instância 9</i>	<i>104</i>
<i>Figura 33: Comparação do planejamento das atividades Real com a Instância 13</i>	<i>105</i>
<i>Figura 34: Comparação do planejamento das atividades Real com a Instância 14</i>	<i>106</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Resumo das variações dos artigos de RCPSP</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 2: Resumo das variações dos artigos sobre Retenção</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3: Resumo das variações dos artigos em Terminais Ferroviários</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4: Recursos disponíveis no terminal.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 5: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com milho e soja no modo MM1</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 6: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com milho e soja no modo MM2</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 7: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com farelo de soja no modo MM1</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 8: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com farelo de soja no modo MM2</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 9: Recursos demandados por cada atividade, nos dois modos de operação</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 10: Classificação dos recursos – fixos e móveis</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 11: Recursos fixos por atividade e modo.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 12: Trocas de produtos e respectivos tempos de Setup.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 13: Instâncias para avaliação do modelo matemático.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 14: Características das instâncias do Grupo A.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 15: Características das instâncias do Grupo B.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 16: Características das instâncias do Grupo C</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 17: Características das instâncias do Grupo D</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 18: Resultados Encontrados pelo CPLEX.....</i>	<i>72</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	DECLARAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O RCPSP.....	22
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RETENÇÃO	27
2.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EM TERMINAIS FERROVIÁRIOS	30
3	MÉTODO DE PESQUISA	36
3.1	CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA	36
3.2	FASES DO MÉTODO DE PESQUISA.....	37
4	PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS.....	40
4.1	GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS	56
5	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	63
6	RESULTADOS E ANÁLISES.....	72
6.1	RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO A	74
6.2	RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO B	84
6.3	RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO C	89
6.4	RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO D	91
7	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICE A	99

APÊNDICE B	100
APÊNDICE C	101
APÊNDICE D	102
APÊNDICE E	103
APÊNDICE F	104
APÊNDICE G	105
APÊNDICE H	106

1 INTRODUÇÃO

A carga transportada pelas ferrovias brasileiras aumentou 43% entre os anos de 2006 e 2016, passando de 238 bilhões para 341 bilhões de tonelada-quilômetro-útil (TKU), que representa o somatório dos produtos da carga transportada pelas distâncias transportadas (CNT, 2016). A maior parte do tempo de circulação de vagões é gasto em processos de descarregamento e carregamento e atividades de manobras em pátios ou terminais ferroviários (MOTRAGHI, 2013). Um terminal ferroviário é um pátio ferroviário que tem como função precípua o carregamento e descarregamento dos produtos transportados pelo modo ferroviário (CRAINIC, 1998).

Na ótica da operação de um terminal, um trem é formado por um conjunto de lotes, onde cada lote é um conjunto de vagões de um cliente com uma carga específica. Cada lote, em função da carga transportada e das operações a serem realizadas, deve passar por uma sequência de atividades a fim de carregar ou descarregar no terminal. Essas atividades podem ser manobras ferroviárias, movimentação entre linhas, descarregamento ou carregamento, inspeções, testes, entre outras.

As atividades em terminais ferroviários podem demandar diversos recursos para serem executadas, como exemplo: linhas de pátio, operadores de trem, operadores de manobra, locomotivas, terminais de descarga e carregamento, etc. De uma forma geral, alguns desses recursos demandam grandes investimentos ou podem possuir um custo de manutenção elevado. Além disso, sua disponibilidade pode variar com o tempo, devido a períodos de manutenção, intervalos para trocas de turno, dentre outros.

Sendo tais recursos limitados e os diversos lotes operados simultaneamente no terminal, pode ocorrer a concorrência de algumas atividades por um mesmo recurso em um mesmo tempo, ocasionando a espera de um lote até que outro lote termine sua operação, levando a atrasos na operação dos lotes. Assim, o profissional responsável pelo planejamento das atividades do terminal deve tomar a decisão de disponibilizar um recurso para um lote operar em detrimento da operação do outro que ficará aguardando esse mesmo recurso. Essas decisões visam à redução da soma do tempo de permanência de todos os lotes operados no terminal.

Essas características dos terminais ferroviários afetam, inclusive, a definição da sua capacidade, uma vez que a capacidade de uma infraestrutura ferroviária depende da forma como está sendo utilizada (ARMSTRONG e PRESTON, 2017). É importante que os processos em terminais sejam continuamente melhorados e otimizados, em virtude das constantes melhorias de outras áreas de interface (MOTRAGHI, 2013).

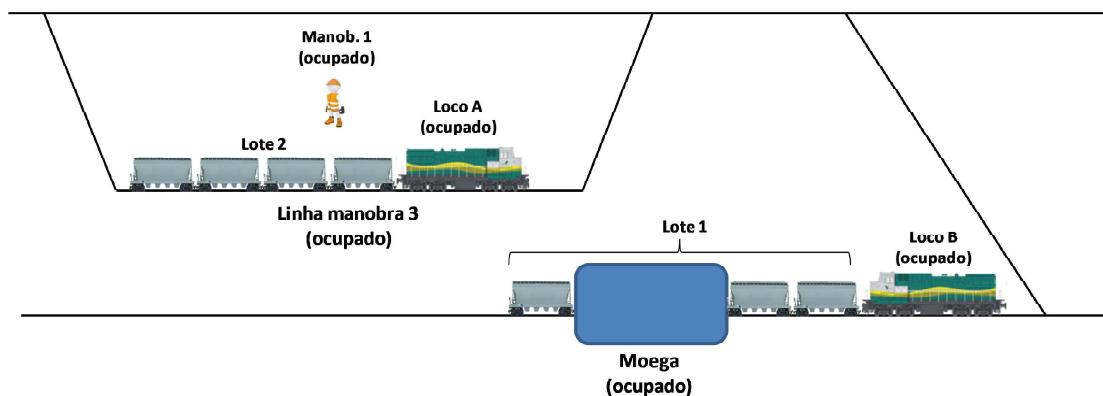
O planejamento da execução das atividades com a respectiva alocação dos recursos necessários visando reduzir o tempo de permanência do lote no terminal, também denominado estadia, é uma tarefa complexa e o tempo para concluir estas atividades é crítico para o desempenho operacional do terminal. Mesmo assim, a grande maioria das ferrovias do Brasil não possui ferramentas computacionais que auxiliem este processo. Desta forma, é relevante que estudos científicos proponham ferramentas computacionais, baseadas em modelos matemáticos, para o planejamento da sequência das atividades e da utilização de recursos dos terminais para operação dos lotes no terminal.

Uma característica da alocação de recursos para a execução de algumas atividades em terminais ferroviários é que, em certas situações, determinados recursos de uma atividade continuam retidos após essa atividade ser encerrada, o que é denominado retenção.

A fim de esclarecer o conceito de retenção com uma situação prática, tomou-se como exemplo hipotético duas atividades sucessivas, que eventualmente ocorrem em um terminal ferroviário. A primeira delas (Figura 1) representa uma atividade de manobra, que ocorre no tempo 1, em que são necessários 3 recursos para operação do Lote 2. Neste caso, os recursos necessários são: 1 recurso locomotiva (Loco A), 1 recurso manobreiro (Manob. 1) e 1 recurso linha (Linha Manobra 3). A atividade seguinte é a operação de descarga. No entanto, esta atividade não pode ser realizada assim que ocorre o término da atividade manobra do Lote 2 pelo fato de um dos recursos necessários para a descarga (recurso Moega) estar sendo utilizado por outro lote (nesse caso, Lote 1). Portanto, o Lote 2 deve aguardar, mantendo a Linha Manobra 3 ocupada. Contudo, os outros recursos que já haviam sido utilizados para a atividade manobra, que são os recursos locomotiva (Loco A) e manobreiro (Manob. 1) podem ser liberados para outras atividades em que sejam necessários, situação representada na Figura 2, em um tempo posterior, atribuído

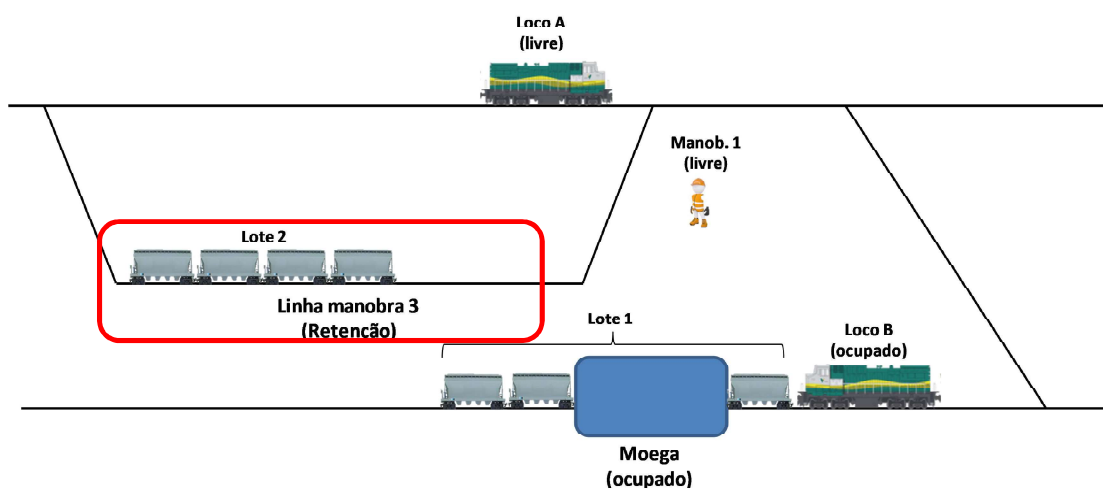
como tempo 2.

Figura 1: Exemplo retenção recurso – tempo 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2: Exemplo retenção e liberação recursos – tempo 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em problemas industriais, muitas vezes, essa situação pode ser resolvida por meio de área específica para retirar o produto processado e armazená-lo até que ele possa ser levado para a próxima fase do processo. No entanto, em um terminal ferroviário, a área física que o lote está alocado já é um dos recursos limitados do terminal, podendo não haver linhas disponíveis, tampouco rotas viáveis para estacionamento dos lotes de vagões. Esse conceito de retenção (na literatura

científica é denominado *blocking*) já foi aplicado a alguns problemas de sequenciamento. No entanto, não foi identificado na literatura nenhum trabalho baseado no Problema de Sequenciamento de Atividades com Restrição de Recursos (RCPSP) que aplicasse este conceito em problemas em que as atividades demandassem mais de um recurso e que a retenção ocorresse em apenas parte dos recursos utilizados.

Dessa forma, esta dissertação propõe o conceito de retenção aplicado ao *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP), em que cada uma de suas atividades pode demandar diversos recursos e que pode ocorrer a retenção de apenas parte desses recursos.

1.1 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

Essa dissertação propõe um modelo matemático de planejamento da sequência das atividades realizadas em um terminal ferroviário, com base no MRCPSP, que inclui o conceito de retenção para planejamento das atividades, a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo em função de manutenção e, ainda, a alternativa dessas atividades serem processadas por modos diferentes (operação por *múltiplos modos*), considerando, além disso, o tempo de preparação dos recursos (denominado tempo de *setup*). O objetivo de utilização do modelo matemático é reduzir a estadia (tempo total de permanência de todos os lotes) no terminal.

O modelo proposto por essa dissertação teve como cenário de aplicação um terminal ferroviário da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) que fica dentro do Complexo de Tubarão (Vitória-ES). No entanto, o modelo matemático proposto é aplicável a qualquer terminal ferroviário.

Na revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 2, não foi identificado nenhum artigo que levasse em consideração a aplicação do conceito de retenção ao MRCPSP. Por este motivo, o modelo matemático proposto foi denominado MRCPSP-R. Além disso, não foi encontrada a aplicação do MRCPSP com *múltiplos modos*, com indisponibilidade de recursos ao longo do tempo e tempo de *setup* à terminais ferroviários.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Propor um modelo matemático para planejamento das atividades de um terminal ferroviário e da utilização dos recursos, considerando a retenção de recursos, tempos de *setup*, *múltiplos modos* de operação das atividades e a disponibilidade dos recursos ao longo do tempo com o objetivo de reduzir a estadia dos lotes de vagões no terminal.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Aplicar o modelo matemático proposto a um cenário de um terminal ferroviário real a fim de evidenciar a aplicabilidade do mesmo;
- Realizar uma revisão da literatura sobre operação de pátios e terminais ferroviários;
- Realizar uma revisão da literatura dos modelos que consideram os diversos recursos disponíveis para realização de atividades, com ênfase no RCPSP;
- Criar uma ferramenta computacional para apresentação do Gráfico de *Gantt* do planejamento das atividades;
- Avaliar a implantação do modelo matemático proposto como uma ferramenta de auxílio à decisão com relação ao período de indisponibilidade dos recursos (entrega dos mesmos à manutenção ou período de ausência de mão-de-obra) para redução da estadia no terminal.

1.3 JUSTIFICATIVA

Pátios e terminais ferroviários são locais de grande complexidade e estão entre os maiores gargalos da operação desse modal de transporte. Além de ser o local onde as atividades a serem realizadas demandam a maior parte da vida útil dos vagões, estima-se que representem mais da metade do custo de uma nova ferrovia. Por esses motivos, pátios e terminais impactam no custo global de uma ferrovia em três elementos principais: valores gastos em investimentos, despesas de operação e valor imobilizado em material rodante. Isto posto, conclui-se que com pequenas melhorias nos critérios operacionais dos pátios, é possível obter significativos

ganhos operacionais (ROSA, 2016).

Na literatura científica, encontram-se estudos, inclusive formulações matemáticas, para o planejamento de manobras ferroviárias, contudo de forma mais direcionada para pátios com *hump yard*. O planejamento da sequência de atividades aplicado à operação de terminais ou pátios planos, como o trabalho base dessa dissertação, não foi exaustivamente explorado segundo a revisão bibliográfica pesquisada.

Além disso, não foram identificados, até então, estudos aplicados ao planejamento de sequenciamento de atividades em pátios ou terminais ferroviários que levassem em consideração tempos de *setup* entre as atividades de um mesmo recurso, *múltiplos modos* de operação das atividades, diversos recursos por atividade e a variação dos mesmos ao longo do tempo e a retenção de recursos até o início da próxima atividade, tal como se caracteriza a operação de terminais ferroviários.

Assim, esta dissertação se justifica por propor a formulação de um novo modelo matemático aplicado ao planejamento de atividades em um terminal ferroviário, considerando tempos de *setup*, *múltiplos modos* de operação das atividades, diversos recursos por atividade e a variação dos mesmos ao longo do tempo e a retenção de recursos com o objetivo de reduzir a soma do tempo total de todos os lotes operados no terminal, a fim de viabilizar alternativas de melhoria no planejamento de atividades da operação de terminais ferroviários e, assim, contribuir para o aumento da carga transportada pela ferrovia.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender os objetivos dessa pesquisa, o conteúdo a ser desenvolvido será estruturado em sete capítulos, incluindo este primeiro, que é uma introdução ao problema, e os demais distribuídos da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico e a revisão da literatura sobre os principais trabalhos relacionados ao planejamento de atividades em pátios ou terminais ferroviários.

O Capítulo 3 explica o método de pesquisa adotado nesta dissertação.

No Capítulo 4 são apresentados o estudo de caso e as instâncias de teste e seus

objetivos.

O Capítulo 5 apresenta o modelo matemático proposto que será a base da pesquisa.

O Capítulo 6 expõe os resultados do CPLEX e a análise dos resultados, com o uso das instâncias propostas, que comprovam a eficiência do modelo.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros dessa dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um pátio ferroviário é um local da ferrovia destinado à realização de manobras e movimentação de cargas, onde ocorrem as seguintes atividades: coletas, manobras, descargas, momentânea alocação, carregamentos ou reorganização (BOYSEN *et al.*, 2016). Um pátio ferroviário é composto por linhas, materiais rodantes para executar as manobras (locomotivas e vagões), áreas de carregamento e descarga de produtos, pessoal treinado para as manobras ferroviárias e outros recursos. Terminais ferroviários são pátios ferroviários especializados em carregamento e descarregamento de produtos, principalmente alocados em locais de grande movimentação de cargas, como complexos portuários ou regiões de transbordo intermodais (ROSA, 2016).

A manobra ferroviária é uma das principais atividades realizadas no terminal e pode ser descrita como uma atividade que engloba diversas tarefas menores, a saber: movimentação inicial da locomotiva, partindo do local que está em direção ao lote de vagões a serem movimentados; engate no lote de vagões, atividade em que a locomotiva e o lote passam a ficar conectados; transporte desse lote de vagões até a linha de destino da manobra (podendo ser realizada por meio da locomotiva puxando ou empurrando o lote); e, por fim, o desengate da locomotiva do lote, deixando esse conjunto de vagões na linha de destino (SABINO *et al.*, 2010).

O planejamento das atividades em um terminal pode ser caracterizado como um problema de sequenciamento, conhecido na literatura como *scheduling*. Largamente utilizado na manufatura e em serviços, o sequenciamento possui grande contribuição para produtividade de todo sistema, planejando o que fazer, quando e com quais recursos, visando à minimização do tempo de produção ou de custos. Sequenciamento é o processo da programação da produção que visa determinar a ordem na qual as operações serão realizadas, levando em consideração os centros de trabalho em estudo (MOREIRA, 2016).

Segundo Pinedo (2002), sequenciamento é o processo de tomada de decisão com a finalidade de otimizar um ou mais objetivos, lidando com a alocação de recursos limitados para atividades com tempo limitado. Assim, visa determinar a sequência em que as ordens de produção serão realizadas a fim de transformar a matéria

prima que está sendo processada no produto final, definindo a ordem desse processamento das atividades em cada uma das máquinas, com seus tempos de início e fim de processamento em cada máquina.

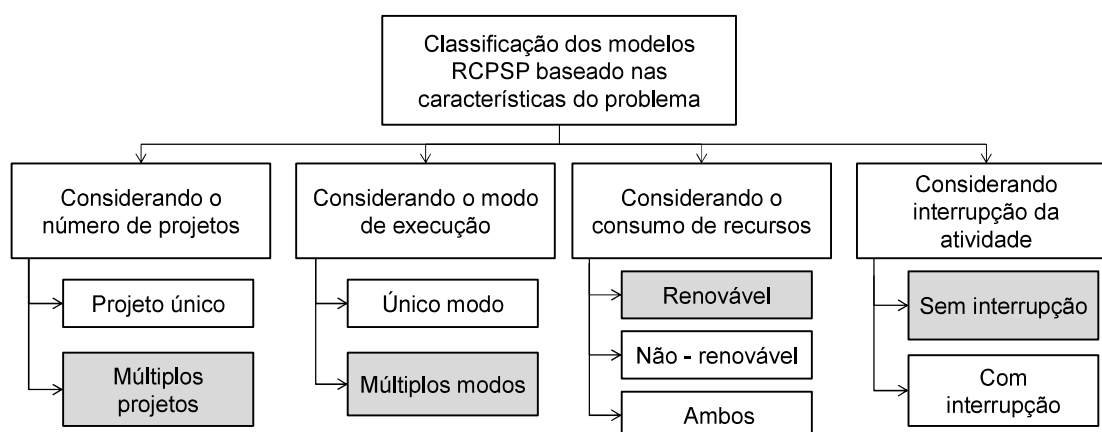
Similar a um processo industrial, de transformação da matéria prima em um produto final, o terminal ferroviário pode receber um lote de vagões carregados e os transformar em vagões vazios, receber os vagões vazios e os transformar em vagões carregados ou, ainda, os receber carregados, descarregar e ainda carregar com outra carga, para, após isso, serem liberados para outra viagem.

Na literatura, existem diversos tipos de modelos matemáticos aplicados a diferentes realidades de configurações de máquinas, a saber: Máquinas paralelas, onde a atividade a ser realizada necessita apenas de uma operação, podendo passar por qualquer máquina disponível (as máquinas podem ser iguais ou com velocidades de processamento diferentes); *Flow Shop* ocorre quando as atividades devem seguir o mesmo roteiro, ou seja, passar pelas mesmas máquinas que se encontram em série; *Job Shop* ocorre quando cada atividade tem seu respectivo roteiro pré-determinado, sendo que elas podem passar pela mesma máquina mais de uma vez; e, por fim, *Flexible Job Shop*, em que cada atividade pode ser executada por qualquer uma das máquinas idênticas pertencentes ao centro de trabalho. Em todas essas configurações, as atividades demandam apenas um recurso para serem processadas.

Uma vez que o problema de planejamento de atividades em um terminal caracteriza-se por cada atividade necessitar de diversos recursos, o modelo matemático que melhor se enquadra é o *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP). O RCPSP é uma generalização do *Job Shop* e do *Flow Shop* (GEN *et al.*, 2010) que realiza o sequenciamento de atividades que necessitam de recursos limitados de forma a minimizar o tempo entre o início e o fim de uma sequência de atividades, chamado *makespan*. O RCPSP é um problema de otimização combinatória que considera recursos limitados e atividades com quantidade de recursos e durações estabelecidas, ligadas por relações de precedências. Ele realiza o sequenciamento dessas atividades e alocação de recursos limitados, isto é, designa alguns recursos para uma determinada atividade de forma que os recursos alocados não excedam a disponibilidade (HARTMANN, 1999).

Muitas variações do modelo RCPSP foram exploradas ao longo das últimas décadas. Essas variações podem ser divididas em várias categorias baseadas nas características dos problemas, isto é, no número de projetos (lotes), no modo de execução, no consumo dos recursos e na possibilidade de interrupção, conforme Figura 3 (GEN *et al.*, 2010).

Figura 3: Classificação dos modelos de RCPSP



Fonte: GEN *et al.* (2010) adaptado pelo autor.

Com base na Figura 3, o RCPSP pode ser classificado de acordo com o número de projetos, os modelos de RCPSP podem ser divididos em dois grupos: (1) projeto único, onde apenas um projeto terá seu processamento planejado no centro produtivo e (2) múltiplos projetos, onde há mais de um projeto a ser processado, considerando um grupo de recursos único para processamento de todos eles. Com relação ao modo de execução, também existem dois grupos: (1) único modo e (2) *múltiplos modos*. Nessa última versão, cada atividade pode ser processada de forma diferente e, por isso, com tempos de processamento e necessidade de recursos diferentes.

Já no que tange o consumo de recursos, conforme apresentado na Figura 3, os modelos matemáticos do RCPSP são divididos em: (1) recursos renováveis, que são aqueles que são limitados em quantidade, mas podem ser utilizados mais de uma vez, (2) recursos não renováveis, que têm sua quantidade limitada para o projeto como um todo e podem ser utilizados uma única vez e (3) ambas as situações, que ocorre quando alguns recursos são renováveis e outros são não renováveis em um

mesmo modelo. Por fim, os modelos matemáticos de RCPSP podem ser divididos naqueles em que as (1) atividades só podem ser realizadas sem interrupção ou (2) que as mesmas possam ser interrompidas para que outra atividade seja executada, para que a primeira seja completada posteriormente.

O modelo matemático proposto, devido à realidade de terminais ferroviários, conforme destacado em cinza na Figura 3, utiliza o RCPSP com múltiplos projetos, sendo que cada lote operado no terminal é considerado um projeto. A respeito do modo de execução, o modelo caracteriza-se por *múltiplos modos*, pois cada atividade pode ser realizada de mais de uma maneira, demandando recursos diferentes, quantidades diferentes e tempos de processamento diferentes. Especificamente essa variação, possui na bibliografia uma nomenclatura específica: *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP). Com relação aos recursos, eles são renováveis, pois ao fim da atividade ele está disponível para ser utilizado por outra atividade. Em terminais ferroviários, as atividades devem ser completamente finalizadas após serem iniciadas, ou seja, não havendo possibilidade de interrupção das mesmas.

No que tange a possibilidade de certos modelos considerarem o tempo de setup entre as atividades, essa característica pode ser implantada em qualquer dos tipos de modelos expostos anteriormente, não havendo um específico para tal.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O RCPSP

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos de sequenciamento que levam em consideração a necessidade de diversos recursos limitados por atividade, com ênfase no RCPSP e suas variações.

A primeira publicação a respeito de sequenciamento de atividades que leva em consideração a restrição de recursos remonta ao trabalho de Pritsker *et al.* (1969), que, baseado em publicações anteriores a respeito de sequenciamento de atividades com programação binária (0-1), inclui nas restrições múltiplos recursos limitados na modelagem.

Hartmann (1999) abordou em seu livro um extenso e detalhado levantamento a respeito dos modelos métodos e aplicações de projetos de sequenciamento com

recursos limitados, tendo como base o RCPSP. Sua obra explora diversas variações do RCPSP, dentre elas aquelas que possuem múltiplos projetos e *múltiplos modos*, discorrendo também sobre variações na função objetivo, a saber: objetivos baseados na utilização dos recursos, objetivos financeiros (aumento fluxo de caixa, levando em consideração o encerramento das atividades e receita gerada disso, menos as despesas com os recursos utilizados), objetivos focados na qualidade (redução de necessidade de retrabalhos) ou múltiplos objetivos.

Drexl *et al.* (2000) entenderam que o MRCPSP até então não possuía especificidades suficientes para aplicação em muitos problemas de sequenciamento de atividades executadas por pessoas (mão de obra). Assim, desenvolveram um modelo matemático de MRCPSP visando contemplar determinadas situações como tempos de *setup* (tempo necessário de preparação de algum recurso quando ocorre a mudança de um produto que este recurso está processando) e tempos de folga entre atividades (necessário quando atividades são executadas em locais diferentes e que ocorre um tempo de deslocamento). O contexto prático de aplicação desse estudo foi o planejamento de atividades de equipes de auditoria.

Artigues *et al.* (2003) realizaram um estudo a respeito de inserção de técnicas para planejamento estático e dinâmico do sequenciamento de atividades aplicados ao RCPSP. O planejamento do sequenciamento estático baseia-se na distribuição de determinadas atividades ao longo do tempo, levando em consideração os recursos disponíveis e as relações de precedência dessas atividades. Já o sequenciamento dinâmico baseia-se na reação do planejamento devido a algumas mudanças nas características do problema inicial, que podem ocorrer durante a execução das atividades. A reação a estas mudanças pode ocorrer com o replanejamento de todas as atividades ou apenas das atividades diretamente relacionadas a esta situação. O artigo não contempla múltiplos projetos, tampouco *múltiplos modos* de operação.

Mika *et al.* (2008) definiram o MRCPSP como a possibilidade de, em certas situações, cada atividade ser executada em um modo distinto, de várias alternativas possíveis. Essas alternativas levam em consideração, na maior parte das vezes, questões a respeito do uso maior ou menor de recursos e a consequente variação na duração da atividade. Os autores também exploraram a possibilidade de implantação de tempos de preparação, denominando os mesmos como tempo de

setup. Segundo os autores, em certas situações, a execução de uma atividade deve ser precedida por algumas operações preliminares, realizadas com objetivo de preparar os recursos demandados para o processamento da atividade. No estudo também é enfatizada a diferença entre tempos de *setup*, relacionado a tempo de preparação de recursos, e tempos de folga, tempos eventualmente necessários entre atividades.

Hartmann e Briscorn (2010) estudaram e descreveram de forma ampla as diversas variações e extensões do RCPSP, por meio de um artigo de revisão dos trabalhos publicados de RCPSP realizados a partir do ano 2000. Explorou-se a descrição dos problemas de forma abrangente, citando problemas onde a atividade pode ser interrompida e depois reiniciada de onde parou (*preemption*), problemas em que a demanda por recursos varia com o tempo, bem como problemas que abarcam a necessidade de tempo de preparação de máquinas. Este mesmo estudo contemplou, ainda, operações em que as máquinas podem operar de modos diferentes e uma comparação entre modelos com recursos renováveis e não renováveis. Apesar de abranger diversas áreas de aplicação, não foi identificado nenhum modelo de RCPSP com bloqueios de atividades, tampouco a aplicação a terminais ferroviários. Com relação a operação em *múltiplos modos*, os autores abordaram a questão do MRCPSP como uma extensão do RCPSP padrão, permitindo diversas alternativas ou modos em que cada atividade pode ser executada. Cada modo reflete uma maneira viável de combinação entre a duração da atividade e os seus recursos necessários que permitem efetivar seu processamento.

Brucker e Knust (2012) discorreram a respeito do RCPSP e suas variações, demonstrando inclusive as modelagens matemáticas destas variações. Especificamente sobre o MRCPSP, os autores esclarecem que alguns modos supérfluos do modelo de *múltiplos modos* podem ser eliminados em uma etapa de pré-processamento. Estes modos são classificados pelos autores em modos não executáveis e modos ineficientes. O modo não executável é caracterizado por demandar uma quantidade maior de recursos do que os disponíveis para planejamento de atividades. O modo ineficiente caracteriza-se nas situações em que ocorrem outros modos para a execução da mesma atividade e que demanda uma

quantidade menor de recursos e um tempo menor de execução. Por terem estas características, tais modos podem ser retirados das instâncias de processamento sem afetarem a função objetivo.

Kopanos *et al.* (2014) propuseram uma formulação matemática que levava em consideração o horizonte de tempo contínuo, em contraste com os modelos com horizonte de tempo discreto. Para avaliar o impacto desta proposta, os autores compararam instâncias utilizando as duas metodologias de resolução do problema, considerando que naquelas em que o tempo é discreto, a atividade precedente precisa estar encerrada para início da atividade seguinte. Em contrapartida, naquelas em que o tempo é contínuo, torna-se viável a sobreposição de algumas atividades.

Okubo *et al.* (2015) abordaram em seu estudo um modelo de RCPSP com restrições de utilização de recursos renováveis e consumo de recursos que levava em consideração restrições realísticas de consumo de energia durante horas de pico, demanda de energia estabelecida em contrato e consumo de energia durante horas de *setup*. Apesar de citar essas variações na bibliografia, seu problema não demandou a adaptação do modelo em *múltiplos modos*.

Kellenbrink e Helber (2015) escreveram um artigo que abordou a adaptação do RCPSP e do MRCPSP para uma estrutura de projetos flexíveis. No projeto de RCPSP clássico, todas as atividades e restrições de precedência são conhecidas e todas as atividades precisam ser realizadas. No trabalho que propuseram, os autores realizaram um sequenciamento de atividades que inclui decisões de implantar atividades opcionais específicas e imposição de restrições de precedência relacionadas a estas atividades. Abordam também a realização de atividades obrigatórias e eletivas. Para exemplificar esta aplicação, os autores utilizaram o planejamento das atividades realizadas entre o pouso de uma aeronave de passageiros em um aeroporto e sua decolagem (próximo voo). As atividades nesse ínterim podem variar e, por isso, necessitam de um planejamento de sequenciamento de atividades flexível. Um exemplo destas variações: desembarque pode ocorrer por plataforma ou a pé, e esta escolha acarreta a utilização de ônibus para transporte ou operação da plataforma para viabilizar o desembarque.

Kreter *et al.* (2016) estudaram modelos de RCPSP que levavam em consideração interrupções no horizonte de tempo do problema em estudo, que denominaram quebras de calendário, e o impacto dessa interrupção no planejamento das atividades. Os autores exploraram ainda as atividades que poderiam ser interrompidas e aquelas que não poderiam ser interrompidas, com relação a disponibilidade dos recursos, abordaram também a respeito daqueles que haviam necessidade de continuarem agrupados às atividades que foram interrompidas e aqueles que poderiam ser liberados. Notam-se, no artigo, os exemplos de aplicação desses modelos, enfatizando-se aqueles que utilizam pessoas como recursos, em situações nas quais o calendário disponível para sequenciamento baseia-se no trabalho apenas em dias de semana ou apenas no horário diurno.

Artigues (2017) fez uma extensa análise dos artigos que tratavam o RCPSP que consideravam atividades sem interrupção e formulações de programação linear com horizonte de tempo discreto. O estudo propõe uma comparação entre artigos assim caracterizados, a fim de avaliar a efetividade de trabalhos que se intitulam como inovadores, em comparação com aqueles que já haviam sido estudados em artigos anteriormente publicados.

Naber (2017) propõe uma adaptação do RCPSP utilizando um perfil de recursos flexíveis, denominado FRCPS, em um horizonte de tempo contínuo, proposto por Kopanos *et al.* (2014). No RCPSP tradicional, uma atividade demanda, durante toda sua duração, uma quantidade constante de recursos. Nesta pesquisa, a quantidade de recursos pode variar durante a execução de determinada atividade, impactando assim, o tempo de sua duração. Por este motivo, a quantidade de recursos utilizados e a duração das atividades são determinadas em conjunto com o sequenciamento das mesmas, e não pré-determinadas como parâmetros do problema.

Portanto, após essa revisão de literatura, não foi encontrado nenhum artigo científico que aplicasse o conceito de retenção a problemas de MRCPSP, tal como a presente dissertação. Isso é evidenciado por meio da Tabela 1, onde é apresentado um resumo dos temas explorados em cada artigo e a comparação com a presente dissertação.

Tabela 1: Resumo das variações dos artigos de RCPSP

Ano	Autor	Múltiplos recursos	Variação dos recursos no tempo	Múltiplos modos	Tempo de Setup	Retenção parcial de recursos	Aplicação em terminais ferroviários
1969	Pritsker <i>et al.</i>	X					
1999	Hartmann	X		X			
2000	Drexel <i>et al.</i>	X		X	X		
2003	Artigues <i>et al.</i>	X					
2008	Mika <i>et al.</i>	X		X	X		
2010	Hartmann e Briskorn	X	X	X	X		
2012	Brucker e Knust	X		X			
2014	Kopanos <i>et al.</i>	X					
2015	Okubo <i>et al.</i>	X			X		
2015	Kellenbrink e Helber	X		X			
2016	Kreter <i>et al.</i>	X	X				
2017	Artigues	X					
2017	Naber	X	X	X			
2018	Pimenta (presente dissertação)	X	X	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RETENÇÃO

Nesse item é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos trabalhos que aplicaram o conceito de retenção à problemas de planejamento de atividades.

No artigo de Hall e Sriskandarajah (1996), os autores fizeram uma abrangente revisão bibliográfica sobre artigos que aplicaram modelos de sequenciamento considerando cenários de centros produtivos em que não era possível reter qualquer estoque em processo. Os autores dividiram o artigo em trabalhos que abordavam processos produtivos sem-espera e retenção. O primeiro grupo representa aqueles casos que não pode haver espera entre centros produtivos, isto é, assim que termina o processamento em uma máquina, o processo seguinte deve continuar imediatamente (um exemplo de aplicação desses modelos é o caso de alguns processos siderúrgicos, em que é necessário para o processo de laminação que o lingote esteja com alta temperatura, equivalente à temperatura que sai do processo da aciaria).

O tema retenção, também caracterizado pela não existência de estoque em processo, foi definido pelos autores Hall e Sriskandarajah (1996) como sendo as

situações em que a máquina que o material está sendo processado deve se manter ocupada, quando a máquina de processamento sucessório não estiver disponível. O trabalho envolve diversos modelos matemáticos determinísticos que estudam configurações de máquinas *Flow Shop*, *Job Shop*, entre outros. No entanto, o trabalho não citou nenhum artigo de que envolvia a retenção em cenários que o processamento envolvia diversos recursos por atividade. Apesar de haver a possibilidade do problema de sequenciamento de atividades em terminais ferroviários serem modelados a partir de modelos matemáticos sem-espera, este não caracterizaria a realidade dos terminais ferroviários, pois consideraria todas as atividades sendo processadas como um bloco de atividades contínuas.

D'Ariano *et al.* (2007) aplicaram um algoritmo *branch and bound* para o replanejamento do sequenciamento de circulação de trens em um trecho de ferrovia singela (trecho de via único, não duplicado) quando algum distúrbio ou desvio ocorre no planejamento inicial. O problema pode ser visto como uma robusta aplicação do problema de sequenciamento *Job Shop* com as atividades sendo processadas sem intervalo de tempo entre elas, i.e., seguindo a metodologia denominada sem-espera. Assim, o trabalho não considerou diversos recursos por atividade, tampouco o bloqueio de parte desses recursos até a atividade sucessora.

Brucker e Kampmeyer (2008) utilizaram o problema de sequenciamento *Job Shop* com aplicação do conceito de retenção. O trabalho abordou um cenário de sequenciamento cíclico, que é aquele em que a operação é contínua e se repete indefinidamente. O objetivo é a redução do tempo de realização destes ciclos em que as atividades são realizadas. Novamente o problema foi aplicado em um cenário com apenas um recurso utilizado por atividade.

No artigo de Liu e Kozan (2009), os autores apresentaram mais um exemplo de aplicação de um modelo matemático de sequenciamento de atividades de trens em uma ferrovia utilizando o *Job Shop* com máquinas paralelas com retenção de atividades. Denominando trens como atividades, seções de trecho de via unitárias como máquinas únicas e múltiplas seções de trechos de via como máquinas paralelas, o modelo matemático se concentrou na retenção destes recursos, não abordando exemplos de retenção em atividades com vários recursos.

Pranzo e Pacciarelli (2015) também estudaram um problema com a característica de retenção, no entanto novamente aplicado ao problema de sequenciamento do *Job Shop*, ou seja, apenas um recurso demandado por atividade. Os autores exploraram ainda a variação do problema de retenção denominada troca. Esta variação permite que aconteça uma troca das atividades e dos recursos utilizados por estas atividades nas situações em que ocorre uma configuração circular de atividades em retenção, isto é, uma atividade A necessita do recurso que está ocupado pela atividade B e a atividade B necessita do recurso ocupado pela atividade A. Segundo Mascis e Pacciarelli (2002), esta troca entre atividades e recursos não é aplicável à realidade ferroviária devido a necessidade de acesso as linhas ferroviárias pelas atividades que serão realizadas.

Lange e Werner (2017) estudaram o problema de sequenciamento de atividades aplicado à circulação de trens com a aplicação de retenção. As atividades a serem processadas são os trens circulando em um trecho de ferrovia e os recursos utilizados para processamento destas atividades eram as seções de via deste trecho da ferrovia. Apesar de aplicação do conceito de retenção, a configuração de máquinas deste problema caracteriza-se por um problema *Job Shop*, por tratar-se de apenas um recurso necessário ao processamento das atividades.

Como pôde ser visto, não foi identificado na literatura pesquisada nenhum trabalho que aplicasse o conceito de retenção em problemas de planejamento de atividades que necessitam de diversos recursos por atividade. Um resumo desses artigos é apresentado na Tabela 2.

Ano	Autor	Recurso único	Múltiplos recursos	Retenção	Retenção parcial de recursos	Aplicação em terminais ferroviários
1996	Hall e Sriskandarajah	X		X		
2007	D'Ariano <i>et al.</i>	X		X		
2008	Brucker e Kampmeyer	X		X		
2009	Liu e Kozan	X		X		
2015	Pranzo e Pacciarelli	X		X		
2017	Lange e Werner	X		X		
2018	Pimenta (presente dissertação)		X		X	X

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EM TERMINAIS FERROVIÁRIOS

A partir desse ponto é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os problemas de relacionados a pátios e terminais ferroviários. Existem algumas aplicações de modelos matemáticos aplicados a terminais ferroviários, que, no entanto, não têm por objetivo realizar o planejamento das atividades mediante os recursos disponíveis. Courdeau *et al.* (1998) fizeram uma revisão bibliográfica a respeito de modelos de otimização aplicados à realidade ferroviária até então. Nesse estudo, eles também abordam os modelos relacionados a pátios ferroviários. No entanto, o foco do artigo concentra-se em pátios com *hump yard*, não abordando as características de terminal ferroviário.

Blasum *et al.* (1999) propuseram uma aplicação de um modelo de otimização para reduzir a necessidade de manobras para formação de trens, dado a chegada dos trens do dia e que, por sua vez, possuem programação para viajarem no dia seguinte pela manhã, após o posicionamento em uma área de transbordo de carga. Dahlhaus *et al.* (2000) abordam a necessidade de linhas para classificação de vagões, em um pátio com *hump yard*, com base na chegada de trens, formação de novas composições e, sobretudo, quantidade de clientes.

Winter e Zimmermann (2000) abordaram em seus estudos a redução do tempo de formação e liberação de trens, minimizando as movimentações de manobra dentre outros objetivos, no entanto, novamente considerando pátios com *hump yard* e não mais de um recurso necessário por atividade. He *et al.* (2000) desenvolveram um controle e formação de trens por meio de um modelo de despacho (*fuzzy dispatching model*) e um algoritmo genético para auxiliar a coordenação da liberação de trens, levando em conta a maximização da saída de trens do pátio e a aderência ao horário de formação e liberação dos trens planejados. Ainda com base no referido estudo, identificou-se que não foram abordados diversos recursos necessários para realizar cada uma das atividades.

He *et al.* (2003) desenvolveram em sua pesquisa um modelo matemático aplicado inicialmente a um pátio simplificado, com um *hump yard*, uma locomotiva de manobra e uma máquina de chave. Ainda assim, não abordaram a realização de manobra de triagem em pátios planos, bem como, a interface com processos de

carregamento e descarregamento de vagões que não utilizam carga de contêiner e a utilização de mais de um recurso por atividade.

Reis Junior e Lopes (2003) desenvolveram um otimizador para manobras ferroviárias, utilizando algoritmos *branch & bound* em arquitetura paralela visando a otimização do cumprimento das manobras do pátio ferroviário, tendo por base a movimentação de vagões por meio de locomotivas em linhas ferroviárias e chaves (aparelhos que interligam as linhas). Utilizando o entendimento de um pátio ferroviário como um grafo não direcionado $G = (X, U)$, o modelo utiliza aplicação do algoritmo do menor caminho para realizar a manobra com a locomotiva de forma a realizar o percurso em menor tempo, compara este tempo obtido dentre as diversas locomotivas disponíveis no pátio para escolher a que realizaria a atividade de forma mais rápida. Por fim, diante do problema de alocação de locomotivas para as diversas manobras e diversas locomotivas disponíveis, utiliza o algoritmo *branch & bound* para realizar o melhor plano de alocação dos recursos locomotiva para realizar as manobras necessárias. Os autores deste trabalho não levaram em consideração a possibilidade de utilização de diversos recursos, tampouco diversos modos de realizar as atividades do problema.

Riezebos e Wezel (2009) desenvolveram um algoritmo de suporte as decisões de programação de manobras dos controladores de pátio para auxiliar na busca de melhores alternativas de manobras de formação de trens em pátios de manobra planos. No entanto, o pátio simulado por eles trata de manobras de vagões com autopropulsão (não utilizam locomotiva para realizar essas atividades) de transporte de passageiros (não possuem terminais de carregamento e descarregamento de vagões). Também não consideraram a possibilidade de uma atividade realizada no pátio demandar mais de um recurso. Um dos principais focos desse artigo é diminuir o tempo ocioso em situações que a manobra muda de direção, em que o operador precisa, no exemplo estudado, descer do vagão que está para ir para o último vagão da composição para, então, reiniciar o movimento em sentido contrário (situação essa não aplicável em manobras de vagões de carga e pátios destinados a esse fim).

Taffner (2009) propôs um modelo baseado na Administração da Produção e na Teoria da Programação para a resolução da programação de um terminal ferroviário

de granel agrícola e de fertilizante utilizando um software de programação da produção, o *Preactor*, que define programação como o processo de criar uma sequência de operações, com um número limitado de recursos. Este modelo não considera a possibilidade das atividades serem realizadas em *múltiplos modos*, sendo necessárias várias adaptações para tornar possível a aplicação ao modelo de terminal, o que o torna pouco aplicável à realidade prática de terminais ferroviários.

Sabino *et al.* (2010) propuseram um algoritmo de Otimização com Colônia de Formigas (ACO) para auxiliar a equipe os controladores de pátios ferroviários no planejamento das manobras a serem realizadas. O algoritmo proposto é baseado em uma função multi-objetivo que busca a redução dos custos fixo e variável de movimentação de vagões no pátio, por meio da melhor programação de utilização das locomotivas de manobra, considerando um dado horizonte de planejamento. Diretamente aplicável a terminais ferroviários, o trabalho tem foco na redução de custos para a realização de manobras, calculado por meio do tempo de espera estimado para alocação dos recursos que considera, não tendo por foco específico, a alocação de diversos recursos para realização de atividades determinadas.

Marinov e Viegas (2011) desenvolveram um estudo para um pátio plano. No entanto, o foco desse trabalho é um modelo de simulação baseado em eventos discretos para um pátio com duas linhas de acesso, duas locomotivas e duas equipagens (termo utilizado em algumas ferrovias para citar a equipe de manobra composta por um maquinista e um auxiliar). O estudo compara o cenário simulado com o atual nível de produtividade do terminal.

Khoshniyat (2012) estudou estratégias de planejamento operacional que buscam auxiliar os controladores de pátios com *hump yard* a implantarem um modelo de operação menos empírico e que objetivou reduzir o tempo de classificação e, consequentemente, tornar a formação de trens mais rápida. No processo estudado havia necessidade de formar uma linha com vagões de diversos destinos para que a mesma passasse por uma nova manobra de classificação de vagões no *hump yard*. Para isso, utilizou um modelo de simulação para auxiliar na redução da necessidade de reclassificar lotes.

Hansmann *et al.* (2014) aplicaram o problema de *Flexible Job Shop Scheduling* (Sequenciamento de atividades com múltiplas máquinas e múltiplos centros de processamento) com uma variação que denominaram bloqueio, a uma realidade de planejamento de atividades de manutenção de vagões. Esta variação consiste no fato de que se diversas manutenções são realizadas em sequência em uma mesma linha e, se uma manutenção posterior realizada nesta linha atrasar, a atividade anterior não pode seguir para a próxima etapa de manutenção, pelo fato desta linha estar ocupada. Este modelo não leva em consideração diversos recursos por atividade, tampouco *múltiplos modos* de operação.

Khaled *et al.* (2015) estudaram o atraso da realização de atividades de uma ferrovia levando em consideração o congestionamento em pátios ferroviários e na circulação, devido a um bloqueio ou interdição de um pátio ou trecho ferroviário. Nessas situações um replanejamento seria necessário e, então, o impacto no sequenciamento das atividades da ferrovia seria medido, bem como a quantidade que os demais recursos seriam utilizados, uma vez que os demais pátios ferroviários e trechos ferroviários seriam sobrecarregados para realizar as manobras que foram impactadas com o bloqueio ou interdição anterior.

Shi e Zhoe (2015) descrevem em seu artigo, uma extensa revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos aplicados a pátios ferroviários, a maior parte deles, no entanto, focada apenas na fase de classificação de vagões (*hump yard*). Os autores entendem que esse foco dificulta a identificação de gargalos de todo o processo que ocorre antes e depois da classificação de vagões e, por isso, propõem um estudo para aplicação de modelos que atuem de forma integrada entre as diversas atividades que ocorrem em um pátio e análise dos atrasos entre essas atividades.

Shi e Zhoe (2015) discorrem sobre diversos modelos de programação inteira mista a fim de planejar as atividades que ocorrem em um pátio ferroviário. O modelo inclui ainda um fluxo de contagem de vagões cumulativa, a fim de avaliar os atrasos entre as atividades. Neste modelo, as atividades de um pátio ferroviário são divididas em quatro: classificação, triagem, formação e partida do trem. No estudo, os autores não abordam a possibilidade de processamento das atividades por *múltiplos modos* e, apesar de abranger outras atividades, focam o problema em um pátio de classificação.

Adlbrecht *et al.* (2015) abordam em seu artigo o processo de classificação de vagões por meio da utilização de uma locomotiva de manobra para tal, ao invés do tradicional processo de classificação por *hump yard*. Os autores citam que apesar de não ser um processo de classificação incomum, não se trata de campo de pesquisa que tem recebido muita atenção da comunidade científica nos últimos anos. O artigo tem por objetivo obter a distância mínima de percurso entre uma linha que está em uma parte do pátio, em que a locomotiva engata nos vagões a serem manobrados, para uma linha de destino em uma outra parte do pátio (essas partes do pátio são conectadas por linhas e chaves).

Pimenta *et al.* (2016) propuseram um modelo matemático para planejamento operacional de manobras em um terminal ferroviário, considerando os recursos necessários para a realização dessas manobras que buscam auxiliar os controladores de pátios planos. No entanto, o trabalho não considerou a possibilidade de retenção da atividade que está sendo realizada até a liberação da atividade seguinte, como ocorre na realidade em terminais ferroviários, tampouco a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo e, ainda, a alternativa do terminal operar essas atividades em *múltiplos modos*.

Pimenta e Rosa (2017) expandiram o modelo matemático proposto por Pimenta *et al.* (2016), propondo um modelo matemático para planejamento operacional de manobras em um terminal ferroviário, considerando os recursos necessários para a realização dessas manobras, a possibilidade de retenção de todos os recursos da atividade que está sendo realizada até a liberação da atividade seguinte (operação sem-espera), a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo e, ainda, a alternativa dessas atividades serem operadas em *múltiplos modos*. No entanto, esse trabalho ainda não contemplou a necessidade de preparação e configuração de máquinas e equipamentos (tempo de *setup*), quando ocorre troca de carga (soja, milho ou farelo de soja) a ser operado por esse recurso, por exemplo, nem a retenção parcial dos recursos necessários de cada atividade.

Após esta revisão da literatura, não foi encontrado nenhum artigo científico que tratasse do planejamento das atividades com múltiplos recursos, considerando a possibilidade de retenção de parte desses recursos em uma atividade até à atividade sucessora, tampouco foram encontrados estudos que abordassem a

variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo, a possibilidade do modelo considerar tempos de *setup* em determinados recursos e a operação em *múltiplos modos* aplicados à realidade de terminais ferroviários, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3: Resumo das variações dos artigos em Terminais Ferroviários

Ano	Autor	Aplicação em pátios	Recurso único	Múltiplos recursos	Variação dos recursos no tempo	Múltiplos modos	Tempo de Setup	Retenção	Retenção parcial de recursos	Aplicação em terminais ferroviários
1998	Courdeau <i>et al.</i>	X								
1999	Blasum <i>et al.</i>	X								
2000	Dahlhaus <i>et al.</i>	X	X							
2000	Winter e Zimmermann	X	X							
2000	He <i>et al.</i>	X	X							
2003	He <i>et al.</i>	X		X						
2003	Reis Junior e Lopes	X	X							
2009	Riezebos e Wezel	X	X							
2009	Taffner	X		X						
2010	Sabino <i>et al.</i>	X	X							X
2011	Marinov e Viegas	X		X						
2012	Khoshnviyat	X	X							
2014	Hansmann <i>et al.</i>	X	X					X		
2015	Khaled <i>et al.</i>	X						X		
2015	Shi e Zhoe	X		X						
2015	Adlbrecht <i>et al.</i>	X	X							
2016	Pimenta <i>et al.</i>	X		X						X
2017	Pimenta e Rosa	X		X	X	X		X		X
2018	Pimenta (presente dissertação)	X		X	X	X	X		X	X

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Esse capítulo engloba a apresentação do método de pesquisa adotado, incluindo a classificação e as etapas do método proposto.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

A classificação do método de pesquisa adotada para o trabalho baseou-se na taxonomia proposta por Silva e Menezes (2005), que propuseram uma classificação quanto à natureza da pesquisa, à forma de abordagem, aos objetivos e os procedimentos técnicos adotados.

A pesquisa é classificada como de natureza aplicada, pois é capaz de gerar conhecimentos para a aplicação prática de problemas de sequenciamento de atividades realizadas em pátios ou terminais ferroviários. A mesma é dirigida à solução de problemas específicos.

Quanto à abordagem, pode-se dizer que possui enfoque quantitativo, o que ocorre quando informações são transformadas em números e então comparadas e analisadas, a exemplo do valor da função objetivo, que é a soma do tempo de permanência dos lotes, que servem de parâmetro para comparação entre cenários. Há também o enfoque qualitativo, pois há utilização do enfoque indutivo na análise dos resultados dos diversos cenários propostos (SILVA e MENEZES, 2005)

Em se tratando de objetivos, esta dissertação se classifica como exploratória, já que busca maior familiaridade com o problema de planejamento da sequência de atividades a serem realizadas em terminais ferroviários, a partir de análises de exemplos parecidos encontrados na literatura, para melhor compreensão do problema.

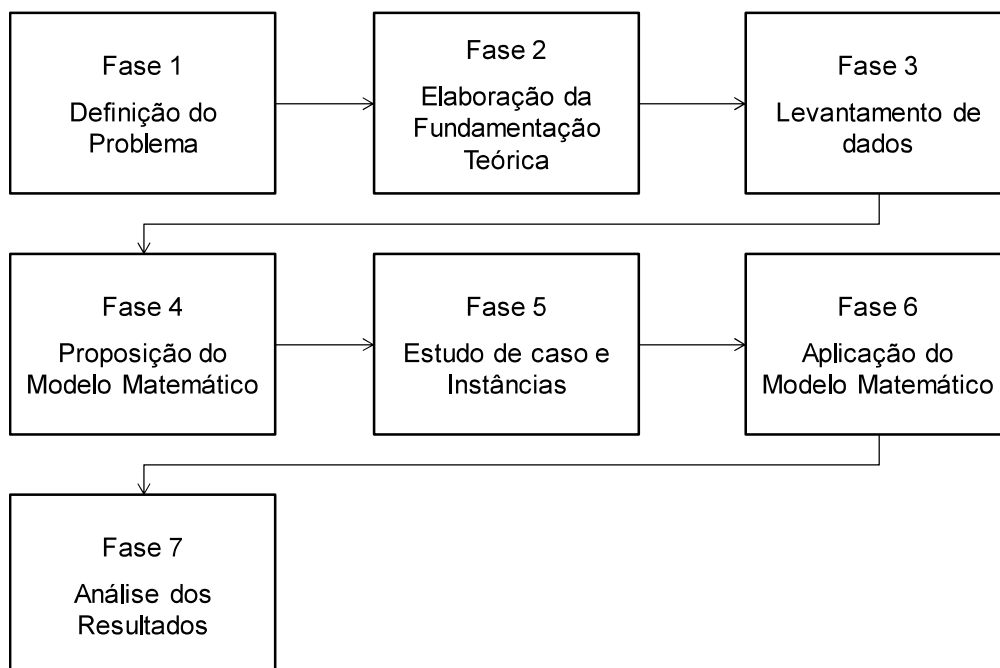
No que se refere ao procedimento técnico, trata-se de uma pesquisa bibliográfica utilizando modelagem matemática. A pesquisa bibliográfica compreendeu o estudo sistematizado realizado a partir de material publicado em livros, artigos de periódicos e outros (VERGARA, 2011). Essa abrangeu, sobretudo, a pesquisa de artigos científicos em plataformas como *Science Direct*, *Web of Science*, *Scopus*, Plataforma CAPES, *ResearchGate* e *Google Scholar*. As palavras chaves para busca foram: Planejamento de Atividades, Planejamento de manobras, *Resource*

Constrained Project Scheduling Problem, Terminal Ferroviário, pátio ferroviário, ferrovia, *railroad* e *railway*. Com base no levantamento inicial, os artigos foram avaliados e os principais autores e trabalhos foram identificados. A análise de cada artigo englobou o problema estudado e a abordagem de solução proposta para a resolução do problema de planejamento da sequência das atividades em terminais ferroviários com diversos recursos, bem como outras referências a respeito de RCPSP e de problemas com aplicação do conceito de retenção.

3.2 FASES DO MÉTODO DE PESQUISA

Com o intuito de atingir o objetivo da pesquisa, faz-se necessário seguir um método de pesquisa com as fases bem definidas. Dessa forma, conforme a Figura 4, o método está dividido em sete fases que são apresentadas a seguir.

Figura 4: Fases da metodologia de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Fase 1: Definição do Problema**

Nessa fase foi escolhido o tema dentro da área de operação de pátios e terminais ferroviários. O problema escolhido foi o de planejamento da sequência de atividades em um terminal ferroviário.

- Fase 2: Elaboração da Fundamentação Teórica

Foi feito um levantamento bibliográfico sobre o problema do planejamento de atividades em pátios ou terminais ferroviários a fim de entender o tema de pesquisa. Foi realizada também pesquisa bibliográfica a respeito dos modelos matemáticos que teriam as características de aplicação à realidade do planejamento da sequência de atividades em um terminal ferroviário. Nessa fase foi identificado o MRCPSP como o modelo matemático que melhor se enquadrou à essa realidade. Nessa etapa foi possível construir um conhecimento a respeito dos tipos de variáveis e parâmetros que estão envolvidos no problema estudado, dando o embasamento para construção do modelo.

- Fase 3: Levantamento de Dados

Levantamento e apresentação da estrutura dos dados de entrada ou parâmetros necessários para execução do modelo, por meio de visitas ao terminal ferroviário em estudo e entrevista com os profissionais responsáveis pelo planejamento de atividades do terminal.

- Fase 4: Proposição do Modelo Matemático

A partir das informações obtidas na Fase 2, formulou-se o modelo matemático e o mesmo foi implementado no *solver* IBM® ILOG® CPLEX® 12.6 (IBM, 2017), utilizado para o desenvolvimento e implementação de modelos matemáticos. O modelo foi validado executando-o com cenários de teste, após as adaptações necessárias para se aproximar da realidade operacional.

- Fase 5: Estudo de caso e Instâncias

Realização de diferentes cenários a fim de validar e explicar as razões pelas quais aquelas características representariam melhor a realidade operacional. Nessa fase também foi criado um conjunto de instâncias baseadas em dados reais. Variações referentes aos diferentes parâmetros foram elaboradas para analisar a sensibilidade e as respostas do modelo

- Fase 6: Aplicação do Modelo Matemático

Aplicação do modelo matemático nos cenários e instâncias criadas a fim de realizar o planejamento da sequência das atividades em um terminal ferroviário.

- Fase 7: Análise dos Resultados

A solução numérica obtida por meio do CPLEX foi transferida para planilha eletrônica e os valores das variáveis de decisão e da função objetivo foram organizados em forma de tabelas e gráficos para melhor entendimento e análise. Nessa fase, também, realizou-se a comparação dos resultados obtidos pelo modelo proposto com o planejamento manual das atividades no terminal ferroviário.

As fases que descrevem o estudo de caso e instâncias, o modelo matemático proposto e a análise de resultados serão tratados em capítulos específicos dessa dissertação, sendo eles, respectivamente, os Capítulos 4, 5 e 6.

4 PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS

O cenário de aplicação do modelo proposto por esta dissertação é um terminal ferroviário da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) que fica dentro do Complexo de Tubarão (Vitória - ES), considerado o segundo maior pátio em movimentação de cargas da América Latina. A EFVM, cujo mapa pode ser visualizado na Figura 5, é responsável por cerca de 30% da carga ferroviária transportada no país. Dentre as cargas transportadas, podem ser citadas como exemplo minério de ferro, carvão mineral, produtos siderúrgicos, grãos e fertilizantes (Vale, 2017).

É importante ressaltar que os dados utilizados para realização desta dissertação foram obtidos da empresa Vale por meio do convênio com a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), número 75528452/2016. Nesse contrato, a empresa Vale S.A. autoriza a utilização de alguns dados operacionais para fins acadêmicos. A fim de viabilizar a publicação, os valores foram transformados por uma função não divulgada com o objetivo de manutenção do sigilo dos mesmos.

Figura 5: Mapa da EFVM



Fonte: ANTT (2017).

Os recursos utilizados para a operação dos lotes de vagões estão descritos na Tabela 4. A disponibilidade desses recursos pode variar com o tempo devido a entrega dos mesmos para manutenção, falta de equipes, dentre outros.

Tabela 4: Recursos disponíveis no terminal	
Tipos de recurso	Quantidades
Manobreiro	4
Locomotiva	4
Local de Manobra A (linhas)	3
Moega 1	1
Moega 2	1
Estrutura Limpeza	2
Estrutura Fertilizantes	1
Pá carregadeira	3
Local de Manobra B (linhas)	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

O recurso Manobreiro refere-se ao empregado responsável pela realização das manobras com veículos ferroviários. Acoplam e desacoplam vagões, operam aparelhos de mudança de via (AMV), revisam veículos ferroviários. Podem também ser responsáveis por preencher registros burocráticos com informações técnicas e operacionais das atividades realizadas. Trabalham seguindo normas de operação, segurança e qualidade.

O recurso que neste trabalho é denominado Locomotiva refere-se a uma locomotiva de manobra mais um maquinista para conduzi-la. Assim, quando um recurso Locomotiva está disponível, entende-se que a locomotiva já está equipada com seu maquinista. Este recurso, que é de suma importância em qualquer pátio ou terminal ferroviário plano, é o responsável pela viabilização da operação de diversas atividades, bem como pelo deslocamento dos lotes de vagões entre as atividades sucessivas que devem ser realizadas.

Os recursos denominados Local de Manobra A e Local de Manobra B são os locais destinados a serem realizadas as manobras de triagem, que possuem linhas ferroviárias interligadas entre elas e às linhas de circulação por meio de AMV. Apesar de possuírem as mesmas características, os tempos de operação em um local ou no outro podem variar devido a distância entre as atividades. Cada um desses locais possui 5 linhas, sendo uma delas dedicada a vagões para oficina e outra a circulação, restando 3 linhas destinadas a realização de manobras.

Os recursos denominados Moega 1 e Moega 2 são estruturas de descarregamento de lotes de vagões do terminal e são considerados recursos distintos por possuírem capacidades diferentes. O recurso Moega 1 foi construído mais recentemente que o recurso Moega 2 e, por este motivo, possui algumas características de maior dimensionamento e tecnologia que viabilizam uma operação mais rápida.

O recurso Estrutura Limpeza, com capacidade para receber dois lotes ao mesmo tempo, é o local do pátio responsável pela limpeza do lote de vagões, uma vez que o lote precisa passar por um processo de limpeza dos resíduos dos produtos que o lote de vagões estava carregado para posterior carregamento do produto fertilizante. Esse carregamento do produto fertilizante no lote de vagões é realizado no recurso Estrutura Fertilizantes.

O recurso Pá carregadeira é o recurso necessário para que seja realizada a movimentação dos vagões do local de limpeza de vagões para o local de carregamento do produto fertilizante. Há a possibilidade de realizar essa atividade de movimentação dos vagões com as pás carregadeiras devido a adaptação de engate desses equipamentos, conforme Figura 6 e apenas pode ocorrer em locais de pátio com o piso nivelado (no caso do terminal em estudo, apenas o local da Estrutura Fertilizante tem essa característica). Esse recurso também é utilizado no interior da área de carregamento de fertilizantes para movimentação do produto e carregamento dos vagões, de acordo com a Figura 7.

Figura 6: Foto de uma pá-carregadeira com engate adaptado em operação



Fonte: Acervo LAMMEP)

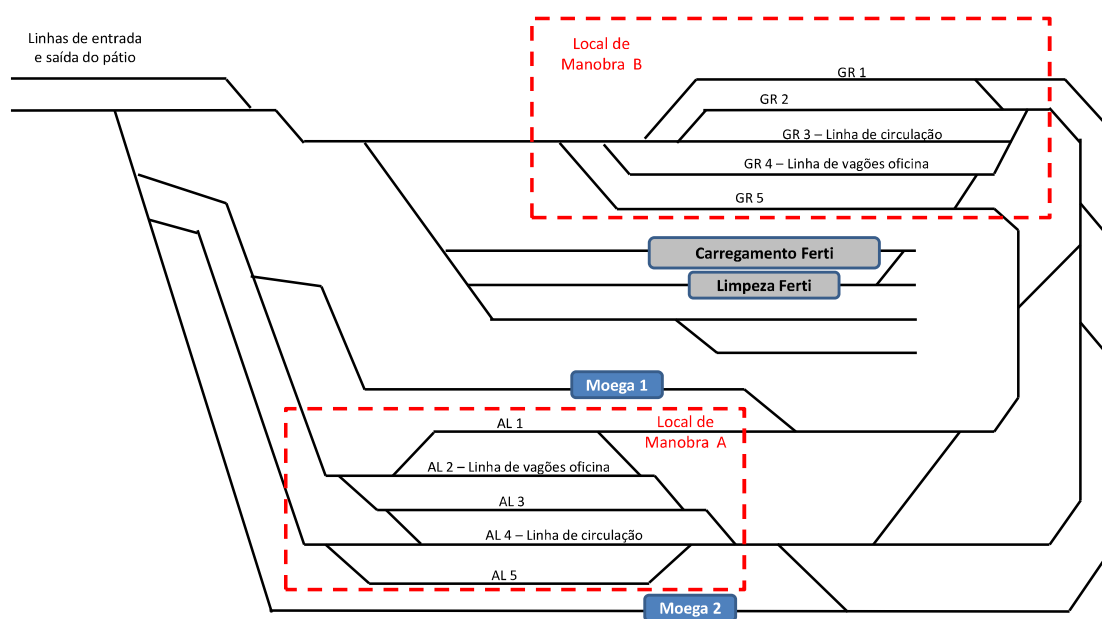
Figura 7: Foto de uma pá-carregadeira em operação em galpão de grãos



Fonte: Acervo LAMMEP.

As atividades pelas quais os lotes de vagões devem passar para poderem ser entregues pelo terminal à ferrovia serão explicadas a partir da Figura 8 onde é apresentada a disposição física dos principais recursos do terminal. Este desenho do terminal é conhecido como Mapa de Pátio.

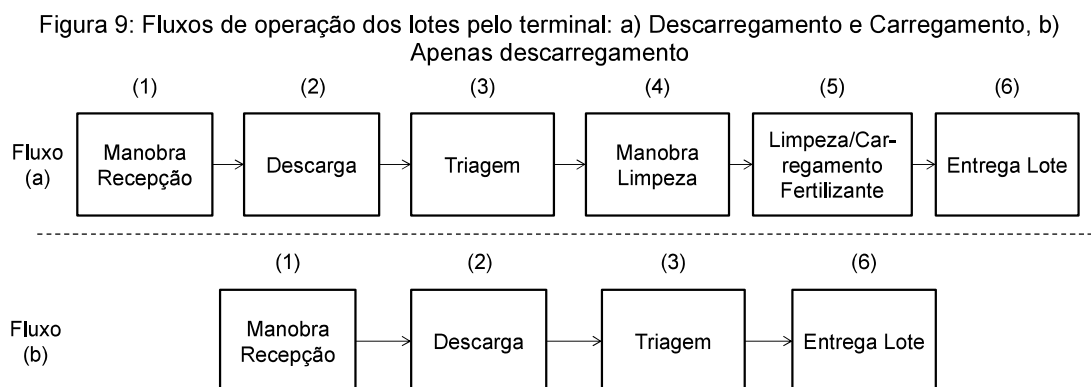
Figura 8: Mapa de pátio simplificado do Terminal Ferroviário em estudo



Fonte: ROSA (2009) - Adaptado pelo autor.

Cabe ponderar que esse Mapa de Pátio não está em escala, tendo por objetivo apresentar esquematicamente as principais estruturas físicas do terminal. São elas: Linhas de manobras de lote de vagões (Local de manobra A e Local de manobra B), estruturas de descarregamento de lote de vagões (Moega 1 e Moega 2), Local de Limpeza de lote de vagões para carregamento de Fertilizante (Limpeza Ferti) e Linha de carregamento de fertilizante (Carregamento Ferti). As demais linhas do terminal são linhas de circulação de trens.

Este terminal ferroviário utilizado para validação do modelo matemático proposto para planejamento de atividades possui dois fluxos para operação dos lotes pelo terminal, conforme apresentado na Figura 9. O fluxo (a) representa aqueles lotes que passarão por descarregamento e carregamento dentro do terminal. Já o fluxo (b), são aqueles que apenas serão descarregados no terminal e não possuem programação de carregamento, ou seja, serão disponibilizados para formação de trens vazios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Similar a diversos terminais ferroviários, o terminal em estudo possui linhas de acesso dos lotes aos diversos recursos em que as atividades serão realizadas. À medida que os trens vão chegando, eles são manobrados e separados em três lotes de trinta vagões cada, para serem disponibilizados para o terminal (cada trem com vagões do tipo *Hopper* que circula nessa ferrovia possui noventa vagões - três lotes de trinta vagões). Essa quantidade de vagões em um lote é baseada nas capacidades de tração das locomotivas de manobra e às restrições dos tamanhos das linhas de carregamento, limpeza e descarga.

Após os lotes de vagões do tipo *Hopper*, carregados de grãos agrícolas (soja, milho e farelo de soja), serem descarregados, duas opções podem ocorrer: são manobrados para a área de carregamento de fertilizante para serem carregados, conforme Figura 9 – fluxo (a) ou são entregues para a ferrovia vazios para viajar e serem carregados novamente em um terminal de carregamento em outro ponto da ferrovia, de acordo com a Figura 9 – fluxo (b). Assim, os lotes do fluxo (a) da Figura 9 realizam seis atividades sucessivas (atividades de 1 a 6), enquanto os lotes da Figura 9 – fluxo (b) realizam 4 atividades sucessivas (atividades 1, 2, 3 e 6).

A atividade 1, Manobra Recepção, envolve a recepção dos lotes pelo terminal vindos da ferrovia e estacionamento dos mesmos em linha disponível. A atividade 2, Descarga, contempla a retirada do lote de vagões da linha em que estavam estacionados, o posicionamento do lote de vagões para descarga em uma das moegas e a operação de descarga dos vagões. Também na operação de descarga ocorre a inspeção do lote de vagões pela equipe de manutenção, buscando identificar os vagões desse lote que devem ser direcionados a manutenção de vagões após serem descarregados, denominados vagões reparos.

Na atividade 3, Triagem, o lote é retirado do recurso moega em que a descarga foi realizada e levado para um dos locais de manobra para que seja realizada a manobra de triagem para retirada de vagões reparos do lote. Nessa mesma atividade, vagões que estavam na oficina e foram reparados são incluídos no lote para que o mesmo volte a ter a quantidade de vagões estabelecida (no caso do terminal em estudo, 30 vagões). Por esse motivo que uma das linhas nas Áreas de manobra A e B, são dedicadas a vagões que vieram da oficina após manutenção ou que se destinam a oficina para manutenção, como pode ser visto na Figura 8 (AL2 – Linha de vagões oficina, no Local de Manobra A e GR4 – Linha de vagões oficina, no Local de manobra B). Após a triagem o lote é estacionado na linha de manobra em que realizou a manobra de triagem.

A atividade 4, Manobra Limpeza, tem por objetivo levar os lotes para o local do terminal onde ocorre a limpeza dos resíduos dos produtos dos lotes de vagões após a descarga, para posterior carregamento do produto fertilizante. Nessa atividade estão incluídas a retirada do lote de vagões da linha de estacionamento e a manobra

para deixar os vagões na área do terminal onde ocorre a limpeza do lote de vagões (recurso Estrutura Limpeza).

A atividade 5, Limpeza/Carregamento Fertilizante, tem o papel de realizar a limpeza e posterior carregamento do fertilizante no lote de vagões. Nesta atividade, que é realizada apenas em um local do pátio e pode operar um lote por vez, ocorre a operação de limpeza dos lotes de vagões e a movimentação dos vagões do local de limpeza e posicionamento para carregamento no recurso Estrutura Fertilizantes, por meio de movimentação dos lotes de vagões realizada por pás carregadeiras. Ao término da atividade 5, o lote de 30 vagões, já carregado com o produto Fertilizante, aguarda a retirada do lote da Estrutura Fertilizantes. Na atividade 6, Entrega Lote, o lote é retirado da área do pátio em que está e é destinado para entrega em linha disponível, finalizando a operação do lote pelo terminal.

Já os tempos de operação de cada atividade variam de acordo com a carga que está sendo transportada, com os recursos alocados para a operação desta atividade, bem como suas respectivas quantidades. Na situação do terminal em estudo, existem dois modos para operação de cada atividade. O primeiro deles, denominado MM1 é aquele considerado a operação principal no terminal em estudo, ou seja, é a forma regular da operação ser realizada. Já o modo denominado MM2, representa uma forma alternativa do terminal operar determinada atividade, seja por meio de utilização de diferentes recursos, seja por meio da alocação de uma quantidade maior de recursos alocada para realização da atividade. Esses tempos, bem como os recursos utilizados para operação de cada um deles, são baseados na média dos dados históricos de operação do terminal. Estabeleceu-se que cada intervalo de tempo representa 30 minutos. Assim, quando a operação de uma atividade durar 1h30min, os recursos necessários para sua operação serão alocados por 3 (três) unidades de tempo.

Na Tabela 5 e Tabela 6 serão apresentados os tempos de operação dos lotes carregados com grãos (milho e soja) sendo operados nos modos de operação MM1 e MM2, respectivamente.

Tabela 5: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com milho e soja no modo MM1

Produto: Milho e Soja - Modo: MM1						
Tipos de lote a serem processados	Tipos de atividades e tempo de duração (em unidades de tempo) - MM1					
	Manobra Recepção	Descarga	Triagem	Manobra Limpeza	Limpeza/Carregamento Fertilizante	Entrega Lote
Descarregamento	2	5	5	-	-	1
Descarregamento/Carregamento	2	5	5	3	15	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 5 apresentam-se os tempos de operação dos lotes que estão carregados com grãos (milho e soja) sendo executados no modo de operação MM1 do terminal em estudo. Nela nota-se que a duração das atividades Manobra Recepção, Descarga e Triagem é a mesma para os dois tipos de lotes operados no terminal, sendo 2, 5 e 5 unidades de tempo cada uma delas, respectivamente. Observa-se também que não existem as atividades Manobra Limpeza e Limpeza/Carregamento Fertilizante para aqueles lotes que apenas tem programação para descarregarem no terminal, uma vez que, conforme Figura 9. Pelo fato desses lotes não estarem programados para carregamento de fertilizantes, não há necessidade de passarem por essas atividades. A última atividade operada pelos lotes carregados com milho ou soja no modo MM1 no terminal possuem tempos de operação diferentes devido à distância do local do terminal de fertilizantes para a área de entrega do lote.

Tabela 6: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com milho e soja no modo MM2

Produto: Milho e Soja - Modo: MM2						
Tipos de lote a serem processados	Tipos de atividades e tempo de duração (em unidades de tempo) - MM2					
	Manobra Recepção	Descarga	Triagem	Manobra Limpeza	Limpeza/Carregamento Fertilizante	Entrega Lote
Descarregamento	3	6	5	-	-	2
Descarregamento/Carregamento	3	6	5	2	18	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 6 apresentam-se os tempos de operação dos lotes que estão carregados com grãos (milho e soja) sendo executados no modo de operação MM2 do terminal em estudo. As atividades Manobra Recepção, Descarga e Triagem possuem a mesma duração para os dois tipos de lotes operados no terminal, sendo 3, 6 e 5 unidades de tempo cada uma delas, respectivamente. De forma idêntica ao explicado a respeito da Tabela 5, observa-se também que não existem as atividades Manobra Limpeza e Limpeza/Carregamento Fertilizante para aqueles lotes que apenas tem programação para descarregar no terminal, uma vez que, de acordo com a Figura 9, pelo fato desses lotes não estarem programados para carregamento de fertilizantes, não há necessidade de passarem por essas atividades.

Conforme já esclarecido, a variação na duração das atividades entre os dois modos, como pode ser visto por meio da comparação entre a Tabela 5 e Tabela 6 é justificada devido a utilização de recursos diferentes para realização de cada uma das atividades, o que será mais detalhadamente exposto posteriormente. A última atividade operada pelos lotes carregados com milho ou soja no modo MM2 no terminal possuem tempos de operação diferentes devido à distância do local do terminal da estrutura fertilizantes para a área de entrega do lote.

A Tabela 7 e Tabela 8, por sua vez, apresentam os tempos de operação das atividades dos lotes carregados com farelo de soja sendo operados nos modos de operação MM1 e MM2, respectivamente.

Tabela 7: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com farelo de soja no modo MM1

Tipos de lote a serem processados	Produto: Farelo de soja - Modo: MM1					
	Tipos de atividades e tempo de duração (em unidades de tempo) - MM1					
	Manobra Recepção	Descarga	Triagem	Manobra Limpeza	Limpeza/Carregamento Fertilizante	Entrega Lote
Descarregamento	2	7	5	-	-	1
Descarregamento/ Carregamento	2	7	5	3	18	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 7 podem ser vistos os tempos de operação das atividades dos lotes carregados com farelo de soja sendo executados no modo MM1 de operação do

terminal em estudo. A duração das atividades Manobra Recepção, Descarga e Triagem é a mesma para os dois tipos de lotes operados no terminal, sendo 2, 7 e 5 unidades de tempo cada uma delas, respectivamente. A duração da atividade Descarga é maior para o produto farelo de soja do que para os produtos milho e soja devido a compactação do produto no interior do vagão e consequente menor vazão do produto pelas comportas do vagão.

Por essa razão, o tempo para a limpeza dos lotes de vagão que estavam carregados com farelo de soja e que possuem programa de carregamento de fertilizantes também é superior ao tempo de limpeza dos lotes carregados com soja ou milho, como pode ser visto comparando os valores da Tabela 5 e Tabela 7. Observa-se também que não existem as atividades Manobra Limpeza e Limpeza / Carregamento Fertilizante para aqueles lotes que apenas tem programação para descarregar no terminal, uma vez que, conforme a Figura 9, pelo fato desses lotes não estarem programados para carregamento de fertilizantes, não há necessidade de passarem por essas atividades. A última atividade operada pelos lotes carregados com farelo de soja no modo MM1 no terminal possuem tempos de operação diferentes devido à distância do local do terminal da estrutura fertilizantes para a área de entrega do lote.

Tabela 8: Tempos de operação das atividades no terminal dos lotes carregados com farelo de soja no modo MM2

Produto: Farelo de soja - Modo: MM2						
Tipos de lote a serem processados	Tipos de atividades e tempo de duração (em unidades de tempo) - MM2					
	Manobra Recepção	Descarga	Triagem	Manobra Limpeza	Limpeza/Carregamento Fertilizante	Entrega Lote
Descarregamento	3	7	5	-	-	2
Descarregamento/Carregamento	3	7	5	2	22	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta os tempos de duração das atividades dos lotes carregados com farelo de soja sendo operados no terminal no modo MM2. As atividades Manobra Recepção, Descarga e Triagem possuem a mesma duração para os dois tipos de lotes operados no terminal, sendo 3, 7 e 5 unidades de tempo cada uma delas, respectivamente. Observa-se também, novamente, que não existem as atividades Manobra Limpeza e Limpeza / Carregamento Fertilizante para aqueles

lotes que apenas tem programação para descarregar no terminal, uma vez que, conforme a Figura 9, esses lotes não têm programação para carregamento de fertilizantes. A última atividade operada pelos lotes carregados com farelo de soja no modo MM2 no terminal possuem tempos de operação diferentes devido à distância do local do terminal da estrutura fertilizantes para a área de entrega do lote.

É importante destacar que o modo em que a atividade será realizada será definido pelo modelo matemático proposto nessa dissertação e que não há restrição que determine que todas as atividades de um mesmo lote tenham que ser realizadas no mesmo modo. Assim, pode ocorrer que o lote 1 tenha algumas atividades realizadas no modo 1 e outras no modo 2.

A Tabela 9 apresenta os recursos necessários para operação de cada uma das atividades no terminal e suas respectivas quantidades. Nela, pode-se observar que além da variação da quantidade de recursos, há possibilidade de utilização de recursos diferentes para operação dos modos MM1 e MM2, com diferentes tempos de operação.

Tabela 9: Recursos demandados por cada atividade, nos dois modos de operação

Atividades		Manobra Recepção		Descarga		Triagem		Manobra Limpeza		Limpeza/Car- regamento Fertilizante		Entrega Lote	
Recurso	Modo	MM1	MM2	MM1	MM2	MM1	MM2	MM1	MM2	MM1	MM2	MM1	MM2
Manobreiro		1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1
Locomotiva		1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
Local de Manobra A		1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Moega 1		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moega 2		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Estrutura Limpeza		0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Estrutura Fertilizantes		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Pá carregadeira		0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0
Local de Manobra B		0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, tendo como exemplo a atividade “Descarga”, observando a Tabela 5 e Tabela 6 em conjunto com a Tabela 9 tem-se o seguinte cenário: quando os produtos milho e soja são descarregados, observa-se que o tempo de duração no modo MM1 é de 5 unidades tempo (Tabela 5). Para executar o descarregamento, atividade Descarga (Tabela 9) do lote desse produto no modo MM1 são necessários um recurso Manobreiro, um recurso Locomotiva e um recurso Moega 1. Já para que a mesma atividade Descarga seja realizada no modo MM2 (Tabela 6), o tempo de duração necessário é de 6 unidades de tempo, com um recurso Manobreiro, um recurso Locomotiva e um recurso Moega 2 (Tabela 9). Portanto, no caso da atividade Descarga, a variação de tempo nos dois modos de operação se deve a Moega em que a descarga está sendo realizada (Moega 1 é mais moderna, o que possibilita realizar a atividade em tempo menor).

Além do motivo de utilização de recursos diferentes, a quantidade de recursos também pode influenciar o tempo de operação, como pode ser visto na atividade Manobra Limpeza, em que a variação do tempo de operação se deve a utilização ou não do recurso Manobreiro (no modo MM1, a atividade não é realizada com o recurso Manobreiro, enquanto no modo MM2 ocorre a utilização desse recurso nessa atividade).

Observando a Tabela 9, mais uma importante nota é necessária. Conforme descrito nos Capítulos 1 e 2 dessa dissertação, as atividades do planejamento do sequenciamento das atividades em um terminal ferroviário têm a característica de retenção de recursos. Essa particularidade ocorre naquelas situações em que a atividade sucessora não ocorre imediatamente após a atividade predecessora, pelo fato de um ou mais recursos necessários para operação da atividade sucessora não estarem disponíveis naquele tempo e quando não há espaço físico ou viabilidade de movimentação dos vagões. Por isso, não havendo possibilidade do lote operado ser retirado do local para posteriormente passar para atividade seguinte, fica retido na atividade, ocupando os recursos alocados para a mesma.

A diferença do conceito de retenção trazido por essa dissertação concerne ao fato de que nem todos os recursos da atividade necessitam ficar retidos após o término da operação da mesma, nas situações em que a atividade sucessora ainda não pode ser operada. A retenção do recurso é aplicável apenas aos recursos fixos do

terminal, em que o lote está alocado. Já os recursos móveis, podem ser disponibilizados após o término daquela atividade a fim de realizarem outras atividades. A classificação em recursos fixos e móveis pode ser observada por meio da Tabela 10.

Tabela 10: Classificação dos recursos – fixos e móveis

Recurso	Tipo
Manobreiro	Móvel
Locomotiva	Móvel
Local de Manobra A (linhas)	Fixo
Moega 1	Fixo
Moega 2	Fixo
Estrutura Limpeza	Fixo
Estrutura Fertilizantes	Fixo
Pá carregadeira	Móvel
Local de Manobra B (linhas)	Fixo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como exemplo, na atividade Manobra Recepção no modo MM1, pode ocorrer a retenção de uma linha de pátio do recurso Local de Manobra A, caso a atividade sucessora (atividade Descarga), em qualquer um dos modos, não esteja disponível para operação desse lote imediatamente após a atividade Manobra Recepção, pois esse é o recurso fixo dessa atividade. No caso da atividade Manobra Recepção no modo MM2, o recurso em retenção seria uma linha do recurso Local de Manobra B, também por caracterizar-se como um recurso fixo. Nos dois modos, após o término da operação da atividade, os recursos móveis (Locomotiva e Manobreiro) são liberados para operação de outras atividades.

Com base nas explicações a respeito da aplicabilidade do conceito de retenção aos recursos fixos em cada uma das atividades, a seguir apresenta-se a Tabela 11, onde são apresentados os recursos fixos, onde ocorre a retenção, por atividade e modo.

Tabela 11: Recursos fixos por atividade e modo

Atividade	Modo	Recursos Fixos
Manobra Recepção	MM1	Local de Manobra A
	MM2	Local de Manobra B
Descarga	MM1	Moega 1
	MM2	Moega 2
Triagem	MM1	Local de Manobra A
	MM2	Local de Manobra B
Manobra Limpeza	MM1	Estrutura Limpeza
	MM2	Estrutura Limpeza
Limpeza/Carregamento Fertilizante	MM1	Estrutura Limpeza
		Estrutura Fertilizantes
	MM2	Estrutura Limpeza
		Estrutura Fertilizantes
Entrega Lote	MM1	Local de Manobra B
	MM2	Local de Manobra A

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, os recursos fixos na atividade Descarga são a Moega 1, no modo MM1 e a Moega 2 no modo MM2. Logo, serão esses os recursos em retenção, nas situações em que a atividade Triagem não puder ser realizada imediatamente após a atividade Descarga. Os recursos móveis Locomotiva e Manobreiro, necessários na realização da atividade Descarga, ficam disponíveis após o fim da operação dessa atividade.

No caso da atividade Triagem, os recursos fixos são o Local de Manobra A, no modo MM1 e o Local de Manobra B, no modo MM2. Desta forma, estes serão os recursos em retenção, nas situações em que a atividade Manobra Limpeza (nos casos em que o lote a ser processado tiver programa de carregamento de fertilizante) ou a atividade Entrega Lote (nos casos dos lotes que não tiverem programa de carregamento de fertilizante) não puderem ser realizadas imediatamente após a atividade Triagem. Os recursos móveis Locomotiva e Manobreiro, necessários na realização da atividade Triagem, ficam disponíveis após término da operação dessa atividade.

No que tange a atividade Manobra Limpeza, os recursos móveis são um recurso Locomotiva, no modo MM1, e um recurso Locomotiva e um recurso Manobreiro no modo MM2. Esses recursos ficam disponíveis após o término da operação dessa

atividade. No entanto, para operação desta atividade, também são necessários um recurso Estrutura Limpeza, em cada um dos dois modos de operação. Esse recurso, então, deve ficar em retenção nas situações em que a atividade sucessora Limpeza / Carregamento de Fertilizante não tiver disponibilidade para iniciar imediatamente após a atividade Manobra Limpeza.

Já a atividade Limpeza / Carregamento de Fertilizante possui como recursos móveis necessários para sua operação, apenas o recurso Pá Carregadeira, sendo 3 recursos no modo MM1 ou dois recursos no modo MM2. Esses recursos ficam disponíveis após o término da operação dessa atividade. Com relação aos recursos fixos, são necessários os recursos Estrutura Limpeza e Estrutura Fertilizantes, em cada um dos dois modos de operação. Esses recursos, então, devem ficar em retenção nas situações em que a atividade sucessora Entrega Lote não puder ser realizada imediatamente após o término da anterior. Como não há atividade sucessora realizada no terminal para a última atividade do lote, Entrega Lote, essa atividade não possui nenhum recurso com característica de retenção.

É necessário, ainda, esclarecer a característica de tempo de *setup* existente em uma das atividades operadas neste terminal. A atividade 2, Descarga, contempla a operação de descarga do lote de vagões. Pode ser visto, na Tabela 5, que neste terminal são operados 3 tipos de produtos para descarregamento nos recursos Moega 1 e Moega 2. São eles: Milho, Soja e Farelo de Soja. Devido ao fato de não haver exclusividade de operação de descarga de determinado produto no recurso Moega 1 ou Moega 2, ambos os recursos podem operar os lotes carregados com os três tipos de produtos. No entanto, para isso, é necessário que o recurso Moega utilizado para descarregar o lote de um tipo de produto passe por um processo de limpeza e preparação para que não ocorra a contaminação de um produto, com resíduos de outros produtos (milho com resíduo de soja, farelo de soja com resíduo de milho etc).

Uma vez que, especificamente na atividade 2, a única diferença entre os modos de operação é a descarga em diferentes moegas, o tempo de *setup* só será aplicável quando ocorrer uma mudança de produtos entre os lotes que estiverem passando pela atividade Descarga, caso eles utilizem o mesmo recurso Moega. Assim, apesar do modelo matemático contemplar a possibilidade de tempo de *setup* entre

quaisquer atividades e modos, no caso particular dessa dissertação só haverá tempo de *setup* nas situações em que ocorrer a atividade Descarga de lotes carregados com produtos diferentes, de forma consecutiva, em um mesmo modo (modo *m* da atividade anterior igual ao modo *n* da atividade seguinte).

Esse tempo de limpeza dos recursos Moega de acordo com os produtos descarregados é pré-definido pela área operacional, conforme a Tabela 12, que apresenta a matriz de tempo de *setup* a partir de um produto que está na atividade Descarga que está discriminado na coluna 1, para a atividade Descarga dos produtos discriminados na linha 1.

Tabela 12: Trocas de produtos e respectivos tempos de *Setup*

Tempo de <i>setup</i> dos recursos Moega 1 e Moega 2 (u.t.)	Milho	Soja	Farelo de soja
Milho	0	1	4
Soja	1	0	4
Farelo de soja	1	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este tempo de *setup* não se caracteriza como mais uma atividade a ser operada no terminal pelos seguintes motivos:

- 1) O tempo de *setup* se caracteriza por um intervalo de tempo de preparação entre atividades realizadas em um mesmo recurso. Ou seja, não se trata de uma atividade entre as atividades 1 e 2, mas eventualmente entre a atividade 2 do lote 1 e a atividade 2 do lote 2, por exemplo;
- 2) Este tempo de *setup* ocorre de acordo com o sequenciamento das atividades proposto pelo modelo. Não haverá tempo de *setup* entre todos os lotes operados no recurso moega que estiver sendo utilizado. Uma vez que se estiver ocorrendo a atividade Descarga de um lote carregado com milho e o próximo lote a ser descarregado também for de milho, não há necessidade de limpeza e preparação deste recurso moega. Assim, o tempo de *setup* ocorre apenas quando há troca de tipos de produtos sendo descarregados em um recurso Moega;

- 3) O tempo de *setup* não é o mesmo para a preparação da descarga dos diversos produtos. Em reuniões com a equipe do terminal responsável pela atividade Descarga, os mesmos esclareceram quando é aplicável e qual o tempo de limpeza e preparação do recurso Moega quando ocorrer a mudança dos produtos a serem descarregados. Esta diferença de tempos está exposta na Tabela 12.

Como exemplo, conforme Tabela 12, o tempo de *setup* será de 4 unidades de tempo, para preparação da descarga do produto farelo de soja, quando o último lote descarregado tiver sido do produto soja ou o produto milho. Não há necessidade de tempo de *setup*, nas situações em que a descarga do lote anterior também for do produto farelo de soja (tempo de *setup* zero).

4.1 GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS

Para realização dos testes no modelo matemático proposto, foram elaboradas quatorze instâncias, apresentadas na Tabela 13. Nota-se que as instâncias estão divididas em quatro grupos, sendo eles: A, B, C e D. As instâncias do Grupo A (Teste) foram criadas com o objetivo de discutir, baseado no modelo matemático proposto, cada uma das contribuições específicas dessa dissertação, a saber: *múltiplos modos*, tempo de *setup*, indisponibilidade de recursos e retenção. Aplicadas com algumas características do terminal em estudo, refletem situações hipotéticas e que não correspondem plenamente à realidade das operações das atividades neste terminal, como, por exemplo, uma instância em que não há possibilidade de operação em *múltiplos modos* ou outras instâncias que não consideram a retenção dos recursos, bem como a padronização do tempo de *setup* entre as atividades Descarga nesse grupo de instâncias em 5 unidades de tempo, a fim de facilitar a demonstração da aplicação dessa característica.

As do Grupo B, como podem ser observadas na Tabela 13, refletem as características específicas desse terminal e foram congregadas nesses grupos para avaliar a utilização do modelo matemático proposto como uma ferramenta de auxílio à decisão com relação ao período de indisponibilidade dos recursos (entrega dos mesmos à manutenção ou período de ausência de mão-de-obra) para redução da

estadia no terminal, em um cenário de planejamento de operação de 9 lotes, que representa uma operação rotineira no terminal.

O Grupo C de instâncias tem o propósito de testar o modelo matemático proposto a cenários maiores, em que a quantidade de lotes aumenta para 12, 15 e 18 lotes. Por fim, o Grupo D, na Tabela 13, possui duas instâncias reais em que o resultado do modelo matemático proposto é comparado com o sequenciamento real das atividades realizada no terminal ferroviário em estudo. As características específicas de cada uma das instâncias serão exploradas a seguir.

Tabela 13: Instâncias para avaliação do modelo matemático

Grupo	Instância	Quantidade de Lotes	Quantidade de lotes de cada tipo				Múltiplos modos	Tempo <i>setup</i>	Indisponibilidade de recursos	Retenção	Proposta 1 - Indisponibilidade de recursos	Proposta 2 - Indisponibilidade de recursos
			Descarga de grãos	Descarga de grãos e carreg. de fertilizante	Descarga de Farelo	Descarga de Farelo e carreg. de fertilizante						
A	1	9	5	1	2	1						
	2	9	5	1	2	1	X					
	3	9	5	1	2	1	X	X				
	4	9	5	1	2	1	X	X	X			
	5	9	5	1	2	1	X	X	X	X		
B	6	9	6	1	1	1	X	X	X	X		
	7	9	6	1	1	1	X	X		X		
	8	9	6	1	1	1	X	X	X	X	X	
	9	9	6	1	1	1	X	X	X	X		X
C	10	12	8	1	2	1	X	X		X		
	11	15	8	1	5	1	X	X		X		
	12	18	10	2	5	1	X	X		X		
D	13	7	5	2	0	0	X	X		X		
	14	9	6	2	1	0	X	X	X	X		

Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações nas instâncias em cada um dos grupos estão evidenciadas pelas seguintes características: Quantidade de lotes, quantidade de lotes de cada tipo, *múltiplos modos*, tempo de *setup*, indisponibilidade de recursos e retenção, conforme apresentado na Tabela 13. As duas últimas colunas trazem discussões propostas para variações nas indisponibilidades dos recursos e serão mais detalhadamente explicadas posteriormente.

Outras características de cada uma das instâncias, como o horizonte de tempo, os produtos dos lotes, quais os lotes estão programados para carregamento de

fertilizantes, o horário de disponibilização dos lotes para o terminal e a disponibilidade dos recursos, serão realizadas a partir das explicações a seguir.

Com relação às características do Grupo A, nota-se por meio da Tabela 14 que suas instâncias possuem as seguintes características idênticas: horizonte de tempo (80 unidades de tempo); quantidade e tipos de lotes operados no terminal (3 lotes de soja, 3 lotes de milho e 3 de farelo de soja); programa de carregamento de fertilizante de dois lotes e horário de disponibilização dos lotes para o terminal.

Tabela 14: Características das instâncias do Grupo A

Grupo A	
Horizonte de tempo das instâncias:	80 unidades de tempo
9 lotes operados no terminal:	3 lotes de Soja
	3 lotes de Milho
	3 lotes de Farelo de Soja
Programa de 2 lotes para carregamento de fertilizantes:	1 lote de Soja
	1 lote de Farelo de Soja
Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	Nesse grupo de instâncias de teste, todos os lotes já estavam disponíveis no início do horizonte de planejamento.
Características específicas das instâncias:	
Instância 1:	1 modo de operação: MM1, conforme Tabelas 2, 4 e 6;
	Inexistência de tempo de <i>setup</i> ;
	Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância;
	Sem retenção dos recursos em nenhuma atividade.
Instância 2:	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6;
	Inexistência de tempo de <i>setup</i> ;
	Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância;
	Sem retenção dos recursos em nenhuma atividade.
Instância 3:	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6;
	Tempo de <i>setup</i> padrão de 5 unidades de tempo para preparação dos recursos Moega 1 e Moega 2, entre todas as mudanças de lote;
	Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância;
	Sem retenção dos recursos em nenhuma atividade.
Instância 4:	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6;
	Tempo de <i>setup</i> padrão de 5 unidades de tempo para preparação dos recursos Moega 1 e Moega 2, entre todas as mudanças de lote;
	Indisponibilidade de um dos recursos Locomotiva devido a ausência de mão-de-obra no intervalo de 1 u.t. a 10 u.t.;
	Indisponibilidade do recurso Moega 1 devido a manutenção no intervalo de 11 u.t. a 30 u.t.;
Instância 5:	Sem retenção dos recursos em nenhuma atividade.
	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6;
	Tempo de <i>setup</i> padrão de 5 unidades de tempo para preparação dos recursos Moega 1 e Moega 2, entre todas as mudanças de lote;
	Indisponibilidade de um dos recursos Locomotiva devido a ausência de mão-de-obra no intervalo de 1 u.t. a 10 u.t.;
	Indisponibilidade do recurso Moega 1 devido a manutenção no intervalo de 11 u.t. a 30 u.t.;
Instância 5:	Retenção dos recursos fixos de cada atividade, conforme Tabela 7.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange as características diferentes entre as instâncias do Grupo A, também expostas na Tabela 14, têm-se as seguintes especificidades na Instância 1: modelo de sequenciamento de atividades no terminal sem as características de *múltiplos modos*, sendo apenas um modo possível de operação das atividades; não existência da necessidade de tempo de *setup* em nenhum dos recursos do terminal; disponibilidade plena de todos os recursos durante todo o horizonte de tempo da instância, o que significa que não ocorreu nenhuma alocação de recurso para manutenção ou uma eventual falta de mão de obra; e, por fim, a não existência de retenção em nenhuma atividade. Já na Instância 2, observa-se que ela possui as mesmas características da Instância 1, exceto pelo fato dessa instância já considerar a possibilidade dos terminal operar as atividades por meio de *múltiplos modos*, sendo duas alternativas possíveis, os modos MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.

A Instância 3 possui as mesmas especificidades da Instância 2, com exceção do tempo de *setup*. Com objetivo de evidenciar o tempo de *setup* nesta instância de teste do modelo, o tempo de *setup* foi dimensionado para 5 unidades de tempo entre as atividades Descarga de todos os lotes. A Instância 4 se diferencia da Instância 3 apenas pelo fato de que já ocorre a indisponibilidade de recursos em parte do horizonte de tempo (entrega de recursos para manutenção, por exemplo). Por fim, a Instância 5 reflete as principais contribuições deste modelo matemático, uma vez que somado às características da Instância 4, ainda possui a retenção de alguns recursos das atividades, de acordo com a Tabela 10, que define os recursos fixos desse terminal.

Por meio da Tabela 15, as particularidades das instâncias do Grupo B podem ser observadas. Nela visualizam-se as seguintes características idênticas nas 4 instâncias desse grupo: horizonte de tempo, quantidade e tipos de lotes operados no terminal, programa de carregamento de fertilizante, sendo um lote carregado com farelo de soja e outro com milho, horário de disponibilização dos lotes para o terminal, quantidade e tipos de modos de operação das atividades no terminal e especificidades do tempo de *setup* dos recursos das atividades do terminal e da retenção dos recursos de cada atividade. As distinções entre as instâncias concernem às características da disponibilidade dos recursos.

Tabela 15: Características das instâncias do Grupo B

Grupo B	
Horizonte de tempo das instâncias: 80 unidades de tempo	
9 lotes operados no terminal:	4 lotes de Soja
	3 lotes de Milho
	2 lotes de Farelo de Soja
Programa de 2 lotes para carregamento de fertilizantes:	1 lote de Farelo de Soja
	1 lote de Milho
Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	4 lotes de Soja e 2 lotes de Farelo de Soja: já estavam disponíveis no início do horizonte de planejamento.
	3 lotes de Milho: tempo 3 u.t.
Múltiplos modos:	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.
Tempo de <i>setup</i> :	Tempos de <i>setup</i> conforme definido na Tabela 8.
Retenção:	Retenção dos recursos fixos de cada atividade, conforme Tabela 7.
Características específicas das instâncias:	
Instância 6:	Indisponibilidade de dois recursos Manobreiro devido a um treinamento no intervalo de 21 u.t. a 30 u.t.;
	Indisponibilidade do recurso Moega 2 devido a manutenção no intervalo de 16 u.t. a 20 u.t..
Instância 7:	Disponibilidade plena dos recursos durante todo horizonte de tempo.
Instância 8:	Proposta de indisponibilidade de dois recursos Manobreiro devido a um treinamento por 10 u.t.;
	Indisponibilidade do recurso Moega 2 devido a manutenção no intervalo de 16 u.t. a 20 u.t..
Instância 9:	Proposta de indisponibilidade de dois recursos Manobreiro devido a um treinamento por 10 u.t.;
	Proposta de indisponibilidade do recurso Moega 2 devido a manutenção por 5 u.t..

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Grupo C tem as instâncias discriminadas na Tabela 16. Caracterizado pelas instâncias mais complexas, essas instâncias têm o propósito de testar o modelo matemático proposto a cenários mais robustos que apesar do terminal ter capacidade de operação das mesmas, isso ocorre de forma bastante esporádica. As diferenças entre as instâncias dizem respeito ao horizonte de tempo das mesmas, à quantidade e tipos de lotes operados no terminal, aos lotes programados para carregamento de fertilizantes e ao horário de disponibilização dos lotes para o terminal, conforme explicitado na Tabela 16. As seguintes características são idênticas nas instâncias desse grupo: quantidade e tipos de modos de operação das atividades no terminal, especificidades do tempo de *setup* dos recursos das atividades do terminal e da retenção dos recursos de cada atividade e a disponibilidade de recursos durante todo horizonte de planejamento.

Tabela 16: Características das instâncias do Grupo C

Tabela 10: Características das instâncias do Grupo C		
Múltiplos modos:	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.	
Tempo de <i>setup</i> :	Tempos de <i>setup</i> conforme definido na Tabela 8.	
Retenção:	Retenção dos recursos fixos de cada atividade, conforme Tabela 7.	
Características específicas das instâncias:		
Instância 10:	Horizonte de tempo:	100 unidades de tempo
	12 lotes operados no terminal	6 lotes de Soja
		3 lotes de Farelo de Soja
		3 lotes de Milho
	Programa de 2 lotes para carregamento de fertilizantes:	1 lote de Farelo de Soja
		1 lote de Soja
	Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	3 lotes de Soja e 3 lotes de Farelo de Soja: já disponíveis no início do horizonte de planejamento.
		3 lotes de Milho: tempo 4 u.t.
		3 lote de Soja: tempo 8 u.t.
	Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância;	
Instância 11:	Horizonte de tempo:	120 unidades de tempo
	15 lotes operados no terminal	6 lotes de Soja
		3 lotes de Milho
		6 lote de Farelo de Soja
	Programa de 2 lotes para carregamento de fertilizantes:	1 lote de Farelo de Soja
		1 lote de Soja
	Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	3 lotes de Soja e 3 lotes de Farelo de Soja: já disponíveis no início do horizonte de planejamento.
		3 lotes de Milho: tempo 5 u.t.
		3 lotes de Farelo de Soja: tempo 14 u.t.
		3 lotes de Soja: tempo 22 u.t.
Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância;		
Instância 12:	Horizonte de tempo:	150 unidades de tempo
	18 lotes operados no terminal	9 lotes de Soja
		6 lote de Farelo de Soja
		3 lotes de Milho
	Programa de 3 lotes para carregamento de fertilizantes:	1 lote de Soja
		1 lote de Farelo de Soja
		1 lote de Milho
	Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	3 lotes de Soja e 3 lotes de Farelo de Soja: já disponíveis no início do horizonte de planejamento.
		3 lotes de Milho: tempo 6 u.t.
		3 lotes de Soja: tempo 11 u.t.
3 lotes de Farelo de Soja: tempo 16 u.t.		
3 lotes de Soja: tempo 22 u.t.		
Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância.		

Fonte: Elaborado pelo autor.

As instâncias do Grupo D podem ser observadas na Tabela 17. O objetivo destas duas instâncias é comparar o modelo matemático proposto com situações muito semelhantes a dois períodos de operação de atividades aleatórios que ocorreram no

terminal ferroviário em estudo ao longo do segundo semestre do ano de 2017. Nela visualizam-se as seguintes características idênticas nas Instâncias 13 e 14: horizonte de tempo, quantidade e tipos de modos de operação das atividades no terminal e especificidades do tempo de *setup* dos recursos das atividades do terminal e da retenção dos recursos de cada atividade. As diferenças entre as instâncias dizem respeito à quantidade e tipos de lotes operados no terminal, os lotes programados para carregamento de fertilizantes, o horário de disponibilização dos lotes para o terminal e a disponibilidade dos recursos, conforme explicitado na Tabela 17.

Tabela 17: Características das instâncias do Grupo D

Grupo D (Real)		
Horizonte de tempo das instâncias: 80 unidades de tempo		
Múltiplos modos:	2 modos de operação: MM1 e MM2, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.	
Tempo de <i>setup</i> :	Tempos de <i>setup</i> conforme definido na Tabela 8.	
Retenção:	Retenção dos recursos fixos de cada atividade, conforme Tabela 7.	
Características específicas das instâncias:		
Instância 13:	7 lotes operados no terminal	3 lotes de Soja 4 lotes de Milho
	Programa de 2 lotes para carregamento de fertilizantes:	2 lotes de Soja
		3 lotes de Soja: tempo 1 u.t.
	Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	3 lotes de Milho: tempo 23 u.t.
		1 lote de Milho: tempo 34 u.t.
	Recursos completos em todo horizonte de tempo da instância;	
	9 lotes operados no terminal	6 lotes de Soja 2 lotes de Milho 1 lote de Farelo de Soja
	Programa de 2 lotes para carregamento de fertilizantes:	2 lotes de Soja
		3 lotes de Soja: tempo 12 u.t.
	Horário de disponibilização dos lotes para o terminal:	3 lotes de Soja: tempo 22 u.t. 2 lotes de Milho e 1 lote de Farelo de Soja: tempo 22 u.t.
Indisponibilidade dos recursos Estrutura Limpeza e Estrutura Fertilizantes devido a uma manutenção na chave de acesso à esses locais no intervalo de 18 u.t. a 23 u.t..		

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto nessa dissertação considera diversos recursos com quantidades limitadas na programação das atividades, inclui *múltiplos modos* de execução dessas atividades e insere a possibilidade de retenção dos recursos até o início da atividade seguinte. O modelo foi denominado Problema de Sequenciamento de Atividades com Restrição de Recursos em Múltiplos Modos com Retenção (MRCPSP-R). Tem como característica, também, a possibilidade de tratar a indisponibilidade de recursos ao longo do horizonte do tempo (manutenção, falta de equipes, entre outros) e considera tempo de *setup*. A introdução do horário solicitado de início para cada lote pelo profissional responsável pelo planejamento das atividades no terminal garante que a atividade não comece antes da chegada do lote no terminal. A função objetivo (FO) minimiza a somatória das estadias dos lotes de vagões no terminal.

Assim, cada lote de vagão pode ser visto como uma matéria prima que deve passar por um conjunto de atividades, em uma ordem específica (descarregamento, manobras, carregamento, inspeções, testes, etc.), que demanda cada uma, um conjunto de recursos (locomotivas, manobreiros, áreas de limpeza e terminais de descarga e carregamento) para sua transformação, isto é, o lote passa por operações para que ele passe de um lote de vagões carregados, para um lote de vagões vazios ou de um lote de vagões carregados, para um lote de vagões carregados com outro produto.

Muitos desses recursos são demandados por diversas atividades ao mesmo tempo, havendo um conflito para disponibilizá-los, o que pode vir a gerar atrasos para realização de alguma atividade e, conseqüentemente, para o lote de vagão. No caso estudado pelo modelo, além dessa concorrência, há o fato das atividades terem que seguir uma sequência de processamento definida. Desta forma, há uma matriz de atividades predecessoras e uma de atividades sucessoras.

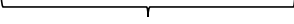
No que tange o tempo de *setup*, conforme já explicado no Capítulo 4, nesse modelo essa característica só é aplicável na atividade Descarga. Isso ocorre, pois os recursos Moega 1 e Moega 2 necessitam de passar por uma limpeza e preparação quando ocorre a troca de produtos descarregados.

Visando implantar a característica de retenção em apenas alguns dos recursos demandados em cada atividade, foi incluída no modelo matemático a divisão de cada atividade em duas subatividades, sendo uma delas aquela que demanda apenas os recursos móveis e a outra apenas os recursos fixos. Para que essa divisão não acarretasse impacto no sequenciamento das atividades, foram inseridas no modelo matemático restrições que garantissem o início e fim concomitante destas duas subatividades e a realização das mesmas em um mesmo modo de operação. Assim, viabilizou-se a implantação das restrições de retenção apenas nas subatividades que possuíam os recursos fixos.

Com o objetivo de ilustrar o método de planejamento das atividades ao longo do horizonte de tempo do MRCPSP-R foi realizado o exemplo que pode ser visto na Figura 10. A Atividade 1, no modo 1, teve como planejamento terminar sua operação no tempo 6. Desta forma o valor da variável $x_{1,1,6}$ da atividade 1 será 1 no tempo 6 e 0 nos outros tempos (Figura 10). A duração da atividade e consequente tempo de demanda dos recursos necessários para sua operação é de 3 unidades de tempo, alocados a partir do tempo final, contando o intervalo de tempo 6 e mais os intervalos 5 e 4, completando então as 3 unidades de tempo necessários.

Figura 10: Exemplo do planejamento da atividade segundo o MRCPSP-R

Horizonte de tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Atividade 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0



 $op = 3$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando nl , o número de lotes, na , o número de atividades, nt , o número de tempos discretizados, i.e., o horizonte de planejamento, e nm o número de modos de processamento, o modelo é apresentado a seguir em cinco partes, a saber: os conjuntos, os parâmetros, as variáveis, a função objetivo e as restrições.

Os conjuntos do modelo matemático são:

L : conjunto de lotes operados no terminal, sendo $L \in \{1, \dots, nl\}$;

A : conjunto de atividades, sendo $A \in \{1, \dots, na\}$;

A^l : conjunto de atividades do lote $l \in L$;

T : conjunto de períodos de tempo, sendo $T \in \{1, \dots, nt\}$;

R : conjunto de recursos, sendo $R \in \{1, \dots, nr\}$;

M : conjunto de modos de operação, sendo $M \in \{1, \dots, nm\}$.

Os parâmetros do modelo matemático são:

pa_l : primeira atividade do lote $l \in L$;

ua_l : última atividade do lote $l \in L$;

$op_{m,a}$: tempo de operação da atividade $a \in A$ no modo $m \in M$;

$rd_{r,t}$: disponibilidade do recurso $r \in R$ no tempo $t \in T$;

$rn_{m,a,r}$: quantidade do recurso $r \in R$ necessária para realização da atividade $a \in A$ no modo $m \in M$;

td_a : momento mais cedo que a atividade $a \in A$ pode iniciar, i.e., momento que o lote está disponível para operação no terminal;

rr_a : define se há retenção dos recursos na atividade $a \in A$, sendo 1 se há retenção e 0, caso contrário;

$ap_{a,h}$: define as predecessoras da atividade $a \in A$, assumindo o valor 1 se a atividade $h \in A$ deve ser predecessora de $a \in A$ e 0, caso contrário;

$as_{a,h}$: define as sucessoras da atividade $a \in A$, assumindo o valor 1 se a atividade $h \in A$ deve ser sucessora de $a \in A$ e 0, caso contrário;

$st_{a,m,h,n}$: assume valor 1 se houver tempo de *setup* entre a atividade $a \in A$ no modo $m \in M$ e a atividade $h \in A$ no modo $n \in M$ e 0, caso contrário;

$ss_{a,h}$: assume valor 1 se a atividade $a \in A$ deve começar no mesmo momento que a atividade $h \in A$ e 0, caso contrário.

As variáveis de decisão do modelo matemático são:

$x_{a,m,t}$: assume valor 1 se a atividade $a \in A$ no modo $m \in M$ termina no instante $t \in T$ e 0, caso contrário;

$w_{a,m,t}$: assume valor 1 se a atividade $a \in A$ no modo $m \in M$ inicia no instante $t \in T$ e 0, caso contrário;

$y_{a,m,t}$: assume valor 1 nos tempos anteriores, $t \in T$, iniciando no tempo 1 ao tempo de início da atividade $a \in A$ no modo $m \in M$ e 0, caso contrário;

$z_{a,m,t}$: assume valor 1 nos tempos, $t \in T$, iniciando no tempo 1, até o tempo de término da atividade $a \in A$ no modo $m \in M$ e 0, caso contrário;

$u_{a,m,t}$: assume valor 1 se a variável de decisão $y_{h,m,t}$ for igual a 1, sendo h a atividade sucessora de a , $as_{a,h} = 1$, e a atividade a considera a retenção dos recursos até o momento anterior ao início da sua atividade sucessora, $rr_a = 1$, e a variável de decisão $z_{a,m,t}$ for igual a 0, caso contrário assume o valor 0.

Para explicar as variáveis de decisão $x_{a,m,t}$, $w_{a,m,t}$, $y_{a,m,t}$ e $z_{a,m,t}$, observa-se na Figura 11 uma situação hipotética em que uma atividade, denominada Atividade 1, no modo 1, possui tempo de operação de 3 unidades de tempo, e que será realizada nos tempos de 4 a 6. Portanto, o valor da variável de decisão $x_{1,1,6}$ dessa atividade será 1 de tempo 6, e 0 nos demais tempos. O valor de $w_{1,1,4}$ será 1 no tempo 4, e 0 nos demais tempos. O valor de $y_{a,m,t}$ será de 1 nos tempos anteriores ao início da atividade, portanto terão o valor 1 nos tempos 1 a 3, e 0 nos demais tempos. O valor de $z_{a,m,t}$ será de 1 nos tempos até o término da atividade, portanto terão o valor 1 os tempos 1 a 6, e 0 nos demais tempos.

Figura 11: Exemplo dos valores assumidos pelas variáveis de decisão $x_{a,m,t}$, $w_{a,m,t}$, $y_{a,m,t}$ e $z_{a,m,t}$

Horizonte de tempo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Atividade 1 (modo 1)	$x_{a,m,t}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	$w_{a,m,t}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$y_{a,m,t}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$z_{a,m,t}$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de ilustrar a variável de decisão $u_{a,m,t}$ é necessária a identificação do momento em que uma atividade sucessora à atividade 1 da Figura 11 foi iniciada e que a Atividade 1 possui recursos fixos, ou seja, há retenção ($rr_1 = 1$). Para tal, observa-se a Figura 12, em que mais uma situação hipotética é exemplificada. Nela, além da Atividade 1 da Figura 11, foi inserida uma atividade denominada Atividade 2 que é sucessora a Atividade 1, portando $ap_{1,2} = 1$. Como visto anteriormente, esta atividade tem $x_{1,1,6} = 1$ e $w_{1,1,4} = 1$. A Atividade 2 possui tempo de operação de 2 unidades de tempo e será realizada nos tempos 10 e 11. A Atividade 1 é realizada no modo 1 e a Atividade 2 pode ser realizada no modo 1 ou no modo 2.

Portanto, o valor de $x_{1,1,11}$ da atividade 2 será 1 no tempo 11, o valor de $w_{1,1,10}$ será 1 no tempo 10, o valor de $y_{a,m,t}$ será de 1 nos tempos anteriores ao início da atividade, portanto, terão o valor 1 os tempos de 1 a 9 e o valor de $z_{a,m,t}$ será de 1 nos tempos até o término da atividade, portanto, terão o valor 1 os tempos de 1 a 11. Já o valor da variável de decisão $u_{a,m,t}$ da Atividade 1 será 1 nos tempos em que o valor da variável de decisão $y_{2,m,t}$ da Atividade 2 for igual a 1 (marcados com a cor azul na Figura 12) e o valor da variável de decisão $z_{1,1,t}$ da Atividade 1 for igual a 0 (marcados com a cor amarela na Figura 12). Esta situação ocorre nos tempos 7, 8 e 9, marcados pela cor verde na Figura 12.

Figura 12: Exemplo das variáveis de decisão $x_{a,m,t}$, $w_{a,m,t}$, $y_{a,m,t}$, $z_{a,m,t}$ e $u_{a,m,t}$

Horizonte de tempo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Atividade 1 (modo 1)	$x_{1,1,t}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	$w_{1,1,t}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$y_{1,1,t}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$z_{1,1,t}$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	$u_{1,1,t}$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
Atividade 2 (modo 1 ou modo 2)	$x_{2,m,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	$w_{2,m,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	$y_{2,m,t}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	$z_{2,m,t}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir serão apresentadas a FO e as restrições do modelo proposto. As restrições (7) a (12) foram expressas como restrições lógicas do CPLEX (IBM, 2017).

Função Objetivo

$$\text{Minimizar } \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} (t - td_{pa_l}) x_{ua_l, m, t} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{a, m, t} = 1 \quad \forall a \in A \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{\substack{t \in T \\ t < td_a + op_{m, a}}} x_{a, m, t} = 0 \quad \forall a \in A \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m \in M} \sum_{\substack{t \in T \\ t \geq (td_h + op_{m, h})}} t x_{h, m, t} \\ \leq \sum_{m \in M} \sum_{\substack{t \in T \\ t \geq (td_a + op_{m, a})}} (t - op_{m, a}) x_{a, m, t} \end{aligned} \quad \forall a, h \in A \mid ap_{a, h} = 1 \quad (4)$$

$$w_{a, m, t} = 0 \quad \forall a \in A, t \in T, m \in M \mid (5)$$

$$\begin{aligned} t &\geq (nt - op_{m, a} + 2) \\ x_{a, m, t} &= w_{a, m, (t - op_{m, a} + 1)} \end{aligned} \quad \forall a \in A, t \in T, m \in M \mid t \geq op_{m, a} \quad (6)$$

$$\left(\sum_{\substack{b \in T \\ (op_{m, h} \geq 1) E (b \leq 79) E \\ (b \geq td_h) E (b \geq t)}} w_{h, n, b+1} = 1 \right) \Rightarrow (y_{h, n, t} = 1) \quad \forall h \in A, t \in T, n \in M \quad (7)$$

$$\left(\sum_{\substack{b \in T \\ (op_{m, h} \geq 1) E (b \leq 79) E \\ (b \geq td_h) E (b \geq t)}} w_{h, n, b+1} = 0 \right) \Rightarrow (y_{h, n, t} = 0) \quad \forall h \in A, t \in T, n \in M \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\sum_{\substack{b \in T \\ (op_{m,a} \geq 1) \wedge (b \geq td_a) \wedge (b \geq t)}} x_{a,m,b} = 1 \right) \Rightarrow (z_{a,m,t} = 1) \\
 & \forall a \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid rr_a = 1 \wedge as_{a,h} = 1
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\sum_{\substack{b \in T \\ (op_{m,a} \geq 1) \wedge (b \geq td_a) \wedge (b \geq t)}} x_{a,m,b} = 0 \right) \Rightarrow (z_{a,m,t} = 0) \\
 & \forall a \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid rr_a = 1 \wedge as_{a,h} = 1
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\left(\sum_{n \in M} y_{h,n,t} \right) - z_{a,m,t} + \sum_{b \in T} x_{a,m,b} = 2 \right) \Rightarrow (u_{a,m,t} = 1) \\
 & \forall a, h \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid rr_a = 1 \wedge as_{a,h} = 1
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\left(\sum_{n \in M} y_{h,n,t} \right) - z_{a,m,t} + \sum_{b \in T} x_{a,m,b} \neq 2 \right) \Rightarrow (u_{a,m,t} = 0) \\
 & \forall a, h \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid rr_a = 1 \wedge as_{a,h} = 1
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 & u_{a,m,t} = 0 \\
 & \forall a \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid rr_a = 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & w_{a,m,t} = w_{h,m,t} \\
 & \forall a, h \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid ss_{a,h} = 1
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 & x_{a,m,t} = x_{h,m,t} \\
 & \forall a, h \in A, t \in T, \\
 & m \in M \mid ss_{a,h} = 1
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} rn_{m,a,r} \sum_{\substack{b \in T \\ (b \geq t) \wedge (b \leq (t + op_{m,a} - 1))}} x_{a,m,b} \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{a \in A \mid rr_a = 1} rn_{m,a,r} u_{a,m,t} \leq rd_{r,t} \\
 & \forall r \in R, t \in T
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$x_{a,m,t} + \sum_{\substack{b \in T \\ (b \geq t) \wedge \\ (b \leq (t + st_{a,m,h,n} + op_{n,h} - 1))}} x_{h,n,b} \leq 1 \quad \forall a, h \in A, t \in T, \\ m, n \in M \quad | \quad st_{a,m,h,n} \geq 1 \quad (17)$$

$$x_{a,m,t}, w_{a,m,t}, u_{a,m,t}, y_{a,m,t}, z_{a,m,t} \in \{0,1\} \quad \forall a \in A, t \in T, m \in M \quad (18)$$

A função objetivo, Equação (1), que deve ser minimizada, representa a soma da diferença entre o término do processamento da última atividade do lote no terminal, menos o momento que o lote é disponibilizado para o terminal, representando o tempo de permanência do lote no terminal. As Restrições (2) asseguram que cada atividade é realizada apenas uma vez e as Restrições (3) asseguram que a atividade não terá início antes do horário solicitado. As relações de precedência estão definidas nas Restrições (4). As Restrições (5) asseguram que a atividade terminará antes do horizonte de tempo disponível. As Restrições (6) determinam o momento de início da atividade a partir do momento de término.

Antes de definir as restrições seguintes, uma importante nota é necessária. As Restrições (7) a (12) utilizam a notação matemática $\Rightarrow$. Essa notação é utilizada pelo solver IBM® ILOG® CPLEX® Versão 12.6 para representar no modelo matemático proposto uma restrição lógica com a função de implicação (IBM, 2017). Ou seja, utilizando esta notação, uma vez que uma restrição lógica é atendida, ela implica um valor específico em uma variável de decisão. Estas restrições foram inseridas no modelo matemático com o objetivo de assegurar a ocupação dos recursos após o término da subatividade de recursos fixos, isto é, nas situações em que a retenção é necessária.

Assim, as Restrições (7) e (8) definem os valores das variáveis de decisão $y_{a,m,t}$, que, conforme Figura 11, asseguram que os tempos anteriores ao início da atividade tenham valor igual a 1, e 0 nos demais tempos. As Restrições (9) e (10) definem os valores das variáveis de decisão $z_{a,m,t}$, que asseguram que os tempos até o término da atividade tenham valor 1, e 0 nos demais tempos, de acordo com a Figura 11. Essas quatro Restrições foram inseridas para servirem de base para a implantação

das Restrições (11) e (12), que definem os valores das variáveis de decisão $u_{a,m,t}$, que asseguram que os recursos continuem ocupados após o término de operação da atividade. Para tanto, foi necessário além da subtração do somatório do valor de $y_{h,n,t}$ da atividade sucessora menos o $z_{a,m,t}$ da atividade atual, incluir o somatório do valor de $x_{a,m,b}$, para que o modelo levasse em consideração que a variável de decisão $z_{a,m,t}$ estivesse no mesmo modo m da variável $x_{a,m,b}$, ou seja, no modo que a atividade a será realizada.

As Restrições (13) asseguram a retenção apenas às atividades com recursos fixos. As Restrições (14) e (15) asseguram o início e término concomitantes das duas subatividades que compõem cada atividade. As restrições relativas aos recursos disponíveis são dadas pelas Restrições (16). As Restrições (17) asseguram o acréscimo do tempo de setup em uma atividade em função da sua atividade sucessora. As Restrições (18) definem o domínio das variáveis de decisão.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o solver IBM® ILOG® CPLEX® Versão 12.6 em um computador com processador Intel® i7 com 16 GB de memória RAM. Foi definido um tempo limite para execução do CPLEX igual a 79.200 segundos, equivalente a 22 horas.

Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 18, discriminados pelos grupos e suas respectivas instâncias. A terceira coluna apresenta o Tempo de Execução do modelo matemático para obtenção do resultado da instância. Na quarta coluna pode ser vista a diferença (GAP) entre o resultado alcançado pelo modelo matemático e o resultado ótimo. Nessa coluna, só haverá um valor diferente de 0,00% nas instâncias em que a solução ótima não foi alcançada. A quinta coluna apresenta o resultado obtido pelo CPLEX para a função objetivo e as sexta e sétima colunas (siglas UB e LB) apresentam, respectivamente, os valores de *lower bound* e *upper bound* para as instâncias que o CPLEX não encontrou solução ótima.

Tabela 18: Resultados Encontrados pelo CPLEX

Grupo	Instância	Tempo de Execução (segundos)	GAP (%)	Função Objetivo (ut)	UB (ut)	LB (ut)
A	1	76	0,00	350	-	-
	2	105	0,00	255	-	-
	3	74	0,00	331	-	-
	4	81	0,00	390	-	-
	5	409	0,00	390	-	-
B	6	1.933	0,00	268	-	-
	7	8.915	0,00	252	-	-
	8	1.474	0,00	260	-	-
	9	5.335	0,00	252	-	-
C	10	79.200	4,58	367	367	350,2
	11	79.200	17,94	521	521	427,5
	12	79.200	16,95	726	726	602,9
D	13	74	0,00	168	-	-
	14	656	0,00	209	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 18, observa-se que foram encontradas soluções ótimas para onze das quinze instâncias testadas, não sendo obtidas soluções ótimas apenas para as instâncias mais complexas (Grupo C – instâncias 10 a 12). O resultado de cada uma dessas instâncias será discutido a seguir.

A fim de que a análise dos resultados fosse realizada de forma mais completa, foi elaborado um Gráfico de *Gantt* (Figura 13) para que o planejamento das atividades ao longo do tempo fosse apresentado. Ferramenta utilizada para o planejamento de atividades, o Gráfico de *Gantt* proporciona uma representação visual simples do que deveria estar acontecendo na operação, bem como pode ser usado para testar programas alternativos (SLACK *et al.*, 2009).

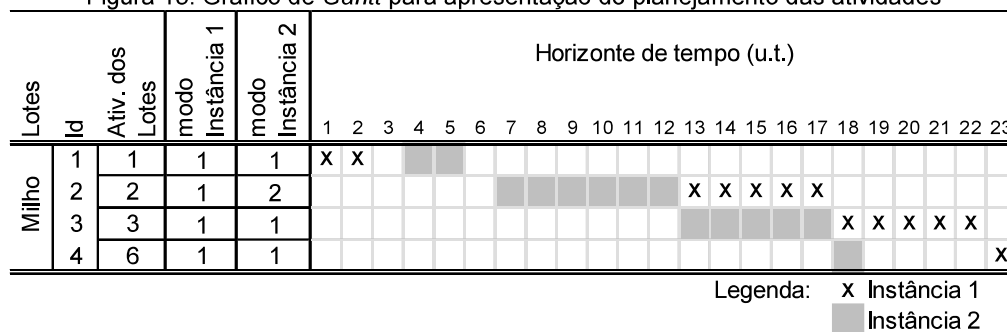
Na primeira coluna do gráfico apresentado na Figura 13, pode-se identificar que o lote que está sendo operado no terminal é um lote carregado com o produto Milho. Nesse exemplo, não há programa de carregamento de fertilizantes, pois o lote só tem programação de realizar 4 atividades no terminal (atividades 1, 2, 3 e 6), conforme coluna 3 (Ativ. dos lotes). A coluna 2 (Id) é uma coluna para identificação da linha. As colunas de 4 e 5 referem-se aos modos em que a operação no terminal está sendo realizada em cada uma das instâncias (sendo 1 o modo MM1 e 2 o modo MM2). As colunas seguintes apresentam a distribuição das atividades no horizonte de tempo da instância. Importante destacar que as atividades da Instância 1 estão distribuídas conforme marcação **x** e as atividades da Instância 2 com preenchimento em cinza.

Portanto, conforme apresentado na Figura 13, a atividade 1 do lote de Milho em operação no terminal ferroviário em estudo na Instância 1 é planejada no modo MM1, termina no tempo 2 e tem duração de 2 tempos. Por isso, a distribuição no horizonte de tempo, identificado com a marcação **x**, fica com a realização planejada nos tempos 1 e 2. As demais atividades realizadas na Instância 1 também foram planejadas no modo de operação MM1, sendo a atividade 2 planejada nos tempos de 13 a 17, a atividade 3 planejada nos tempos 18 a 22 e a atividade 6 planejada no tempo 23 (1 tempo).

Já com relação ao planejamento das atividades no terminal ferroviário na Instância 2, apresentado na Figura 13 com preenchimento em cinza, a atividade 1 foi planejada no modo MM1 nos tempos 4 e 5. Por sua vez, a atividade 2 da Instância 2 foi planejada no modo MM2 nos tempos 7 a 12. Nota-se que neste exemplo, a atividade 2 no modo de operação MM1 tem duração de 5 tempos enquanto no modo de operação MM2 tem duração de 6 tempos. A atividade 3 da Instância 2 foi

planejada no modo MM1 nos tempos 13 a 17. Por fim, a atividade 6 foi planejada no modo MM1 no tempo 18 (duração de 1 tempo).

Figura 13: Gráfico de *Gantt* para apresentação do planejamento das atividades



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de melhorar a visualização do planejamento das atividades, os nomes dos lotes presentes na primeira coluna podem se abreviados da seguinte maneira: lotes de soja (S), lotes de soja com carregamento de fertilizantes (S*), lotes de milho (M), lotes de milho com carregamento de fertilizantes (M*), lotes de farelo de soja (F) e lotes de farelo de soja com carregamento de fertilizantes (F*). Essa nomenclatura será utilizada nos Gráficos de *Gantt* das figuras a seguir.

6.1 RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO A

Conforme descrito no Capítulo 4 dessa dissertação, as instâncias do Grupo A foram criadas para avaliar as contribuições específicas dessa dissertação: *múltiplos modos*, tempo de setup, indisponibilidade de recursos e retenção. Assim sendo, foram feitas as seguintes avaliações:

- 1) Instâncias 1 e 2 foram utilizadas para avaliar os possíveis ganhos da possibilidade de utilização de *múltiplos modos*;
- 2) Instâncias 2 e 3 foram utilizadas para avaliar o impacto do tempo de setup no planejamento das atividades;
- 3) Instâncias 3 e 4 serviram para avaliar o impacto da indisponibilidade de recursos ao longo do tempo (manutenção, ausência de empregados, etc.);
- 4) Instâncias 4 e 5 tiveram como objetivo avaliar o impacto da retenção de recursos fixos.

Conforme apresentado no Capítulo 4, a Instância 1 é uma instância que não considera nenhuma das características propostas nessa dissertação. Em contrapartida, a Instância 5 contempla todas as características propostas nessa dissertação.

Para comparar a Instância 1 (Inst. 1) com a Instância 2 (Inst. 2), foi elaborado um Gráfico de *Gantt*, Apêndice A, que tem a representação do planejamento das atividades de ambas instâncias ao longo do horizonte de tempo. Desse gráfico, destaca-se na Figura 14 o planejamento das atividades Descarga (Atividade 2) dos lotes de cada uma das instâncias, ressaltando que a funcionalidade de *múltiplos modos* pode ocorrer em qualquer atividade de todos lotes na Instância 2.

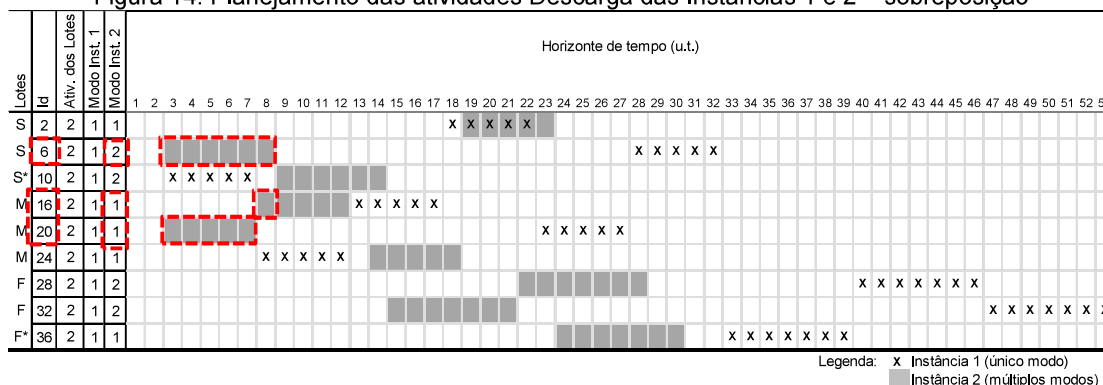
Na Instância 1, com base na Tabela 1 e 6, a atividade Descarga pode ser realizada somente no modo MM1 que utiliza o recurso Moega 1, sendo que há apenas um recurso Moega 1. Já na Instância 2, há a possibilidade da atividade Descarga ser realizada nos modos MM1 e MM2, sendo que no modo MM1 ela utiliza o recurso Moega 1 e no modo MM2, utiliza o recurso Moega 2. Dessa forma, na Instância 2, duas atividades podem ser realizadas ao mesmo tempo, desde que em modos diferentes.

Assim sendo, na Figura 14, pode-se perceber que a utilização de *múltiplos modos*, Instância 2, permitiu no intervalo de tempo 3 a 7 que duas atividades, 6 e 20, fossem realizadas no mesmo tempo. No tempo 8, parte da atividade 6 e parte da atividade 16 também são realizadas concomitantemente. Além dessas, na Figura 14 outras situações similares podem ser visualizadas no planejamento das atividades da Instância 2. Essa situação apresentada pode levar a uma redução do tempo total de atendimento de todas as atividades de todos os lotes. No caso específico da comparação entre a Instância 1 e a Instância 2, a possibilidade de *múltiplos modos* levou a uma FO na Instância 2 com valor de 255 e na Instância 1 com valor de 350, refletindo em um ganho de 95 u.t. de estadia dos lotes (Tabela 18).

Importante ressaltar que as atividades da Instância 1 estão distribuídas conforme marcação **x** (único modo) e as atividades da Instância 2 (múltiplos modos) com preenchimento em cinza. Portanto, os tempos 19 a 22 no Id 2 na Figura 14 não se trata de uma sobreposição de atividades, uma vez que se referem à planejamentos

de atividades de instâncias diferentes, que foram colocadas no mesmo Gráfico de *Gantt* a fim de ilustrar a comparação entre eles.

Figura 14: Planejamento das atividades Descarga das Instâncias 1 e 2 – sobreposição



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo as discussões, a segunda comparação é entre as Instâncias 2 e 3, com o intuito de analisar a influência do tempo de *setup*, sendo que, no caso do terminal ferroviário, ele ocorre entre as atividades Descarga dos lotes operados no terminal. Essa característica está presente apenas na Instância 3. O Gráfico de *Gantt* de ambas se encontra no Apêndice B.

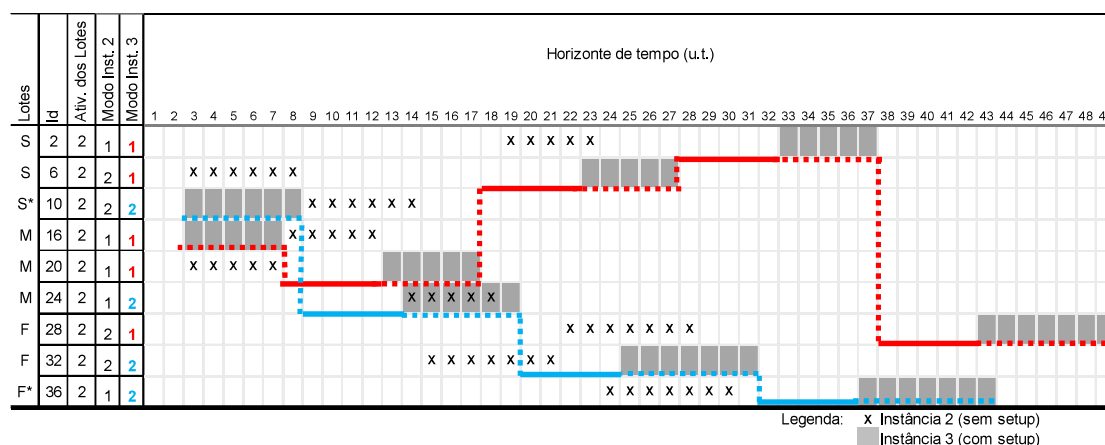
Na Figura 15, pode-se perceber que as atividades da Instância 2, por não possuírem tempo de *setup*, podem começar imediatamente após o término de sua sucessora no mesmo modo em que ela está sendo operada. Esse fato pode ser verificado entre a atividade 6, que termina no tempo 8, e a atividade 10, que inicia no tempo 9.

É possível verificar na Figura 15 as sequências das atividades realizadas no modo 1, linha vermelha, e no modo 2, linha azul, da Instância 3. As partes contínuas da linha vermelha representam o tempo de *setup* no modo 1 e as linhas contínuas em azul representam o tempo de *setup* no modo 2. Pode-se então perceber que o tempo de *setup*, por agregar um tempo adicional a operação da atividade, leva a um tempo maior de operação dos lotes, quando comparado com a Instância 2, que não considera o tempo de *setup*.

O resultado da FO para as duas instâncias reflete o impacto do tempo de *setup* no planejamento das atividades, uma vez que, conforme Tabela 18, a Instância 2 teve como resultado da FO o valor de 255 u.t. de estadia para o planejamento das

atividades dos 9 lotes operados no terminal, enquanto a Instância 3 teve como resultado da FO o valor de 331 u.t., refletindo um acréscimo de 76 u.t. de estadia dos lotes.

Figura 15: Planejamento das atividades Descarga das Instâncias 2 e 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir deste ponto, faz-se uma comparação entre as Instâncias 3 e 4, com o objetivo de analisar a contribuição da indisponibilidade de recursos ao longo do tempo (manutenção de recurso, ausência de empregados, entre outros), presente apenas na Instância 4. As Figuras 16 e 17 apresentam o Gráfico de *Gantt* parcial das Instâncias 3 e 4 e o Apêndice C apresenta o gráfico completo.

Para análise comparativa do impacto da indisponibilidade do recurso Locomotiva, utilizou-se a parte inferior da Figura 16 onde são apresentados para as duas instâncias a quantidade de recursos disponíveis e a quantidade de recursos utilizados. Pode-se perceber que para a Instância 3 havia 4 recursos Locomotiva disponíveis e para a Instância 4 havia 3 recursos Locomotiva disponíveis no período de tempo entre 1 e 10. Analisando o intervalo de tempo entre 1 e 3 é possível perceber que na Instância 3 foram utilizados 4 recursos, o que permitiu realizar as atividades 9, 15, 19 e 35, enquanto na Instância 4, por ter uma indisponibilidade de 1 recurso Locomotiva, ficando com 3 recursos Locomotiva disponíveis, foi possível realizar as atividades 5, 15 e 31, ou seja, uma atividade a menos.

Figura 16: Planejamento das atividades das Instâncias 3 e 4 nos tempos de 1 a 10

Lotes	Id	Ativ. dos Lotes	Modo Inst. 3	Modo Inst. 4	Horizonte de tempo (u.t.)									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	1	1	2	1										x
	2	2	1	1										
	3	3	2	1										
	4	6	1	1										
S	5	1	1	1								x	x	
	6	2	1	1										
	7	3	1	2										
	8	6	1	1										
S*	9	1	1	1	x	x								
	10	2	2	2			x	x	x	x	x	x		
	11	3	2	1									x	x
	12	4	2	2										
M	13	5	1	1										
	14	6	1	1										
	15	1	1	1	x	x								
	16	2	1	2			x	x	x	x	x			
M	17	3	1	2								x	x	x
	18	6	1	1										
	19	1	2	1	x	x	x							
	20	2	1	2										
M	21	3	2	1										
	22	6	1	1										
	23	1	1	2					x	x				
	24	2	2	1										
F	25	3	2	1										
	26	6	1	1										
	27	1	2	2										
	28	2	1	1										
F*	29	3	1	1										
	30	6	1	1										
	31	1	1	1										
	32	2	2	2										
F*	33	3	1	1										
	34	6	1	1										
	35	1	2	1	x	x	x							
	36	2	2	2										
F*	37	3	1	1										
	38	4	2	2										
	39	5	1	1										
	40	6	1	1										

Recursos Locomotiva														
Inst. 3	Disponível	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Utilizado	4	4	4	2	3	3	2	3	3	3	3	3	3
Inst. 4	Disponível	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Utilizado	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3

Legenda:

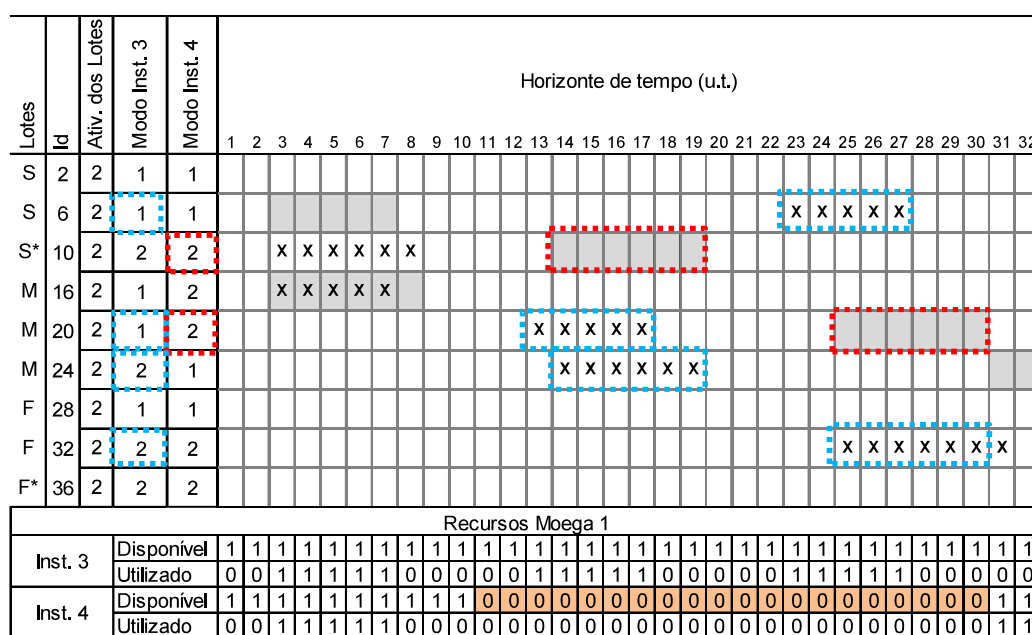
x Instância 3 (disponibilidade total recursos)

■ Instância 4 (Indisponibilidade parcial recursos)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para análise comparativa do impacto da indisponibilidade do recurso Moega 1, utilizou-se a parte inferior da Figura 17 onde são apresentados para as duas instâncias a quantidade de recursos disponíveis e a quantidade de recursos utilizados. Pode-se perceber que para a Instância 3 havia 1 recurso Moega 1 disponível e para a Instância 4 não havia recurso Moega 1 disponível entre o tempo 11 e 30 (destacados em laranja). Analisando esse intervalo de tempo é possível perceber que na Instância 3 foi possível realizar 3 atividades Descarga completas, atividades 6, 20 e 24, e uma atividade parcialmente, atividade 32, em dois modos, utilizando os recursos Moega 1 e Moega 2. A Instância 4 conseguiu realizar 2 atividades Descarga completas, atividades 10 e 20, em um único modo, utilizando o recurso Moega 2, tendo em vista a indisponibilidade do recurso Moega 1.

Figura 17: Planejamento das atividades Descarga das Instâncias 3 e 4 nos tempos de 11 a 30



Legenda:

x Instância 3 (disponibilidade total recursos)

■ Instância 4 (Indisponibilidade parcial recursos)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da FO, de acordo com a Tabela 18, mostra o impacto da indisponibilidade dos recursos Locomotiva e Moega 1 ao longo do tempo na estadia dos lotes no terminal para as duas instâncias. A FO da Instância 3, com disponibilidade total de recursos ao longo do tempo, foi de 331 u.t., enquanto a

Instância 4, que teve parcialmente alguns recursos indisponíveis ao longo do tempo, teve sua FO igual a 390 u.t., refletindo um acréscimo de 59 u.t. na estadia dos lotes.

Para finalizar as discussões a respeito das contribuições específicas dessa dissertação, por meio das instâncias do Grupo A, faz-se uma comparação entre as Instâncias 4 e 5, com o intuito de analisar a influência da retenção dos recursos para o planejamento de atividades em um terminal ferroviário, sendo essa característica presente apenas na Instância 5.

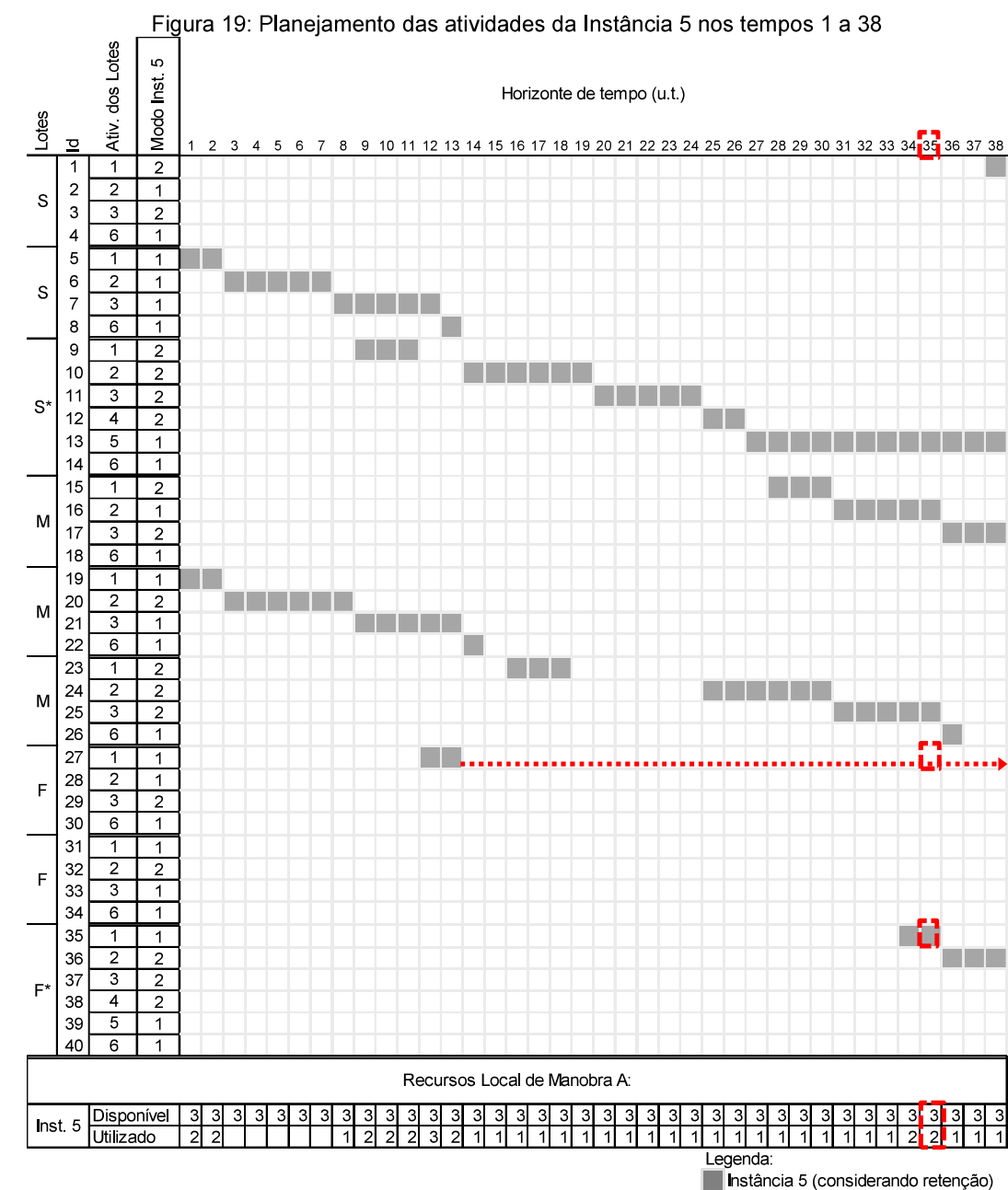
Para avaliar o impacto da retenção de recursos no planejamento das atividades do terminal, utilizou-se o recurso Local de Manobra A para as análises no período de tempo entre 1 e 38. Assim, é apresentada para a Instância 4 a quantidade de recursos disponíveis e a quantidade de recursos necessários na parte inferior da Figura 18.

Na Figura 18, as linhas tracejadas em azul representam o período que na prática o recurso deveria ficar alocado para a atividade em função de não poder ir para sua atividade sucessora. No entanto, a Instância 4, por não considerar a retenção, disponibiliza o recurso imediatamente após o término da atividade para a utilização em outra atividade. Somando-se a quantidade de recursos utilizados na Instância 4 mais o que deveria ter sido retido, representados pela linha tracejada azul, pode-se perceber que na Instância 4 havia 3 recursos Local de Manobra A disponíveis e se somados os recursos utilizados mais os recursos que deveriam ficar retidos, seriam necessários mais de 3 recursos (destacados em laranja), nos períodos de tempo 12 a 13, 16 a 24 e 31 a 35. Essa situação é exemplificada por meio da soma dos recursos Local de Manobra A necessários no tempo 13 (Figura 18). A atividade 9 utiliza o recurso Local de Manobra A para a atividade Manobra Recepção. Já nas atividades 19, 31 e 35, o recurso Local de Manobra A deveria ter sido retido, pois a atividade sucessora do lote ainda não havia sido realizada.

Assim sendo, a Instância 4 por não considerar a retenção gera um planejamento das atividades incorreto, não podendo ser utilizado na prática.

recursos utilizados. Já na Instância 5, havia os mesmos 3 recursos disponíveis, e pode ser visto, que foram utilizados no máximo os 3 recursos disponíveis.

Na Figura 19, as linhas tracejadas em vermelho representam o período que o recurso fica alocado para a atividade em função de não poder ir para sua atividade sucessora. Assim, somando-se a quantidade de recursos utilizados na Instância 5 mais o que fica em retenção, representado pela linha tracejada vermelha, pode-se perceber que na Instância 5 há 3 recursos Local de Manobra A disponíveis e se somados os recursos utilizados mais os recursos em retenção, em nenhum momento foram utilizados mais de 3 recursos (parte inferior da Figura 19). Essa situação é exemplificada por meio da soma dos recursos Local de Manobra A necessários no tempo 35 destacados em vermelho (Figura 19). A atividade 35 utiliza o recurso Local de Manobra A para a atividade Manobra Recepção. Já na atividade 27 o recurso Local de Manobra A fica em retenção, pois a atividade sucessora do lote ainda não havia sido realizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, constatou-se que a retenção dos recursos fixos é imprescindível para o planejamento das atividades em terminais ferroviários levar em consideração a limitação dos recursos disponíveis no terminal.

Portanto, cada uma das contribuições feitas nesta dissertação, refletidas por meio das explicações das 5 instâncias do Grupo A, é necessária para que o problema de

planejamento das atividades de um terminal ferroviário possa ser explorado de forma completa e que reflita a realidade operacional real.

6.2 RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO B

De acordo com o Capítulo 4, o Grupo B, com as Instâncias 6, 7, 8 e 9, possui as características específicas do terminal investigado nesse trabalho e foram congregadas nesse grupo para avaliar a utilização do modelo matemático proposto como uma ferramenta de auxílio à decisão com relação ao período de indisponibilidade dos recursos (entrega dos mesmos à manutenção ou período de ausência de mão-de-obra) para redução da estadia no terminal, em um cenário de planejamento de operação de 9 lotes, que representa uma operação rotineira no terminal.

Uma dessas características específicas inseridas nas instâncias do Grupo B é o tempo de *setup* entre as atividades Descarga seguindo as variações específicas discutidas por meio da Tabela 12, conforme explicado no Capítulo 4.

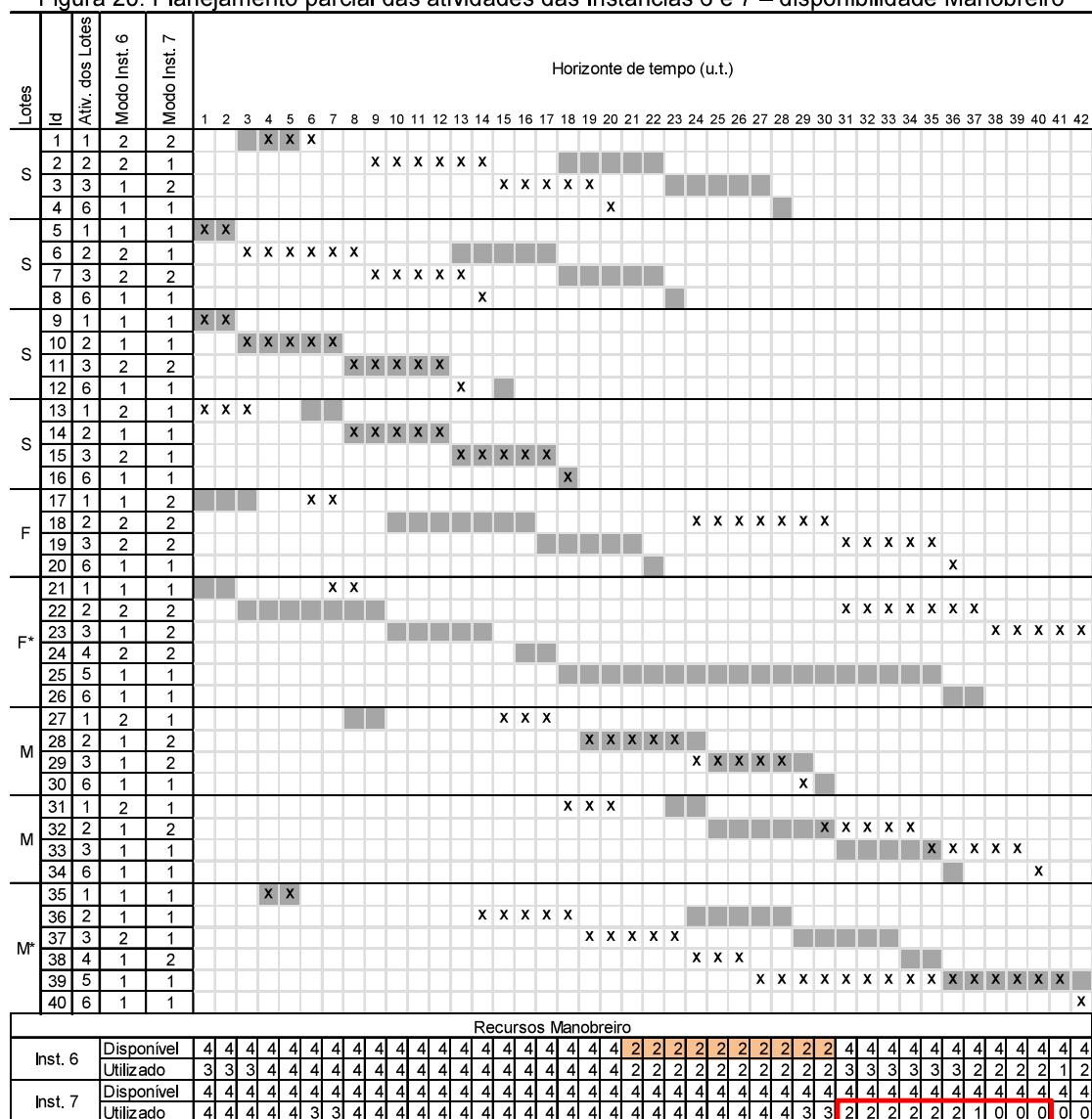
Na Instância 6, alguns recursos estão indisponíveis durante parte do horizonte de tempo de planejamento das atividades. São eles: indisponibilidade de dois recursos Manobreiro devido a um treinamento nos tempos de 21 u.t. a 30 u.t. e indisponibilidade do recurso Moega 2 devido a manutenção nos tempos de 16 u.t. a 20 u.t.. Na Instância 7 é realizado o planejamento dessas atividades em uma situação em que os recursos têm disponibilidade completa. É comparada a distribuição das atividades entre essas duas instâncias e são sugeridos cenários alternativos para a indisponibilidade desses recursos (Instâncias 8 e 9), a fim de que eles impactem menos no planejamento das atividades do terminal.

A FO das Instâncias 10 e 11 foram 268 u.t. e 252 u.t., respectivamente (Tabela 18). Essa diferença mostra o quanto a indisponibilidade desses recursos (Manobreiro e Moega 2) em parte do horizonte de tempo influenciou em uma maior estadia dos lotes no terminal.

Para análise comparativa do impacto da indisponibilidade dos recursos Manobreiro, utilizou-se a parte inferior da Figura 20, onde são apresentados para a Instância 6 e 7 parte do planejamento das atividades no terminal dessas duas instâncias (tempo 1

ao 42), a quantidade de recursos Manobreiro disponíveis e utilizados (o Apêndice D apresenta o gráfico completo). O período de indisponibilidade de dois recursos Manobreiro da Instância 6 está destacado (marcação em laranja), em que apenas 2 desses recursos estão disponíveis para o terminal (intervalo de 10 unidades de tempo, entre os tempos 21 e 30). No mesmo período, na Instância 7, a quantidade de recursos utilizados foi sempre superior a 2, chegando a 4 recursos utilizados (nos tempos de 21 u.t. a 28 u.t.).

Figura 20: Planejamento parcial das atividades das Instâncias 6 e 7 – disponibilidade Manobreiro



Legenda:

X Instância 6 (indisponibilidade parcial recursos)

Instância 7 (disponibilidade total recursos)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda com base na Figura 20, identificou-se que no período de 31 u.t. a 40 u.t. (destacado com contorno vermelho) da Instância 7, não seria necessária uma quantidade maior do que 2 recursos Manobreiro. Por esse motivo, foi criada a Instância 8, mantendo a indisponibilidade de dois recursos Manobreiro devido a um treinamento a ser realizado por 10 u.t., mas ajustando sua realização para os tempos de 31 u.t. a 40 u.t., ao invés do planejamento inicial de 21 u.t. a 30 u.t..

A melhoria no valor da FO, comparando-se a Instância 8 (260) com a Instância 6 (268), segundo a Tabela 18, demonstra que a proposta de ajuste do período de treinamento dos recursos Manobreiro contribuiu para a redução do tempo de estadia dos lotes no terminal.

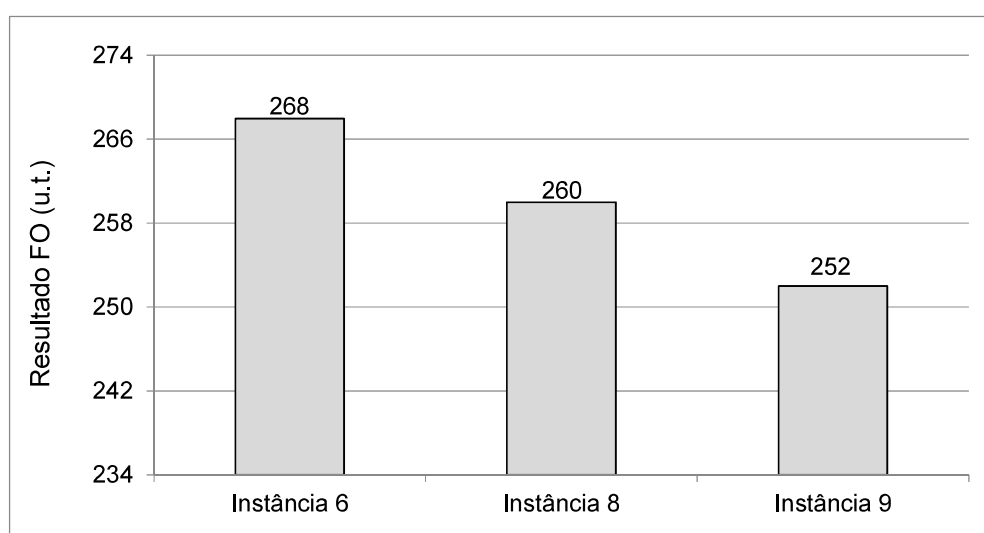
Já para a análise da influência indisponibilidade do recurso Moega 2, utilizou-se a parte inferior da Figura 21, onde são apresentados para a Instância 7 e 8 parte do planejamento das atividades no terminal dessas duas instâncias (tempo 1 ao 35), a quantidade do recurso Moega 2 disponível e utilizado (o Apêndice E apresenta o gráfico completo). A indisponibilidade da Moega 2 da Instância 8 está destacada (marcação em laranja), período em que esse recurso não está disponível para o terminal (intervalo de 5 unidades de tempo, entre os tempos 16 e 20). No mesmo período, na Instância 7, o recurso Moega 2 foi utilizado nos tempos 16, 19 e 20 u.t..

No período de 31 a 35 u.t. da Instância 7 (destacado com contorno vermelho) da Figura 21, não há necessidade do recurso Moega 2, mesmo ele estando disponível. Portanto, visualiza-se a oportunidade de entrega do recurso Moega 2 para manutenção durante esse intervalo. Para checar a efetividade desse ajuste do período de manutenção para que o planejamento das atividades dos lotes no terminal foi criada a Instância 9, entregando o recurso Moega 2 para manutenção no período de 31 a 35 u.t..

proposta de ajuste do período de entrega do recurso Moega 2 para manutenção surtiu efeito na redução do tempo de estadia no terminal.

Confrontando ainda o resultado da FO da Instância 9 com a Instância 7 (que possui recursos completos), conclui-se que a proposta de ajuste nos períodos de indisponibilidade dos recursos foi efetiva, considerando que foi possível realizar o planejamento de atividades no terminal ferroviário com alguns recursos indisponíveis e obter resultado da FO equivalente às situações em que os recursos do terminal estão completos. Comparou-se, na Figura 22, a FO das instâncias com indisponibilidade de recursos do Grupo B (Instâncias 6, 8 e 9), com base na Tabela 18.

Figura 22: Resultados da FO para as Instâncias 6, 8 e 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando ainda a Tabela 18, é importante que seja destacado a respeito das instâncias do Grupo B o tempo de execução da Instância 7, que foi maior do que as outras instâncias desse grupo. Como a Instância 7 é a única instância nesse grupo que não considera a indisponibilidade de recursos, todos os recursos estão disponíveis durante todo o horizonte de planejamento, esse tempo de execução maior pode ter ocorrido por conta do CPLEX ter mais opções para designação do período de operação das atividades.

Com base na solicitação de tempo inicial de manutenção do Grupo B de instâncias (Instância 6), foi proposto um primeiro ajuste no período de manutenção de um dos recursos (Instância 8) até o cenário em que foram sugeridos ajustes nos dois períodos de indisponibilidade (Instância 9). O resultado da FO dessas instâncias se aproximou do planejamento do terminal para um cenário em que todos os recursos estavam disponíveis (Instância 7), chegando a um mesmo resultado de estadia entre a Instância 7 e a Instância 9 (252 u.t.). Cabe ressaltar que o intervalo de tempo de indisponibilidade dos recursos foi mantido, sendo alterado apenas o intervalo que essa indisponibilidade ocorreria. O Gráfico de *Gantt* do planejamento das atividades da Instância 9 encontra-se no Apêndice F.

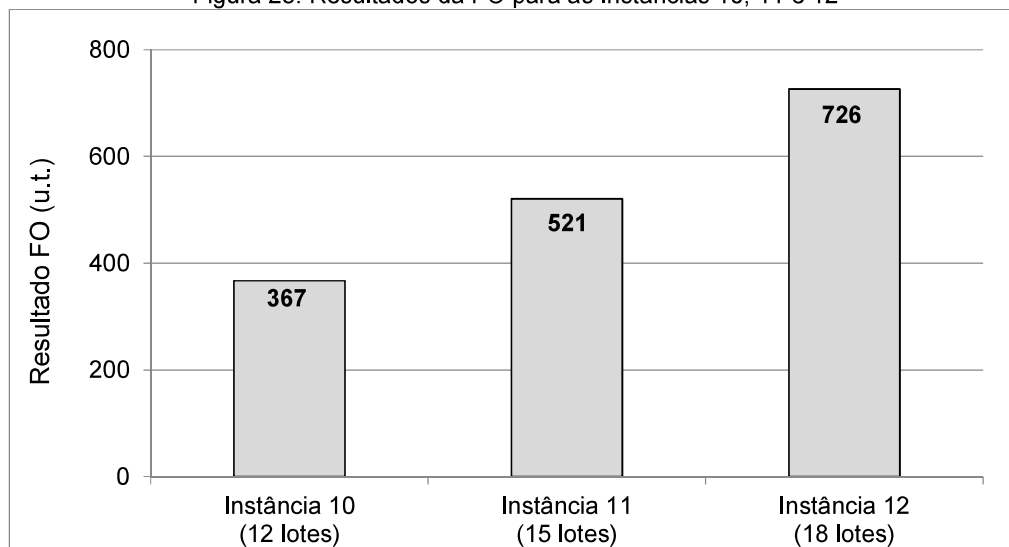
Nesse ponto, uma ressalva é necessária. As propostas de períodos com indisponibilidade de recursos que podem ser sugeridas por meio da utilização desse modelo matemático consideram exclusivamente o tempo de estadia dos lotes no terminal, não levando em consideração outros fatores necessários para que essa indisponibilidade ocorra, como por exemplo: uma manutenção específica que só pode ser realizada em período diurno, ou determinado treinamento que envolve diversas equipes e que, por isso, o horário não pode ser ajustado.

6.3 RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO C

Conforme descrito no Capítulo 4, as instâncias do Grupo C têm o propósito de testar o modelo matemático proposto em cenários maiores. Assim, foram testados nessas instâncias cenários em que o terminal ferroviário opera 12 lotes (Instância 10), 15 lotes (Instância 11) e 18 lotes (Instância 12). Essas instâncias possuem total disponibilidade dos recursos do terminal em todo horizonte de tempo. Outras características de cada uma dessas instâncias estão expostas na Tabela 16.

Observa-se, na Tabela 18, que mesmo com o tempo de execução limitado em 79.200 segundos (equivalente a 22 horas), o modelo matemático proposto não alcançou a solução ótima, nas três instâncias do Grupo C (Figura 23).

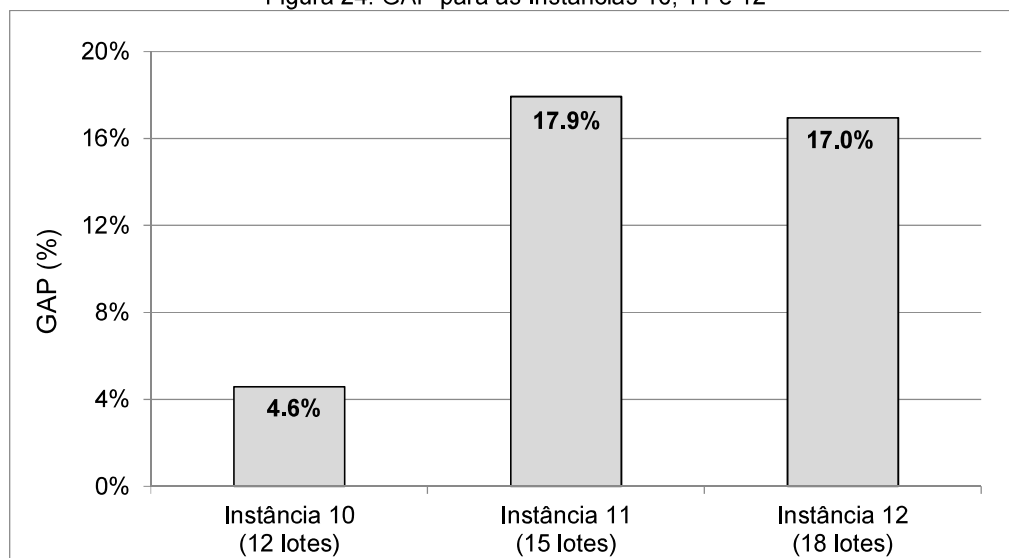
Figura 23: Resultados da FO para as Instâncias 10, 11 e 12



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Figura 24, comparou-se o GAP para alcançar a solução ótima em cada uma das instâncias do Grupo C. Pode-se assim inferir que o tempo de processamento do modelo matemático é influenciado pela quantidade de lotes a serem processados.

Figura 24: GAP para as Instâncias 10, 11 e 12



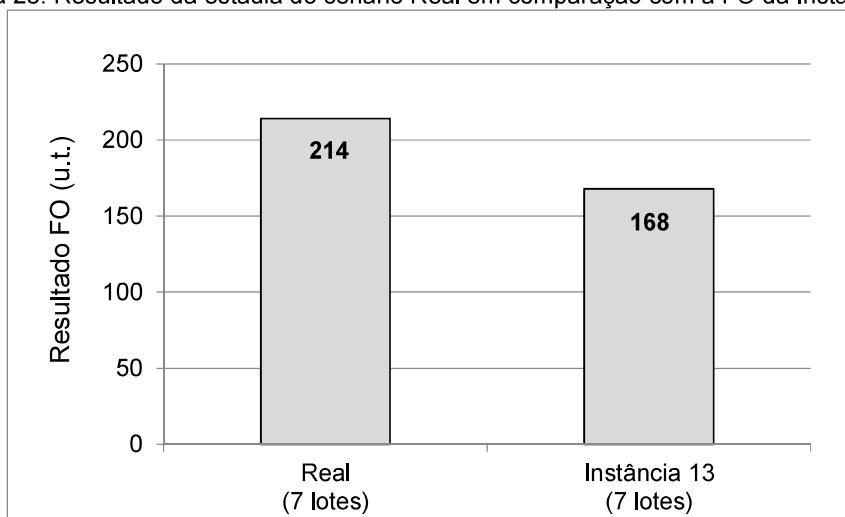
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 RESULTADOS E ANÁLISES – GRUPO D

As duas instâncias do Grupo D têm por objetivo comparar o planejamento das atividades do terminal ferroviário realizado por meio do modelo matemático proposto com a operação real das atividades operadas no terminal em dois períodos escolhidos de forma aleatória da operação do terminal ferroviário ao longo do segundo semestre do ano de 2017.

O resultado da comparação do planejamento de atividades proposto por meio do modelo matemático desse trabalho (Instância 13) com o realizado no terminal (Real) pode ser observado por meio da Figura 25. O Gráfico de *Gantt* do planejamento das atividades da Instância 13 em comparação com o Real pode ser visualizado no Apêndice G.

Figura 25: Resultado da estadia do cenário Real em comparação com a FO da Instância 13



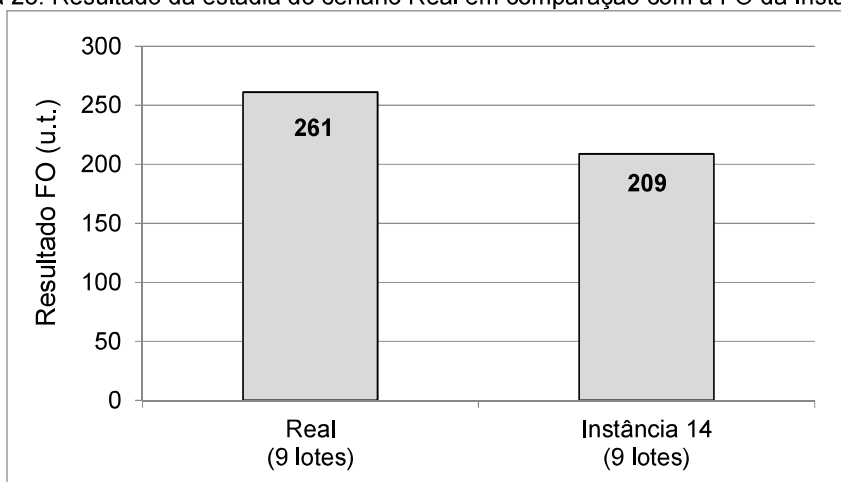
Fonte: Elaborado pelo autor.

A FO da Instância 13 foi de 168 u.t. (Tabela 18). Esse resultado representa um planejamento de atividades no terminal ferroviário com um tempo 78,5% do tempo de estadia que ocorreu no terminal no cenário Real (214 unidades de tempo), conforme Figura 25.

Por fim, o resultado da comparação do planejamento de atividades da Instância 14 (Tabela 18) com o cenário Real pode ser observado por meio da Figura 26. O

Gráfico de *Gantt* do planejamento das atividades da Instância 14 em comparação com o Real pode ser visualizado no Apêndice H.

Figura 26: Resultado da estadia do cenário Real em comparação com a FO da Instância 14



Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente constatou-se que a FO do planejamento de atividades proposto pelo modelo matemático desse trabalho (Instância 14) acarretou em uma estadia menor do que ocorreu no cenário Real no terminal ferroviário em estudo. A FO da Instância 14 foi de 209 u.t. (Tabela 18), o que equivale a 80,1% do tempo de estadia que ocorreu no terminal no cenário Real de 9 lotes (261 u.t.), conforme Figura 26.

7 CONCLUSÕES

Essa dissertação propôs um modelo matemático para o planejamento das atividades e da utilização de recursos realizadas em um terminal ferroviário, com base no MRCPSP, que inclui o conceito de retenção para planejamento das atividades, a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo e, ainda, a alternativa dessas atividades serem processadas por modos diferentes (operação por *múltiplos modos*), considerando, além disso, o tempo de preparação dos recursos (denominado tempo de *setup*). O objetivo de utilização do modelo matemático foi reduzir a estadia (tempo total de operação) de todos os lotes no terminal.

Por meio da revisão bibliográfica realizada, não foi encontrada, nenhuma publicação que levasse em consideração a aplicação do conceito de retenção ao MRCPSP. Por este motivo, o modelo matemático proposto foi denominado MRCPSP-R. Além disso, não foi encontrada a aplicação do MRCPSP com *múltiplos modos*, com indisponibilidade de recursos ao longo do tempo e tempo de *setup* a terminais ferroviários.

As instâncias analisadas mostraram que o CPLEX consegue resolver os cenários que representam um dia padrão de operação do terminal, levando menos de três horas de execução para alcançar uma solução ótima (Grupo B). Mesmo as instâncias do Grupo C (com mais lotes), o CPLEX alcançou, em 22 horas de processamento, resultados da FO com GAP inferiores a 20%, representando diferença inferior à que foi obtida na comparação entre as instâncias do Grupo D com o sequenciamento das atividades reais no terminal.

O modelo matemático proposto mostrou-se apto para a minimização da estadia dos lotes de vagões no terminal ferroviário e, além disso, revelou-se uma ferramenta útil para melhorar a gestão de recursos em um terminal ferroviário. O modelo se apresentou eficaz para planejar as atividades que necessitam de recursos limitados e em situações que ocorre a variação desses recursos ao longo do tempo. Foi possível identificar os diferentes modos de processamento e utilizá-lo como uma ferramenta de auxílio à disponibilidade de recursos para manutenção e planejamento de mão-de-obra.

Somado a isso, o modelo matemático proposto mostrou-se, ainda, adequado ao planejamento de instâncias reais, obtendo resultados melhores ao alcançado pelo terminal estudado.

Propõe-se como uma possível continuação da pesquisa a elaboração de uma meta-heurística para o modelo MRCPSP-R proposto a fim de que instâncias com maior número de lotes possam ser resolvidas, além de reduzir o tempo de execução para encontrar a solução.

REFERÊNCIAS

- ADLBRECHT, J.; HÜTTLER, B.; ZAZGORNIK, J.; GRONALT, M. (2015). **The train marshalling by a single shunting engine problem**. *Transportation Research Part C*, 58, 56-72.
- ANTF. Associadas - Vale, EFVM. Brasília: **Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários**. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/index.php/associadas/vale/efvm/apresentacao>>. Acesso em: 31 maio 2017.
- ANTT. Ferrovias, EFVM. Brasília: **Agência Nacional de Transportes Terrestres**. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/ferrovias/VALE__Estrada_de_Ferro_Vitoria_a_Minas.html>. Acesso em: 04 dezembro 2017.
- ARMSTRONG, J.; PRESTON, J. (2017). **Capacity utilisation and performance at railway stations**. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, XXX, 1-19.
- ARTIGUES, C.; MICHELON, P.; REUSSER, S. (2003). **Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling**. *European Journal of Operational Research*, 149, 249-267.
- ARTIGUES, C. (2017). **On the strength of time-indexed formulations for the resource-constrained project scheduling problem**. *Operations Research Letters*, 45, 154-159.
- BLASUM, U.; BUSSIECK, M. R.; HOCHSTÄTTLER, W.; MOLL, C.; SCHEEL, H. H.; WINTER, T. (1999). **Scheduling trams in the morning**. *Mathematical Methods of Operations Research*.
- BOYSEN, N.; EMDE, S.; FLIEDNER, M. (2016). **The basic train makeup problem in shunting yards**. *OR Spectrum*, 38, 207-233.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; JAEHN, F.; PESCH, E. (2012). **Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications**. *European Journal of Operational Research*, 220, 1-14.
- BOYSEN, N.; JAEHN, F.; PESCH, E. (2011). **Scheduling Freight Trains in Rail-Rail Transshipment Yards**. *Transportation Science*, 45(2), 199-211.
- BRUCKER, P.; KAMPMAYER, T. (2008) **Cyclic job shop scheduling problems with blocking**. *Annals of Operations Research*, 159, 161-181.
- BRUCKER, P.; KNUST, S. (2012) **Complex Scheduling**. Springer-Verlag, Berlim.
- CNT. **Anuário CNT do Transporte 2017: Estatísticas consolidadas**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <anuariodotransporte.cnt.org.br>. Acesso em: 22 out. 2017.
- CORDEAU, J. F.; TOTH, P.; VIGO, D. (1998). **A survey of optimization models for train routing and scheduling**. *Transportation Science*, 32(4), 380-404.
- CRAINIC, T. G. **Rail tactical planning: issues models and tools**. In: Binaco, L., Bella, A.L. (Eds.), *Freight Transport Planning and Logistics*. Berlim: Ed. Springer-Verlag, 1998.

- CRUZ, C. A. O.; FERREIRA FILHO, V. J. M. (2011) **New RCPSP Model Applied to Offshore Equipment Projects**. Industrial Engineering Research Conference.
- DAHLHAUS, E.; HORAK, P.; MILLER, M.; RYAN, J. F. (2000). **The train marshalling problem**. Discrete Applied Mathematics, 103, 41–54.
- D'ARIANO, A.; PACCIARELLI, D.; PRANZO, M. (2007) **A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network**. European Journal of Operational Research. 183/643–657
- DREXL, A.; NISSEN, R.; PATTERSON, J.; SALEWSKI, F. (2000) **ProGen/πx - An instance generator for resource-constrained project scheduling problems with partially renewable resources and further extensions**. European Journal of Operational Research. 125/59–72
- GEN, M.; CHENG, R.; LIN, L. (2010) **Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach**. Springer, London.
- HALL, N.; SRISKANDARAJAH, C. (1996) **A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process**. Operations Research. 44. 510–525.
- HANSMANN, R.; RIEGER, T.; ZIMMERMANN, U. (2014) **Flexible job shop scheduling with blockages**. Mathematical Methods of Operations Research. 79. 135–161.
- HARTMANN, S. (1999). **Project Scheduling under Limited Resources Models, Methods, and Applications**. University of Kiel Institut für Betriebswirtschaftslehre Olshausenstr.40 24118 Kiel, Germany, 219.
- HARTMANN, S.; BRISKORN, D. (2010) **A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem**. European Journal of Operational Research. 207/1–14
- HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S. S. (2000). **Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations**. European Journal of Operational Research.
- HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S. S. (2003). **An integrated dispatching model for rail yards operations**. Computers and Operations Research. 30: 939–966.
- IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6**. Disponível em: <ibm.com>. Acesso em: 22 jan. 2017.
- KELLENBRINK, C.; HELBER S. (2015). **Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure**. European Journal of Operational Research, 246 (2), 379–391.
- KELLNER, M.; BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. (2012). **How to park freight trains on rail-rail transshipment yards: The train location problem**. OR Spectrum.
- KHALED, A.; JIN, M.; CLARKE, D.; HOQUE, M. (2015). **Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures**. Transportation Research Part B, 71: 71–84.
- KHOSHNIYAT, F. (2012) **Simulation of Planning Strategies for Track Allocation at Marshalling Yards**. Tese de Dissertação de Mestrado em Ciências. Division of Traffic and Logistics, Railway group. KTH Royal Institute of Technology. Estocolmo. (2012)

- KOPANOS, G.; KYRIAKIDIS, T.; GEORGIADIS, M. (2014) **New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems**. *Computers and Chemical Engineering*. 68, 96-106.
- KRETER, S.; RIECK, J.; ZIMMERMANN, J. (2016) **Models and solution procedures for the resource-constrained scheduling problem with general temporal constraints and calendars**. *European Journal of Operational Research*. 251: 387-403.
- LANGE, J.; WERNER, F. (2017) **Approaches to modeling train scheduling problems as job-shop problems with blocking constraints**. *Journal of Scheduling*. 251: 387-403.
- LIU, S.; KOZAN, E. (2009) **Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem**. *Computers and Operations Research*, 36 p. 2840-2852.
- MARINOV, M.; VIEGAS, J. (2011) **Analysis and Evaluation of Double-Ended Flat-Shunted Yard Performance Employing Two Yard Crews**. *Journal of Transportation Engineering*. 137 (5): 319-326.
- MASCIS, A.; PACCIARELLI, D. (2002). **Job-shop scheduling with blocking and no-wait constraints**. *European Journal of Operational Research*. 143: 498-517.
- MIKA, M.; WALIGÓRA, G.; WEGLARZ, J. (2008) **Tabu search for multi-mode resource constrained project scheduling with schedule-dependent setup times**. *European Journal of Operational Research* 187 (3) 1238–1250.
- MOTRAGHI, A. (2013) **Rail research projects: Case studies**. *Research in Transportation Economics*, 41 p. 76-83.
- MOREIRA, D. A. (2016) **Administração da produção e operações**. 2 ed. rev. e ampl. Cengage Learning. São Paulo.
- NABER, A. (2017) **Resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles in continuous time**. *Computers and Operations Research*, 84 p. 33-45.
- OKUBO, H.; MIYAMOTO, T.; YOSHIDA, S.; MORI, K.; KITAMURA, S.; IZUI, Y. (2015) **Project scheduling under partially renewable resources and resource consumption during setup operations**. *Computers & Industrial Engineering*, p. 91-99.
- PETERSEN, E. (1977). **Railyard modeling. Part I: Prediction of put-through time**. *Transportation Science*. 11: 37-49.
- PIMENTA, L.; ROSA, R.; ZANOTTI, L.; ARRIVABENI, B.; LOUZADA, P.; VIEIRA, J. (2016). **Modelo matemático para o planejamento de manobras de lotes de vagões em um terminal ferroviário**. XXX Congresso ANPET, ANPET 2016, Rio de Janeiro.
- PIMENTA, L.; ROSA, R. (2017). **Planejamento da sequência das atividades e a utilização dos recursos para atendimento aos vagões em terminais ferroviários**. XXXI Congresso ANPET, ANPET, 2017, Recife.
- PRANZO, M.; PACCIARELLI, D. (2015) **An iterated greedy metaheuristic for the blocking job shop scheduling problem**. *Journal of Heuristics Article*.
- PRITSKER, A.; WATTERS, L.; WOLFE, P. (1969) **Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach**. *Management Science*, Vol. 16, p. 93-108.

PINEDO, M. (2002) **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. 2 ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

REIS JUNIOR, W.; LOPES, R. (2003) **Um otimizador branch & bound paralelo para manobras em pátios ferroviários**. XXXV Congresso SBPO, SBPO, Natal.

RIEZEBOS, J.; VAN WEZEL, W. (2009). **k-Shortest routing of trains on shunting yards**. OR Spectrum.

ROSA, R. A. (2009). **Modelo de simulação aplicado à avaliação de capacidade dos recursos de um terminal ferroviário**. XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Porto Seguro.

ROSA, R. A. **Operação Ferroviária**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, v.01, 2016.

SABINO, J. A.; LEAL, J. E.; STÜTZLE, T.; BIRATTARI, M. (2010). **A multi-objective ant colony optimization method applied to switch engine scheduling in railroad yards**. Pesquisa Operacional (Impresso), v. 30, p. 487-514.

SILVA, E.; MENEZES, E. (2005). **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed., Florianópolis: UFSC. 138 p.

SHI, T.; ZHOE, X. (2015) **A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards**. Transportation Research Part B, 80, p. 19-39.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. (2009) **Administração da Produção**. 3 ed. São Paulo: Atlas.

TAFFNER, M. B. (2009) **Programação das operações de um terminal ferroviário de grãos e fertilizantes sob o enfoque da administração da produção**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.

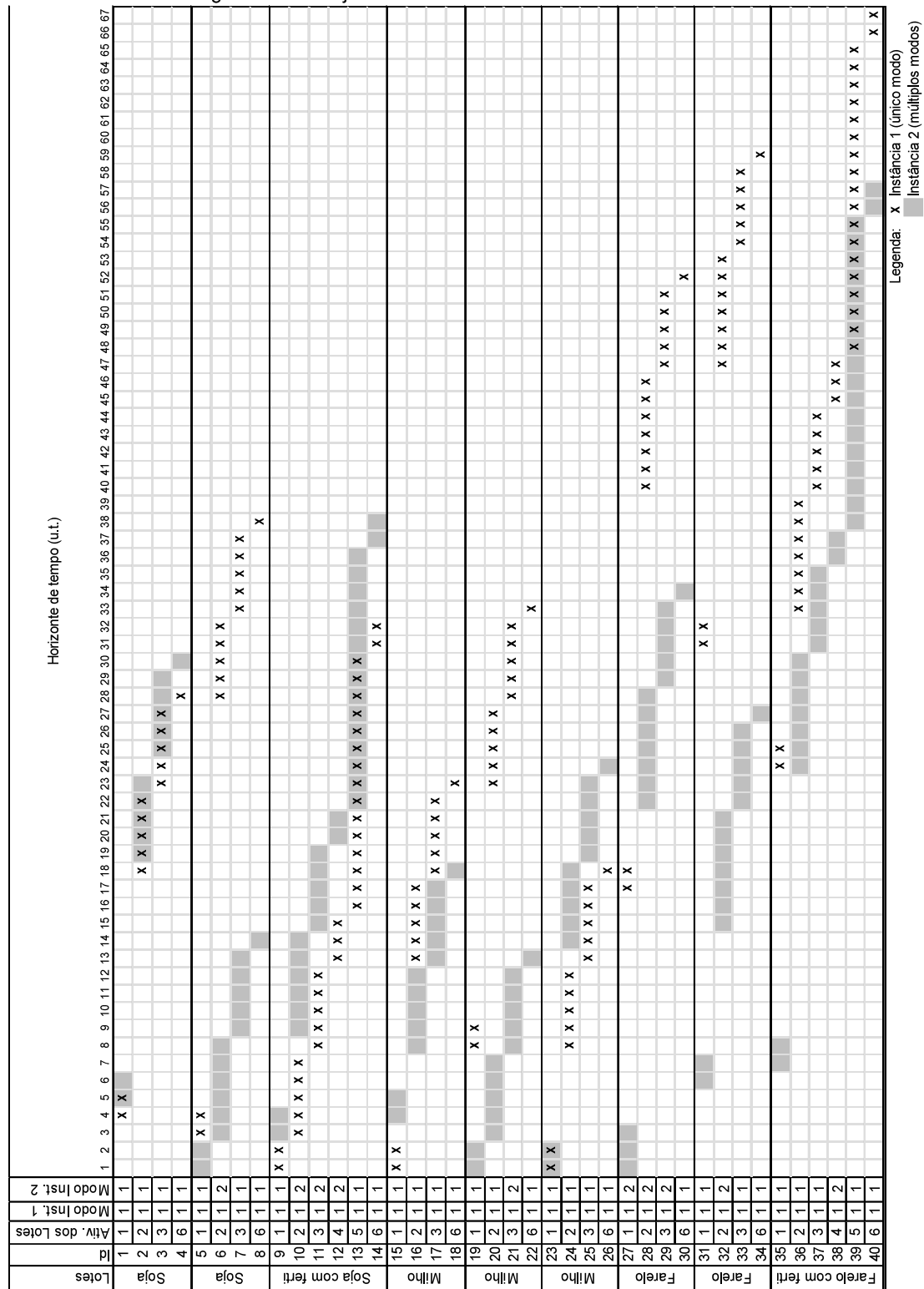
VERGARA, S. C. (2011). **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 13. ed. São Paulo: Atlas.

VALE. **Sobre a Vale**. Notícias. EFVM. Rio de Janeiro: Site institucional da Vale S.A.. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/trem-passageiros-estrada-ferro-vitoria-minas-tem-pagina-reformulada.aspx>>. Acesso em: 31 maio 2017.

WINTER, T.; ZIMMERMANN, U. T. (2000). **Real-time dispatch of trams in storage yards**. Annals of Operations Research, 96, 287–315.

APÊNDICE A

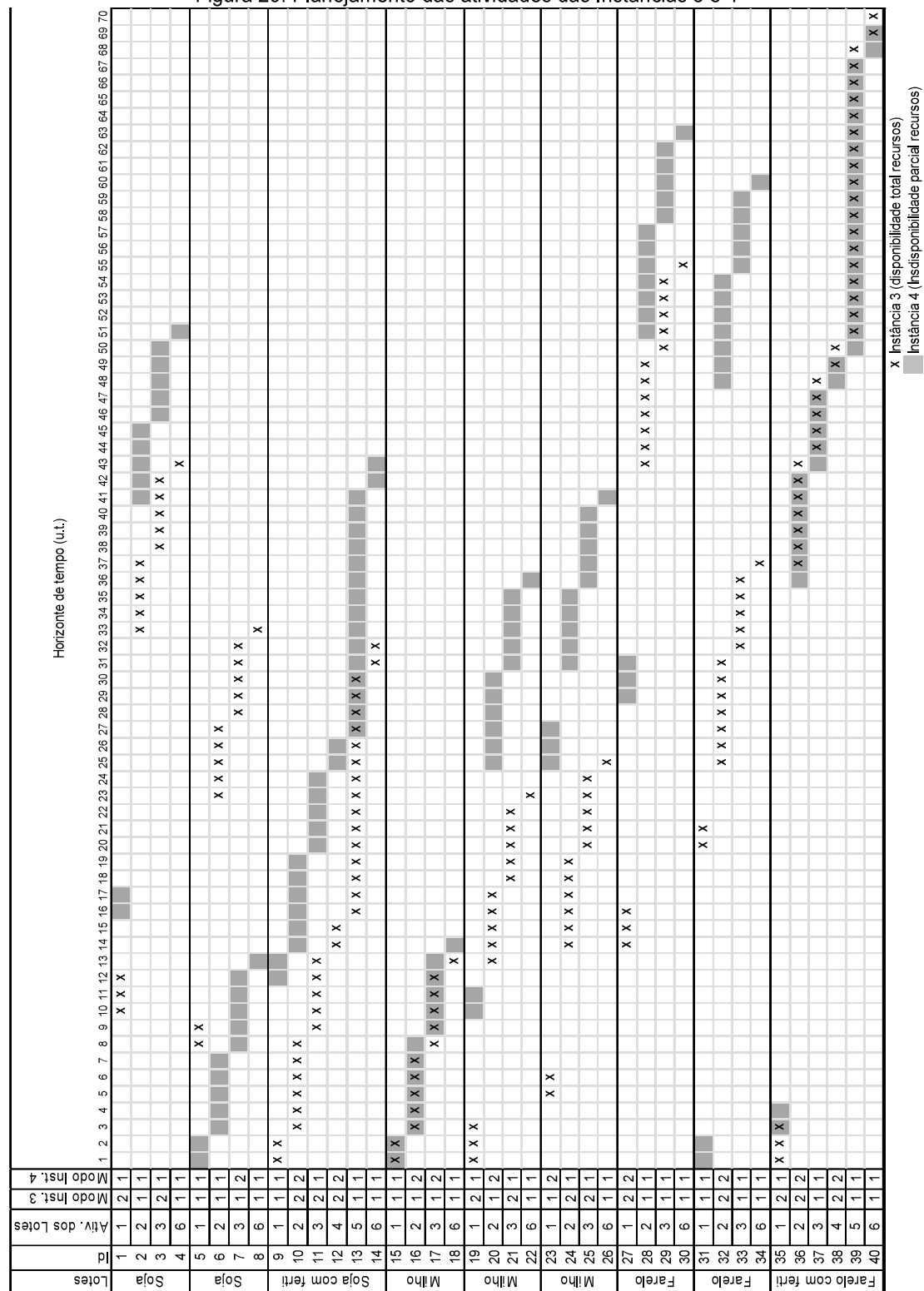
Figura 27: Planejamento das atividades das Instâncias 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C

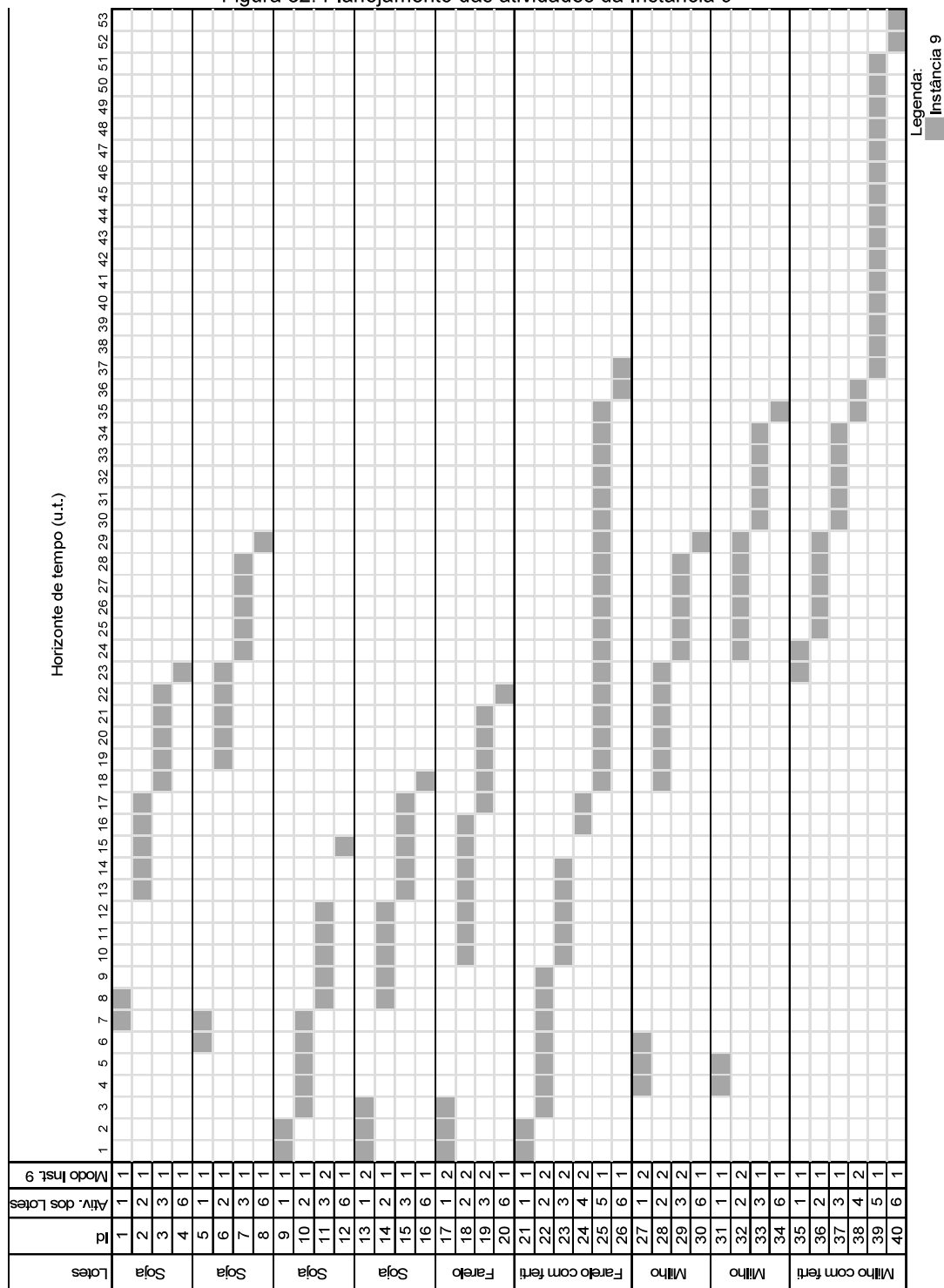
Figura 29: Planejamento das atividades das Instâncias 3 e 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE F

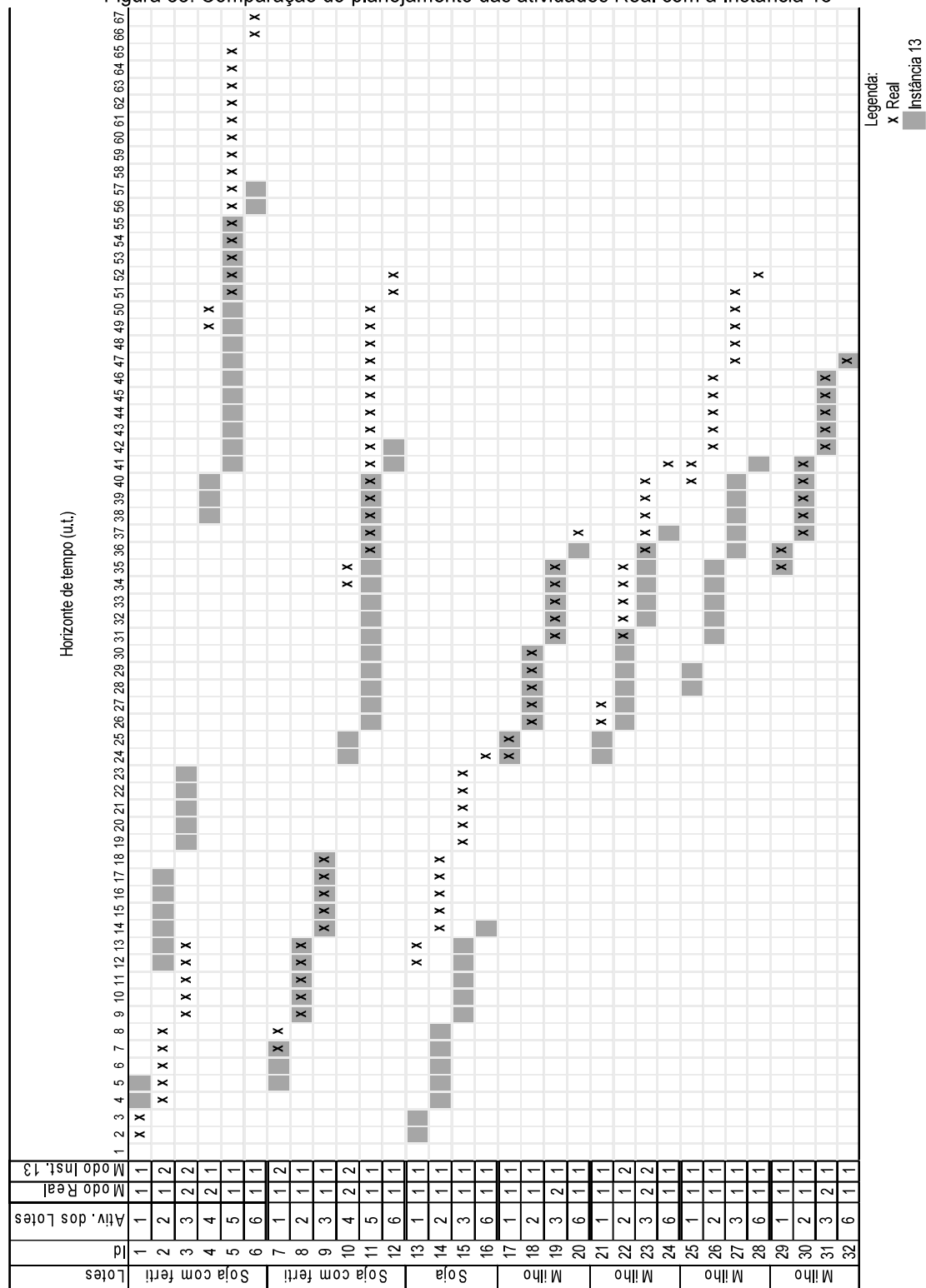
Figura 32: Planejamento das atividades da Instância 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE G

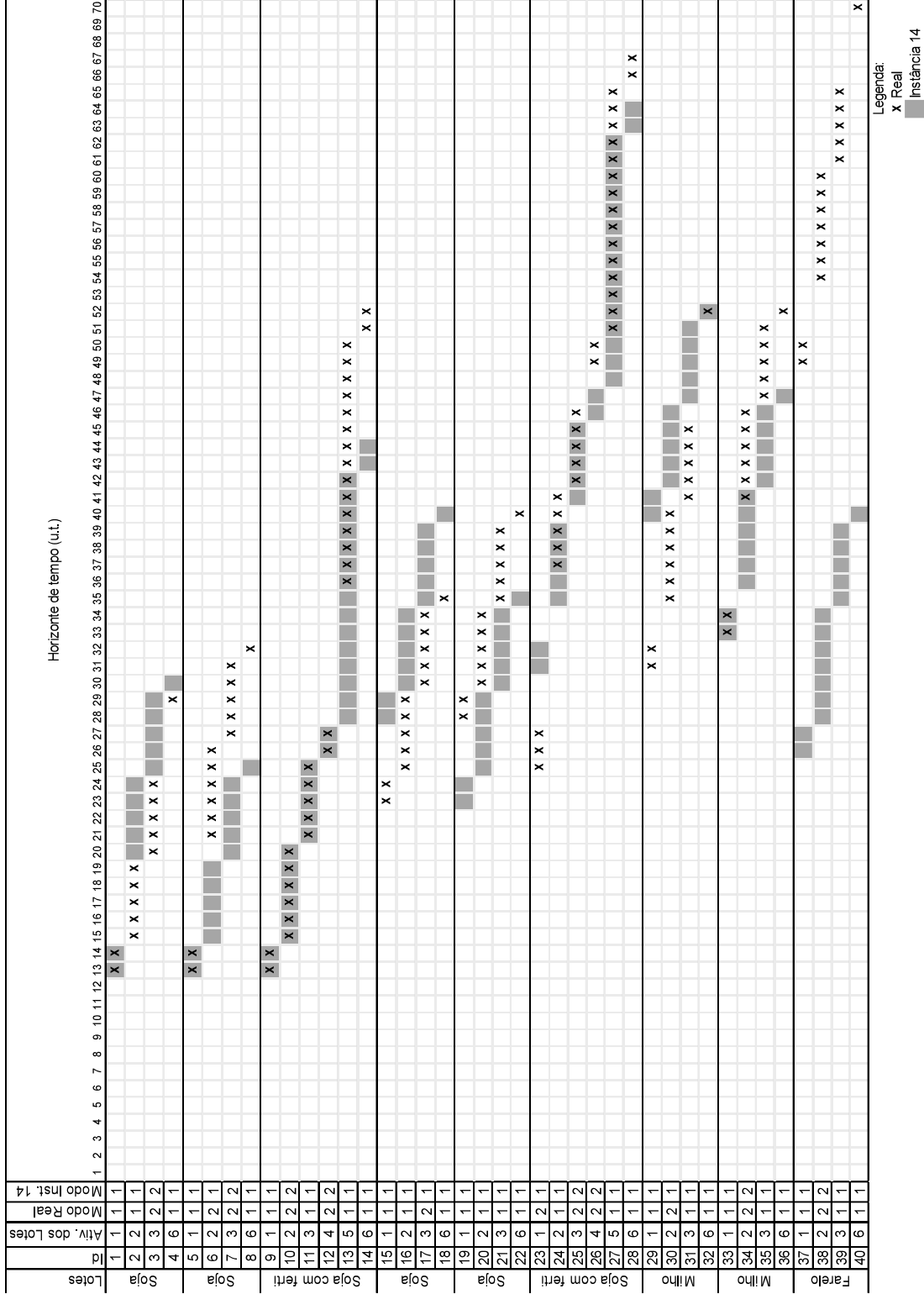
Figura 33: Comparação do planejamento das atividades Real com a Instância 13



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE H

Figura 34: Comparação do planejamento das atividades Real com a Instância 14



Fonte: Elaborado pelo autor.