



Renata Ferreira de Sá

**Avaliação de capacidade de processamento em
pátios ferroviários planos de classificação
através de modelo de otimização**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientadora : Prof. Luciana de Souza Pessôa
Coorientador: Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira

Rio de Janeiro
setembro de 2021



Renata Ferreira de Sá

**Avaliação de capacidade de processamento em
pátios ferroviários planos de classificação
através de modelo de otimização**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Luciana de Souza Pessôa

Orientadora

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira

Coorientador

UFJF

Prof. José Eugênio Leal

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eduardo Pécora Junior

UFPR

Rio de Janeiro, 28 de setembro de 2021

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Renata Ferreira de Sá

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora (MG). Parte da graduação sanduíche realizada na Universidade de Toronto (Toronto, CA). Trabalha na MRS Logística, operadora ferroviária. Atualmente atua na Gestão de Projetos e Inovação, tendo passado pelas áreas de Estratégia Operacional, Planejamento e Controle de Operação e Manutenção.

Ficha Catalográfica

Sá, Renata Ferreira de

Avaliação de capacidade de processamento em pátios ferroviários planos de classificação através de modelo de otimização / Renata Ferreira de Sá; orientadora: Luciana de Souza Pessôa; coorientador: Fernando Marques de Almeida Nogueira. – 2021.

125 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Pátio ferroviário. 3. Classificação de vagões. 4. Modelo de programação linear inteira mista. 5. Sequenciamento de produção. I. Pessôa, Luciana de Souza. II. Nogueira, Fernando Marques de Almeida. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

Sou imensamente grata por toda evolução que o Mestrado me trouxe, pessoal, acadêmica e profissionalmente. Agradeço à Deus e ao Universo por me permitir esta experiência de aprendizagem.

Agradeço à Luciana e ao Fernando por seu tempo e orientação. Sou grata à MRS Logística personificada na Sabrina Veloso que me apoiou e me permitiu escolhas durante esta jornada, além de me dar o contexto para o problema discutido neste estudo.

Também deixo meu agradecimento à minha família, ao meu companheiro de vida Ramon, ao Fernando Cyrino (coordenador do MINTER) e aos meus amigos do MINTER ou da MRS que me deram atenção, força e confiança nos momentos mais desafiadores.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço, por fim, às universidades parceiras: PUC-Rio e UFJF.

Obrigada!

Resumo

Sá, Renata Ferreira de; Pessôa, Luciana de Souza; Nogueira, Fernando Marques de Almeida. **Avaliação de capacidade de processamento em pátios ferroviários planos de classificação através de modelo de otimização**. Rio de Janeiro, 2021. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho trata do problema real de avaliar a capacidade de processamento de pátios ferroviários planos de classificação. Nesses pátios, os vagões são recebidos em trens e movimentam respeitando a disposição dos trilhos e a formação sequencial do trem de saída. Movimentações ineficientes implicam em uma capacidade de processamento inferior à potencial do pátio dado seu *layout*. O objetivo desta pesquisa é descrever o problema e incitar um método capaz de calcular a capacidade de processamento de pátios ferroviários planos de classificação no horizonte estratégico, indicando se existe ou não a necessidade de um projeto de expansão para garantir atendimento à demanda prevista. O problema foi modelado através de programação linear inteira mista (MILP) baseado na teoria de sequenciamento de produção. O modelo foi aplicado em instâncias de teste, reproduzindo movimentações reais de vagões, e provou avaliar diferentes *layouts* adequadamente, porém com elevado tempo de execução. A inicialização de algumas variáveis binárias do modelo permitiu um incremento de tamanho nas instâncias, porém ainda inviável para aplicação na prática.

Palavras-chave

Pátio ferroviário; Classificação de vagões; Modelo de programação linear inteira mista; Sequenciamento de produção.

Abstract

Sá, Renata Ferreira de; Pessôa, Luciana de Souza (Advisor); Nogueira, Fernando Marques de Almeida (Co-Advisor). **Assessment of the processing capacity in sorting railway yards through optimization model**. Rio de Janeiro, 2021. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work deals with the real problem of evaluating the processing capacity of flat rail classification yards. In these yards, the railway cars are received on trains and move respecting the car sequence of the outgoing train. Inefficient movements imply a lower processing capacity than the yard's potential given its layout. The objective of this research is to describe the problem and to incite a method capable of calculating the processing capacity of flat rail classification yards in the strategic horizon, indicating whether or not there is a need for an expansion project to ensure meeting the expected demand. The problem was modeled using mixed integer linear programming (MILP) based on production scheduling theory. The model was applied to test instances, reproducing real railway car movements, and proved to evaluate different layouts properly, but with a high execution time. The initialization of some binary variables of the model allowed an increase in the size of the instances, however it is still unfeasible for practical application.

Keywords

Railway yards; Sorting of railway cars; Mixed integer linear programming; Production scheduling.

Sumário

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introdução | 15 |
| 2 | Descrição do Problema | 19 |
| 2.1 | Pátios Ferroviários | 19 |
| 2.1.1 | Terminais | 21 |
| 2.1.2 | Pátios de Cruzamento | 21 |
| 2.1.3 | Pátios de Estocagem | 22 |
| 2.1.4 | Pátios de Manutenção | 22 |
| 2.1.5 | Pátios de Classificação | 22 |
| 2.2 | Operação em Pátios de Classificação Planos com 1 Sub-pátio | 25 |
| 2.3 | Escopo de pesquisa | 31 |
| 2.4 | Premissas | 31 |
| 3 | Revisão de Literatura | 35 |
| 3.1 | Sobre Cálculo de Capacidade em Pátios Ferroviários de Classificação | 35 |
| 3.2 | Sobre <i>Scheduling</i> | 41 |
| 3.3 | Problemas Correlatos | 44 |
| 4 | Modelo Matemático | 46 |
| 5 | Experimentos Computacionais | 53 |
| 5.1 | Definição das Instâncias | 53 |
| 5.2 | Planejamento dos Experimentos | 58 |
| 5.3 | Otimização Clássica | 58 |
| 5.4 | Inicialização de rota definida por conhecimento tácito | 62 |
| 5.5 | Inicialização do número máximo de movimentações definido por conhecimento tácito | 65 |
| 5.6 | Fixação do número máximo de movimentações definido por conhecimento tácito | 69 |
| 5.7 | Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto | 73 |
| 5.8 | Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto submetida a instâncias maiores | 79 |
| 6 | Conclusões | 82 |
| | Referências Bibliográficas | 85 |
| A | Detalhamento das instâncias | 90 |
| B | Soluções ótimas das instâncias | 100 |
| C | Inicialização da rota para cada instância | 114 |

D Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para cada instância 122

Lista de Figuras

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1.1 | Pátios de classificação (1) Arará - RJ; (2) Campo Grande - SP; (3) Dias Tavares - MG | 16 |
| Figura 2.1 | Representação de trecho da ferrovia operada pela MRS Logística | 19 |
| Figura 2.2 | Fotografia de pátios ferroviários | 20 |
| 2.2(a) | Pátio ferroviário Barreiro em Minas Gerais | 20 |
| 2.2(b) | Pátio ferroviário km 460 em Minas Gerais | 20 |
| Figura 2.3 | Exemplo de um terminal | 21 |
| Figura 2.4 | Exemplo de um pátio de cruzamento | 21 |
| Figura 2.5 | Exemplo de um pátio de estocagem | 22 |
| Figura 2.6 | Etapas do processo de classificação de vagões em pátios planos | 23 |
| Figura 2.7 | Pátio ferroviário do tipo hump | 23 |
| Figura 2.8 | Pátios de classificação com diferentes composições de sub-pátios | 24 |
| Figura 2.9 | Fluxograma detalhado do processo de um pátio de classificação plano com 1 sub-pátio | 26 |
| Figura 2.10 | Exemplo de classificação de vagões em um pátio plano. | 28 |
| Figura 2.11 | Informações de entrada e saída em cada etapa de planejamento | 29 |
| Figura 3.1 | Métodos para cálculo de capacidade de pátios ferroviários aplicados ao longo dos anos | 39 |
| Figura 4.1 | Exemplo de troca simultânea de vagões entre trechos, não permitido | 51 |
| Figura 5.1 | <i>Layout I1</i> discretizado em trechos | 54 |
| Figura 5.2 | Solução ótima I1 ilustrada | 59 |
| Figura 5.3 | Tempo de execução das instâncias com aumento do número de vagões | 81 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabela 3.1 | Resumo dos artigos revisados indicando o método de cálculo da capacidade de processamento de um pátio ferroviário | 37 |
| Tabela 4.1 | Conjuntos | 47 |
| Tabela 4.2 | Parâmetros | 47 |
| Tabela 4.3 | Variáveis | 48 |
| Tabela 5.1 | Definição das Instâncias de Teste | 53 |
| Tabela 5.2 | AMV_{qs} para instância I1 | 56 |
| Tabela 5.3 | Resumo dos parâmetros por vagão para instância I1 | 57 |
| Tabela 5.4 | Otimização Clássica | 59 |
| Tabela 5.5 | Solução ótima para instância I1 em forma de tabela | 60 |
| Tabela 5.6 | Inicialização de rota para instância I1 | 62 |
| Tabela 5.7 | Inicialização de rota por conhecimento tácito | 63 |
| Tabela 5.8 | Comparativo entre Otimização clássica e Inicialização de rota | 63 |
| Tabela 5.9 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I1 | 66 |
| Tabela 5.10 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por conhecimento tácito | 66 |
| Tabela 5.11 | Comparativo entre Otimização clássica e Inicialização do número máximo de movimentações por vagão | 67 |
| Tabela 5.12 | Comparativo entre Inicialização de rota e Inicialização do número máximo de movimentações por vagão | 67 |
| Tabela 5.13 | Fixação do número máximo de movimentações por vagão por conhecimento tácito | 70 |
| Tabela 5.14 | Comparativo entre Otimização clássica e Fixação do número máximo de movimentações por vagão | 71 |
| Tabela 5.15 | Comparativo entre Inicialização de rota e Fixação do número máximo de movimentações por vagão | 71 |
| Tabela 5.16 | Comparativo entre Inicialização e Fixação do número máximo de movimentações por vagão | 72 |
| Tabela 5.17 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I1 através de fator multiplicador do caminho mais curto | 74 |
| Tabela 5.18 | Tempo em segundos de CPU para encontrar a 1 ^a solução viável a partir da inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático | 75 |
| Tabela 5.19 | Diferença percentual entre a primeira solução viável e a solução ótima a partir da inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático | 76 |
| Tabela 5.20 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático | 77 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabela 5.21 | Comparação do tempo em segundos de CPU para encontrar a 1ª solução viável no cenário de Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático com os demais | 78 |
| Tabela 5.22 | Definição das Instâncias Maiores | 79 |
| Tabela 5.23 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático em instâncias maiores | 79 |
| Tabela A.1 | Valores para Parâmetros I1 , I3 , I4 e I5 | 90 |
| Tabela A.2 | Valores para Parâmetros I2 | 90 |
| Tabela A.3 | Valores para Parâmetros I6 , I9 e I10 | 90 |
| Tabela A.4 | Valores para Parâmetros I7 | 91 |
| Tabela A.5 | Valores para Parâmetros I8 | 91 |
| Tabela A.6 | Valores para Parâmetros I11 | 91 |
| Tabela A.7 | Valores para Parâmetros I12 | 91 |
| Tabela A.8 | Valores para Parâmetros I13 | 92 |
| Tabela A.9 | Valores para Parâmetros I14 | 92 |
| Tabela A.10 | Valores para Parâmetros I15 | 92 |
| Tabela A.11 | AMV_{qs} para instâncias I1 , I2 e I4 | 93 |
| Tabela A.12 | AMV_{qs} para instância I3 | 93 |
| Tabela A.13 | AMV_{qs} para instância I5 | 93 |
| Tabela A.14 | AMV_{qs} para instâncias I6 , I7 , I9 , I11 , I12 , I13 , I14 e I15 | 94 |
| Tabela A.15 | AMV_{qs} para instância I8 - 1º Quadro | 95 |
| Tabela A.16 | AMV_{qs} para instância I8 - 2º Quadro | 96 |
| Tabela A.17 | AMV_{qs} para instância I8 - 3º Quadro | 97 |
| Tabela A.18 | AMV_{qs} para instância I8 - 4º Quadro | 98 |
| Tabela A.19 | AMV_{qs} para instância I10 | 99 |
| Tabela B.1 | Solução ótima para instância I1 | 100 |
| Tabela B.2 | Solução ótima para instância I2 | 100 |
| Tabela B.3 | Solução ótima para instância I3 | 101 |
| Tabela B.4 | Solução ótima para instância I4 | 101 |
| Tabela B.5 | Solução ótima para instância I5 | 101 |
| Tabela B.6 | Solução ótima para instância I6 | 102 |
| Tabela B.7 | Solução ótima para instância I7 | 103 |
| Tabela B.8 | Solução ótima para instância I8 - 1º Quadro | 104 |
| Tabela B.9 | Solução ótima para instância I8 2º Quadro | 105 |
| Tabela B.10 | Solução ótima para instância I8 3º Quadro | 106 |
| Tabela B.11 | Solução ótima para instância I8 4º Quadro | 107 |
| Tabela B.12 | Solução ótima para instância I9 | 108 |
| Tabela B.13 | Solução ótima para instância I10 | 109 |
| Tabela B.14 | Solução ótima para instância I11 | 110 |
| Tabela B.15 | Solução ótima para instância I12 | 111 |
| Tabela B.16 | Solução ótima para instância I13 | 112 |
| Tabela B.17 | Solução ótima para instância I14 | 113 |
| Tabela C.1 | Inicialização de rota para instância I1 | 114 |
| Tabela C.2 | Inicialização de rota para instância I2 | 114 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabela C.3 | Inicialização de rota para instância I3 | 115 |
| Tabela C.4 | Inicialização de rota para instância I4 | 115 |
| Tabela C.5 | Inicialização de rota para instância I5 | 116 |
| Tabela C.6 | Inicialização de rota para instância I6 | 117 |
| Tabela C.7 | Inicialização de rota para instância I7 | 118 |
| Tabela C.8 | Inicialização de rota para instância I8 | 119 |
| Tabela C.9 | Inicialização de rota para instância I9 | 120 |
| Tabela C.10 | Inicialização de rota para instância I10 | 121 |
| Tabela D.1 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instâncias I1, I3, I4 e I5 | 122 |
| Tabela D.2 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I2 | 122 |
| Tabela D.3 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instâncias I6, I9 e I10 | 122 |
| Tabela D.4 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I7 | 123 |
| Tabela D.5 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I8 | 123 |
| Tabela D.6 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I11 | 123 |
| Tabela D.7 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I12 | 124 |
| Tabela D.8 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I13 | 124 |
| Tabela D.9 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I14 | 125 |
| Tabela D.10 | Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância I15 | 125 |

Lista de Abreviaturas

AMV – Aparelho de Mudança de Via

IC – *Illinois Central*

MILP – Modelo de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming*)

MIP – Modelo de Programação Inteira Mista (*Mixed Integer Programming*)

PSR – *Precision Scheduled Railroading*

SRSP – Sorting of Rolling Stock Problem

VNS – *Variable Neighborhood Search*

*If we knew what it was we were doing, it would
not be called research, would it?*

Albert Einstein.

1

Introdução

Os operadores ferroviários de carga atendem seus clientes através de dois tipos de serviço: trem unitário e trem de carga geral, sendo, este último, composto por vagões de diferentes rotas (origem - destino) que compartilham parte da jornada [1]. Os trens de carga geral requerem uma ou mais paradas para deixar e receber vagões nos pátios de classificação. Bontekoning and Priemus [2] afirmam que, na Europa, o tempo de permanência dos vagões nos pátios de classificação podem chegar a 50% do tempo de trânsito, sendo representativo na competitividade do serviço ofertado.

Três pátios ferroviários de classificação da MRS Logística, operadora ferroviária nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, são apresentados na Figura 1.1. Para garantir que um pátio de classificação tenha capacidade de processar os vagões dentro do período de tempo desejado, o pátio deve ter uma infraestrutura (*layout*) adequada à demanda. Projetos de expansão em infraestrutura requisitam alto investimento e cronogramas expandidos, o que exige o estudo da necessidade de forma antecipada (longo prazo). Na análise estratégica da capacidade de pátios de classificação, deseje-se compreender o desempenho do pátio com a demanda prevista e comparar com o desempenho do pátio caso instaladas alternativas de expansão, ou mesmo com outro *layout*. A empresa operadora, então, terá insumos para decidir por investir ou não na infraestrutura do pátio de classificação baseando-se no seu desempenho esperado.

A capacidade de um pátio de classificação é medida pelo número de vagões ou blocos de vagões que consegue processar dentro do período de interesse. Se todos os vagões previstos (demanda) são processados dentro do horizonte de planejamento, então conclui-se que o pátio tem capacidade de processar a demanda. Se não, conclui-se que o pátio precisa de modificações em seu *layout*. O desempenho do pátio é diretamente influenciado pelos seguintes fatores: demanda, sequência de vagões nos trens, *layout*, plano de manobra (posição dos vagões ao longo do tempo), disponibilidade de locomotivas e de equipe de manobra. Desses, este estudo busca definir o plano de manobra, baseado nos demais parâmetros que são conhecidos *a priori*. Se o plano de manobra é o ótimo, pode-se dizer que este é o melhor desempenho do

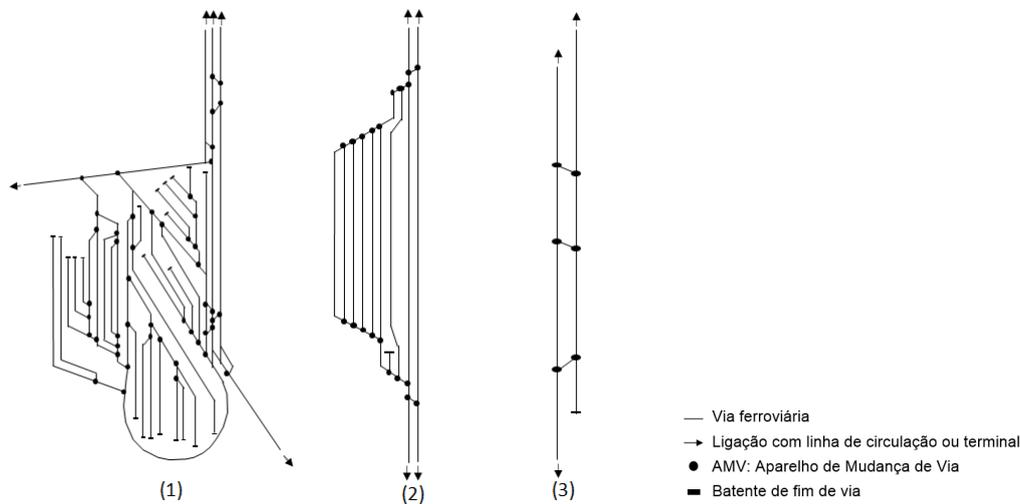


Figura 1.1: Pátios de classificação (1) Arará - RJ; (2) Campo Grande - SP; (3) Dias Tavares - MG

pátio dado as demais premissas, ou seja, é sua capacidade. Vale ressaltar que, das premissas destacadas, disponibilidade de equipe e locomotiva de manobra podem ser ajustados no curto prazo. Sendo assim, neste estudo assume-se que sempre haverá locomotiva e equipe de manobra para realizar a circulação apontada pelo modelo, não sendo necessário modelar este recurso como restrição.

A pesquisa por um método mais eficiente e com boa precisão para avaliação de capacidade de pátios planos de classificação foi motivada, primeiramente, pela indústria ferroviária. Na MRS Logística, os métodos para avaliação de capacidade de pátios de classificação se baseiam em ferramentas analíticas ou simulação. O primeiro sendo pouco preciso e o segundo exigindo grande esforço para parametrização, por ter como *input* um conjunto de regras de negócio para cada cenário de demanda e *layout* a ser testado, apesar de ser referência de qualidade nas respostas. Neste contexto, este estudo propõe um modelo de programação linear inteira mista que minimiza o tempo necessário para o processamento de todos os vagões esperados (demanda), respeitando o *layout* ferroviário em estudo. Com isso, o modelo é capaz de escolher a melhor ocupação das linhas no tempo, ou seja, um plano de manobra que processa o maior número de vagões por unidade de tempo, indicando, de forma mais exata que o método analítico e com menor esforço de parametrização que a simulação, a capacidade do pátio.

Pela revisão de literatura, o problema de classificação de vagões tem sido estudado ao longo do tempo, porém com pouco foco nos pátios planos como apresentado na Figura 1.1, identificados como pátios locais ou pequenos. Os estudos revisados focaram em um *layout* específico de pátio ferroviário

com muitas linhas paralelas e a classificação de vagões ocorrendo somente pela linha de chegada ou saída (também chamada de alça de manobra). No entanto, tanto otimização quanto heurísticas tem sido frequentemente empregadas em problemas de classificação de vagões em pátios ferroviários nos últimos anos. Aplicações de modelagem do problema via programação matemática baseada na teoria de *scheduling* de produção já tiveram aparições no contexto ferroviário, como em [3] e [4], porém nenhum dos estudos revisados detalharam de forma microscópica as atividades do pátio de classificação considerando pátios pequenos ou locais (*layouts* com poucas linhas ferroviárias). Este estudo apresenta uma abordagem adaptada de Pinedo [5], com máquinas idênticas, sem interrupção, sem *setup*, sem quebras, com recirculação e sem estoque intermediário (bloqueio), onde as tarefas (*jobs*) não precisam passar por todas as máquinas e também não apresentam uma sequência de máquinas predefinida, motivada em um cenário real de classificação de vagões em pátios planos.

Apesar de ser um problema comum das ferrovias brasileiras que não tiveram investimentos em infraestrutura de pátios antecedendo a demanda por maior movimentação de carga geral, a questão de como ser eficiente em pátios planos pequenos ou locais pode se tornar um tópico de interesse para ferrovias internacionais com a popularização da estratégia *Precision Scheduled Railroading* (PSR) do pioneiro Hunter Harrison aplicada em meados dos anos 90 enquanto CEO da Illinois Central (IC) [6]. Nessa estratégia, o objetivo é reduzir a necessidade de vagões e locomotivas usando uma rota mais direta na malha ferroviária, o que causa a redução da necessidade de classificação de vagões em grandes pátios *hump*¹ de classificação. Esta estratégia implica, também, em um uso mais frequente dos pátios ferroviários planos locais ou pequenos mais próximos da origem ou destino dos vagões.

A modelagem do problema baseada na teoria de *scheduling* de produção também traz avanços para a literatura. As características do problema de classificação de vagões não se encaixam perfeitamente nas restrições comuns consideradas nos problemas de *scheduling* propostos por Pinedo [5], exigindo uma extrapolação das restrições já apresentadas em outros trabalhos.

O principal objetivo desta pesquisa é descrever o problema de classificação de vagões em pátios ferroviários planos com *layouts* variados via programação matemática de forma a permitir evolução de pesquisas no tema. Este

¹Pátios ferroviários do tipo *hump* são pátios de classificação que contém uma inclinação entre a linha de chegada e as linhas de classificação (muitas linhas paralelas conectadas entre si por um único AMV ligado à região de inclinação). Uma sequência de vagões é puxada por uma locomotiva até a inclinação (*hump*), e de lá os vagões rolam de forma livre para as linhas de classificação devido à gravidade, tendo sua velocidade controlada por aparelhos mecânicos instalados nos trilhos (*retaders*).

problema é comum nas ferrovias brasileiras e tende a se tornar mais valorizado nas ferrovias estrangeiras devido à popularização da estratégia PSR. Optou-se por focar na análise estratégica de capacidade por permitir algumas simplificações para um primeiro trabalho e ser o ponto chave de partida para evolução do transporte ferroviário de carga geral. O modelo matemático desenvolvido serve para descrever o problema de forma universal, permitindo já avançar no segundo objetivo desta pesquisa que é testar a hipótese se o pátio tem ou não capacidade.

Como segundo objetivo, esta pesquisa busca desenvolver uma ferramenta de apoio na análise de capacidade de pátios ferroviários de classificação no longo prazo. Esta ferramenta deve servir como primeiro passo para identificar se o pátio tem ou não capacidade. Similar aos objetivos alcançados hoje com o uso da simulação, porém sendo uma ferramenta de fácil parametrização/*setup* para ser usada em qualquer *layout* de pátio. O tempo de execução deve ser, no máximo, de 1h para que a ferramenta possa ser aplicada na prática.

Esta pesquisa é inovadora por tratar de um problema da indústria ferroviária que tem sido pouco discutido com uma abordagem diferente da simulação. Além disso, traz o benefício de aproximar indústria e academia ao abordar um problema real.

Os demais capítulos estão organizadas como segue: no Capítulo 2 o problema é descrito com foco no pátio de interesse deste estudo, delimitando o escopo de atuação e as premissas assumidas. No Capítulo 3 são revisados os estudos já conduzidos no tema incluindo alguns aspectos da teoria de *scheduling* de produção e problemas relacionados. No Capítulo 4 o modelo matemático proposto para o problema é apresentado. No Capítulo 5 são detalhados os experimentos computacionais buscando a redução do tempo de processamento computacional. Finalmente, o Capítulo 6 contém as conclusões do estudo, seguidas das sugestões de trabalhos futuros.

2

Descrição do Problema

Este capítulo traz uma breve explicação dos diferentes tipos de pátios ferroviários existentes. Em seguida a operação no pátio de interesse deste estudo é detalhada. Por fim é apresentando o escopo de pesquisa, expondo as premissas adotadas.

2.1

Pátios Ferroviários

A malha ferroviária é composta por linhas de circulação (em geral, singelas) e pátios ferroviários. A Figura 2.1 ilustra uma parte da malha ferroviária da MRS. Os pátios ferroviários são um conjunto de segmentos de trilhos (linhas), ligados entre si de diversas maneiras através dos AMVs (Aparelhos de Mudança de Via), que também conectam esse conjunto às linhas de circulação. Para exemplos esquemáticos de pátios ferroviários ver Figura 1.1. Para uma percepção mais realista de um pátio ferroviário, a Figura 2.2 retrata parcialmente dois pátios ferroviários, o pátio Barreiro e o pátio km 460, ambos em Minas Gerais. Os AMVs também podem ser observados na Figura 2.2.



Figura 2.1: Representação de trecho da ferrovia operada pela MRS Logística

Dado que os veículos ferroviários (locomotivas e vagões) só circulam sobre trilhos, é impossível realizar ultrapassagem de trens, cruzamento de trens, alteração da ordem dos vagões no trem ou estacionamento de trens em um trecho de linha única (ou singela). Qualquer parada de veículos ferroviários ocasionaria um bloqueio da circulação e conseqüente congestionamento da



2.2(a): Pátio ferroviário Barreiro em Minas Gerais



2.2(b): Pátio ferroviário km 460 em Minas Gerais

Figura 2.2: Fotografia de pátios ferroviários

linha. Os pátios ferroviários, por serem um conjunto de segmentos de linhas, permitem todas as atividades citadas, na maioria das vezes sem a ocupação da linha principal (linha de circulação).

Existem diferentes tipos de pátios ferroviários que se distinguem pela sua função principal. Adaptando a classificação adotada por [7], os pátios podem ser categorizados em 5 tipos. São eles:

1. Terminais
2. Pátios de Cruzamento
3. Pátios de Estocagem
4. Pátios de Manutenção
5. Pátios de Classificação

Em seguida uma breve descrição de cada um dos tipos listados.

2.1.1 Terminais

Terminais são pátios cuja principal função é a carga ou descarga dos vagões. A disposição (*layout*) das linhas nos terminais depende do tipo de produto (grãos, celulose, minério de ferro, contêiner, bobina de aço, entre outros) e do equipamento usado na carga ou descarga (silo, moega, virador de vagões, ponte rolante, empilhadeira, pá carregadeira, *transteiner*, entre outros). Os terminais podem ficar localizados dentro das plantas dos clientes, conectados à malha ferroviária em algum pátio de classificação ou diretamente na linha de circulação.

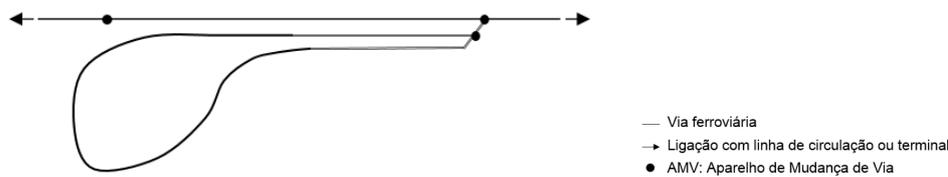


Figura 2.3: Exemplo de um terminal

2.1.2 Pátios de Cruzamento

Pátios de cruzamento são pátios cuja única função é permitir o cruzamento ou ultrapassagem de trens. Geralmente são compostos de uma única linha de comprimento maior que o comprimento dos trens, conectada à linha de circulação nas duas extremidades. Dessa forma, um trem pode ser estacionado temporariamente neste pátio enquanto outro trem cruza ou ultrapassa pela linha de circulação. Estes pátios também podem servir para estacionamento de vagões em períodos de baixa demanda, o que inutiliza o pátio para cruzamento ou ultrapassagem. Os pátios de estocagem, manutenção e classificação também podem atender às funções dos pátios de cruzamento, porém não sendo estas suas funções principais. A Figura 2.4 mostra um exemplo de *layout* de um pátio de cruzamento.

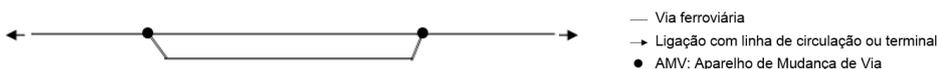


Figura 2.4: Exemplo de um pátio de cruzamento

2.1.3 Pátios de Estocagem

A principal função do pátio de estocagem é acomodar os trens até o momento da partida. Este tipo de pátio pode servir como um pulmão de vagões vazios ou carregados próximos aos terminais de carga ou descarga, respectivamente, evitando ociosidade nos terminais. Os *interchange yards* definidos por [7] também são pátios de estocagem onde os trens aguardam liberação para circular em outra ferrovia. A Figura 2.5 mostra um exemplo de *layout* de um pátio de estocagem.

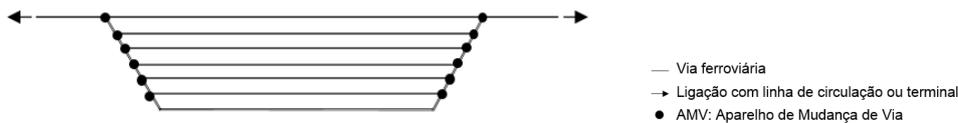


Figura 2.5: Exemplo de um pátio de estocagem

2.1.4 Pátios de Manutenção

Pátios de manutenção (por [7] *support function yards*) são pátios que dão acesso às oficinas de vagões e locomotivas, assim como estocagem de ativos avariados. Esses pátios são geralmente posicionados próximos aos pátios de classificação ou terminais. Em alguns casos, segmentos de trilhos podem ser compartilhados entre os pátios de manutenção e os outros tipos de pátios vizinhos. Na Figura 2.2(b) pode-se observar, à direita na foto, um galpão de manutenção com um pátio de manutenção ao lado.

2.1.5 Pátios de Classificação

Os pátios de classificação, também chamados de pátios de manobra, pátios de carga geral, *classification yards*, *shunting yards* ou *marshaling yards* compõem a principal categoria de pátios ferroviários. Nesses pátios é onde ocorre a triagem de vagões nos trens. Os vagões chegam em trens de chegada, são movimentados para uma nova sequência e redistribuídos formando os trens de partida. A Figura 2.6 ilustra as etapas do processo de classificação de vagões. Essa reorganização de vagões onera o tempo de trânsito de vagões. Bontekoning and Priemus [2] afirmam que, na Europa, o tempo de permanência dos vagões nos pátios de classificação podem chegar a 50% do tempo de trânsito, sendo representativo na competitividade do serviço ofertado.

Os pátios de classificação podem servir para simples passagem de trens (cruzamento ou ultrapassagem) quando não é necessária alteração na sequência

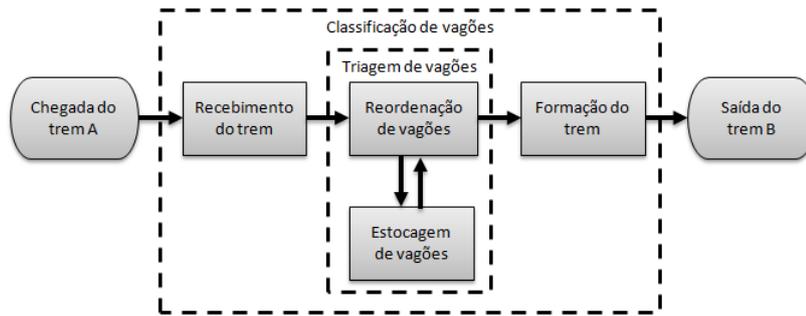


Figura 2.6: Etapas do processo de classificação de vagões em pátios planos

de vagões do trem. Também podem servir como pátios de estocagem caso o trem precise aguardar horário para partida ou liberação para entrar em outra ferrovia, como destacado por [1]. Além da redistribuição de vagões, também pode ocorrer a retirada de ativos avariados para oficina. Os pátios de classificação podem ter um ou mais pontos de ligação com a linha de circulação, com pátios de manutenção e com terminais. São por essas conexões que chegam os trens com vagões a serem classificados e saem os trens formados. A linha de circulação conecta um pátio de classificação aos demais pátios, terminais e oficinas da malha.

Os pátios de classificação podem ser do tipo plano ou do tipo *hump* quando avaliados a partir da força tratora que movimenta os vagões na etapa de triagem. Os pátios planos dependem de veículos tratores, em geral locomotivas, para movimentar os vagões. Nos pátios do tipo *hump*, existe uma região de pátio elevada, em rampa (*hump*), conforme ilustrado na Figura 2.7. Dessa forma, as locomotivas são usadas nas regiões planas ou na movimentação dos vagões no sentido de subida na elevação. Já no sentido de descida os vagões são movimentados pela força da gravidade. Alguns retardadores podem ser instalados para controlar a velocidade dos vagões.

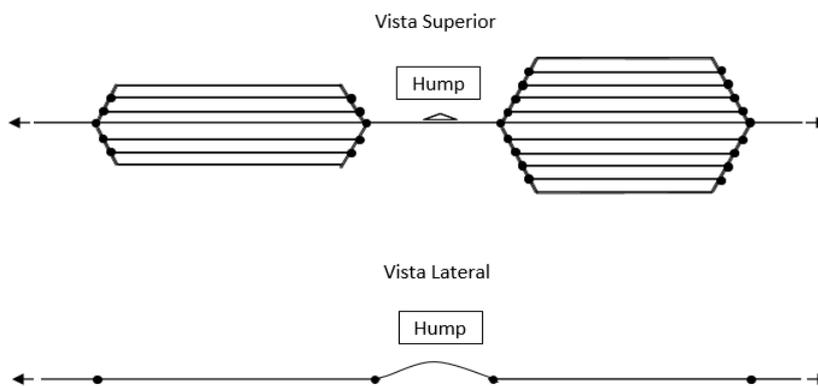


Figura 2.7: Pátio ferroviário do tipo hump

Os pátios de classificação também se diferenciam pelo número de sub-

pátios contidos no pátio. Cada sub-pátio é composto, geralmente, por um número de linhas paralelas conectadas entre si por AMVs nas extremidades. Em um pátio de classificação com 3 sub-pátios, cada sub-pátio fica destinado à uma etapa do processo de classificação de vagões. Os sub-pátios são denominados sub-pátio de recebimento, sub-pátio de triagem e sub-pátio de formação (adaptado de [7]). Já nos pátios de classificação com 2 ou menos sub-pátios, uma ou mais etapas do processo compartilham o mesmo sub-pátio.

O tipo do pátio de classificação depende da área disponível para construção, do orçamento e do volume de tráfego. A Figura 2.8 ilustra 3 pátios de classificação, com 3, 2 e 1 sub-pátios, respectivamente, sendo o primeiro do tipo *hump*. A linha que conecta um sub-pátio em outro é chamada de alça de manobra, local este elevado no caso de pátio do tipo *hump*. No pátio *hump* da Figura 2.8, por exemplo, a elevação acontece na alça de manobra de um dos lados do sub-pátio de triagem.

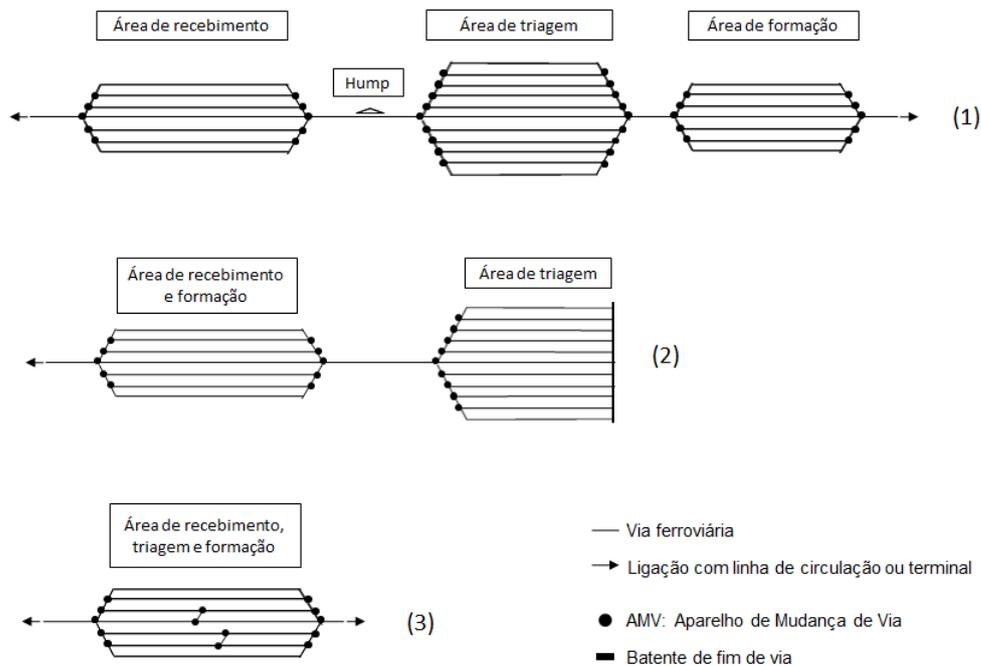


Figura 2.8: Pátios de classificação com diferentes composições de sub-pátios

Nos pátios com 3 ou 2 sub-pátios, a triagem dos vagões é feita movendo um conjunto de vagões do sub-pátio de triagem para a alça de manobra (com ou sem elevação), e em seguida distribuindo os vagões nas diferentes linhas do pátio de triagem. Dessa forma, a sequência desejada de vagões vai se formando. De acordo com [8], a triagem pode ocorrer utilizando-se da alça de manobra de apenas um ou dos dois lados do pátio de triagem. É possível, ainda, que haja uma terceira alça de manobra – uma linha conectando o AMV de um lado do sub-pátio de triagem ao AMV do outro lado.

Nos pátios de classificação com apenas 1 sub-pátio pode ou não haver alça de manobra. Nesse caso, a alça de manobra é uma linha conectando o pátio à linha de circulação. Não havendo distância suficiente para usar essa conexão como alça de manobra, a linha de circulação pode ser usada como alça de manobra. Porém, neste caso, a linha de circulação fica bloqueada para passagem de outros trens. Para permitir maior flexibilidade na triagem dos vagões, esses pequenos pátios de classificação podem apresentar AMVs internos, conectando quaisquer duas linhas do pátio.

Em [7], os autores destacaram uma categoria para os pátios de classificação planos de 1 sub-pátio que movimentam um número menor de vagões e são responsáveis por distribuir os vagões em uma pequena região. Esta classe foi chamada de *local switching yards*. Essa diferenciação faz sentido quando se compara o volume de vagões processados pelos pátios de 2 ou 3 sub-pátios (em geral, do tipo *hump*) com aquele processado por pátios de classificação com 1 sub-pátio. Esses pátios locais recebem um menor número de trens, sendo composto por um menor número de linhas ferroviárias. Os pátios de classificação com 1 sub-pátio são o foco deste estudo, suas características serão detalhadas a seguir.

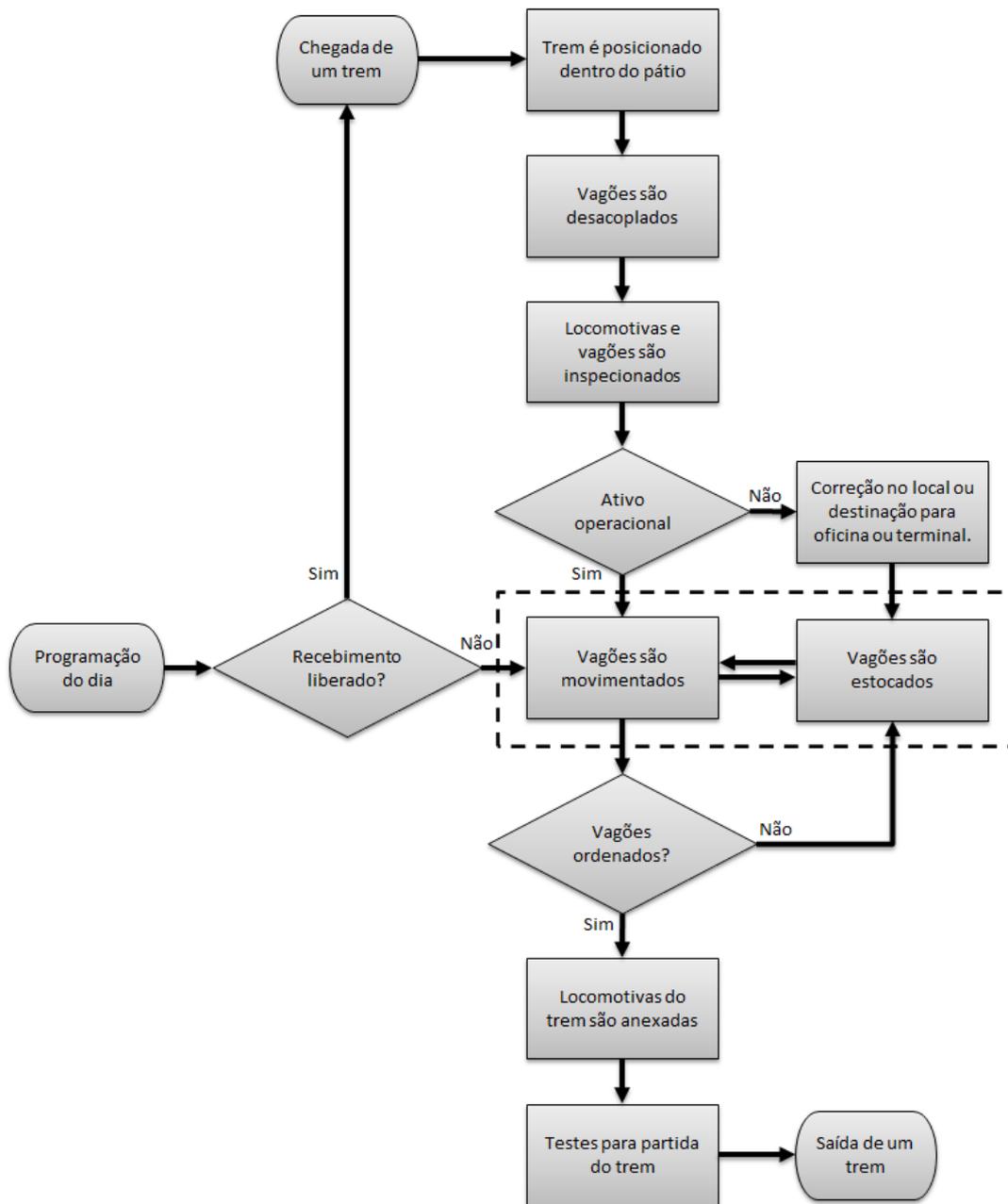
2.2

Operação em Pátios de Classificação Planos com 1 Sub-pátio

Esta pesquisa se concentra nos pátios de classificação planos com 1 sub-pátio, tendo por base a operação da MRS Logística. Estes pátios tem sido pouco estudados ao longo dos anos, apesar de existirem em várias ferrovias que transportam carga geral. Em ferrovias que trabalham com trens unitários, esses pátios não estão presentes. Em ferrovias com alta movimentação de carga geral, em regiões onde há território disponível para utilização ferroviária e, em geral, disponibilidade de capital para investir em infraestrutura, os principais pátios de classificação são do tipo *hump* com 3 sub-pátios, sendo os pátios planos com 1 sub-pátio localizados em regiões de pouca movimentação. É o caso das ferrovias americanas e canadenses. No Brasil, no entanto, como o investimento em infraestrutura ferroviária não foi priorizado ao longo dos anos, as ferrovias que transportam carga geral, como é o caso da MRS Logística, dispõem majoritariamente de pátios planos com 1 sub-pátio para atender a demanda de transporte de forma eficiente.

A nível operacional, o dia-a-dia de um pátio ferroviário de classificação plano com 1 sub-pátio contempla as etapas destacadas no fluxograma da Figura 2.6. Detalhando essas etapas, temos a Figura 2.9. A etapa de triagem é o principal processo de um pátio de classificação e está destacada na

Figura 2.9 com um contorno tracejado. Acima destas atividades destacadas estão as atividades referentes ao recebimento de trens e abaixo referente à formação de trens. Os principais responsáveis pela operação do pátio são o controlador de pátio e o manobrador. Para esta pesquisa consideramos que toda movimentação é produzida por locomotivas conduzidas por maquinistas. O controlador de pátio tem acesso à programação de trens do dia e determina as movimentações no pátio de acordo com a disponibilidade dos recursos: locomotivas, maquinistas (também chamado de equipagem), manobreadores e linhas ferroviárias.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1913223/CA

Figura 2.9: Fluxograma detalhado do processo de um pátio de classificação plano com 1 sub-pátio

O objetivo do controlador de pátio é garantir a execução da programação do dia a partir de sua interface com a circulação de trens da região, os terminais de clientes e oficinas de manutenção atendidos pelo pátio. O controlador de pátio avalia se o pátio tem espaço para receber os trens de chegada, seja pela circulação, por terminais de cliente ou por oficinas. Na falta de espaço, o controlador pode movimentar os vagões do pátio de forma a abrir espaço para o novo recebimento. Se o controlador não concordar em receber o trem, o mesmo fica parado em algum outro pátio, em terminal ou em oficina. Com o recebimento do trem liberado pelo controlador de pátio, o mesmo chega no pátio pelo ponto de chegada - ponto de conexão com a linha de circulação, terminais ou oficinas, os dois últimos atendidos pelo pátio.

Na etapa de recebimento do trem, o trem é posicionado completamente dentro do pátio. A partir daí a locomotiva do trem pode ser desanexada. A locomotiva que trouxe o comboio de vagões pode ou não participar da manobra dos vagões do pátio, sendo esses mesmos vagões ou outros. Durante a estadia dos vagões no pátio, em geral logo após a chegada dos trens, pode ocorrer uma etapa de inspeção dos vagões (podendo incluir locomotivas). Esta etapa é obrigatória nos casos de vagões vindos de terminais de clientes e não ocorre quando os vagões são originados de oficina. No caso de vagões avariados ou com carregamento apresentando inconformidades, os vagões são identificados podendo ou não ter seu problema resolvido no próprio pátio. Algumas equipes de manutenção fazem atendimento avançado dependendo da avaria. Não sendo possível solução no local, o vagão é separado e aguarda formação de trem com destino para oficina ou terminais (no caso de anomalia no carregamento).

A partir deste ponto os vagões entram na etapa de triagem onde são movimentados e estocados no pátio, de acordo com o plano de manobras do controlador de pátio, buscando formar os trens programados do dia. A movimentação de um vagão pode ocorrer de um ponto a outro de uma mesma linha, neste caso, em qualquer sentido. Também pode ocorrer movimentação de uma linha para outra, neste caso, obrigatoriamente, passando por, ao menos, um AMV. A locomotiva pode ser anexada em qualquer um dos dois lados do vagão e pode movimentar em qualquer um dos dois sentidos (puxando e recuando). Não existe limitação no número de movimentações de um vagão no pátio. Cada movimentação de um vagão ou de um comboio de vagões é realizado por locomotivas. Cada locomotiva tem uma limitação de capacidade de tração que deve ser respeitada. Caso uma locomotiva não atenda à necessidade instantânea, uma ou mais locomotivas podem ser anexadas ao comboio aumentando a capacidade total de tração.

Quando se alcança a sequência de vagões desejada para o trem de

saída, a locomotiva (ou conjunto de locomotivas) do trem é anexada, são realizados testes de segurança no trem e o mesmo circula deixando o pátio pelo ponto de conexão com seu próximo destino (linha de circulação, terminal ou oficina). Vagões de diferentes trens de chegada podem formar o mesmo trem de saída, exigindo aguardo dos vagões que chegaram primeiro no pátio. Os vagões que devem compor o trem (composição) são determinados pela equipe de programação, porém a sequência de vagões no trem é determinada pelo próprio controlador de pátio, respeitando as regras de segurança para formação de trem (diferença máxima de peso e comprimento entre vagões vizinhos, por exemplo) e buscando facilitar o trabalho de classificação dos próximos pátios. Alguns vagões podem não ser destinados a nenhum trem de saída para um determinado horizonte de tempo. Por exemplo, um controlador pode programar as atividades de pátio para os trens do dia, sendo alguns vagões destinados a trens do próximo dia. Neste caso, o vagão ocupa o pátio até o fim do horizonte de análise.

Um exemplo do processamento de 4 vagões em um pátio plano é apresentado na Figura 2.10. Um trem chega no pátio com 3 vagões (1-2-3). Então, o vagão 2 é enviado para o terminal de destino enquanto os vagões 1 e 3 seguem viagem, juntamente com o vagão 4 que já aguardava no pátio. O trem de saída deve respeitar a ordenação (1-3-4). O número de vagões em um trem de chegada ou saída é bastante variável, podem existir trens com apenas um vagão e trens com muitos vagões.

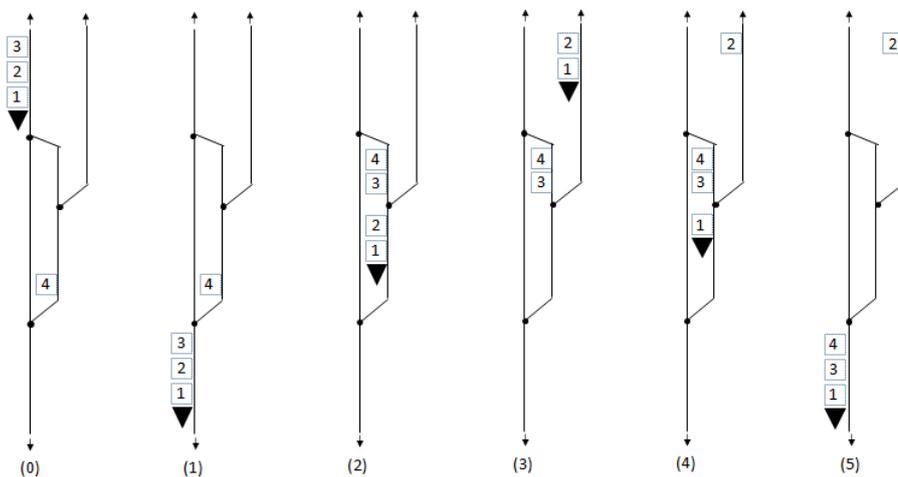


Figura 2.10: Exemplo de classificação de vagões em um pátio plano.

O fluxograma da Figura 2.9 apresenta as atividades do pátio no nível operacional. Para que essas atividades ocorram são necessárias informações produzidas por equipes de programação que, por sua vez, dependem de informações do time de planejamento que, por sua vez, dependem do time

estratégico. A Figura 2.11 lista as principais informações de entrada e saída em cada nível de planejamento.

| | Níveis de Planejamento | | | |
|---|--|---|---|--|
| | Operação | Programação | Planejamento | Estratégia |
| Horizonte | 1 dia | 1 semana | 1 - 12 meses | 1 - 5 anos |
| Informações de entrada (<i>input</i>) | Layout atual Demanda diária Regras de formação de trens Disponibilidade de ativos e equipagem Programação diária | Layout atual Demanda semanal Regras de formação de trens Disponibilidade de ativos e equipagem Plano e grade de trens | Layout atual Demanda anual Regras de formação de trens Disponibilidade de ativos e equipagem Indicações de modelo operacional | Layout atual Demanda plurianual Plano e grade de trens vigente |
| Informações de saída (<i>output</i>) | Registro das atividades realizadas | Programação diária | Plano e grade de trens Necessidade de ativos e equipagem | Projetos de expansão Indicações de modelo operacional |

Figura 2.11: Informações de entrada e saída em cada etapa de planejamento

Em cada nível de planejamento considera-se como informação de entrada a demanda do respectivo horizonte de planejamento. Quanto mais próxima do momento presente, mais aderente à demanda realizada de fato. As regras de formação de trens são consideradas em todas as etapas. Essas regras determinam capacidade de tração dos ativos, comprimento máximo de trem por trecho, capacidade máxima de arraste por trecho, diferenças máximas de peso e comprimento entre vagões permitidas, regras de segurança para transporte de produto perigoso, entre outras.

No nível de Estratégia, transforma-se a demanda plurianual em cenários de plano e grade de trens extrapolado a partir daqueles vigentes (válido no momento da análise). Esses cenários refletem, em geral, a maior demanda por mês ou dia. O plano de trens determina a frequência e a composição de cada trem enquanto a grade de trens determina os horários de partida e chegada de cada trem em cada pátio. Avalia-se então, se o *layout* atual do pátio tem capacidade para processar o cenário de plano e grade de trens elaborado a partir da demanda plurianual. Em caso de falta ou risco de falta de capacidade,

projetam-se expansões para o *layout* atual de forma a atender à demanda apresentada.

As ferramentas disponíveis atualmente para avaliação de capacidade de pátios são ferramentas analíticas ou simulação, dois extremos. As ferramentas analíticas comparam a demanda em metros de vagões com a capacidade em metros de pátio, considerando um tempo de ocupação esperado de cada trem em cada pátio. Sendo assim, esta é uma ferramenta simples de ser parametrizada, porém o cálculo é estático, não considerando as complexidades de movimentações de vagões, portanto a qualidade da resposta é baixa. Já a simulação representa de forma fidedigna todas as regras de negócio de cada pátio. As movimentações são representadas com precisão, gerando uma resposta de alta qualidade, porém demandando um grande esforço de parametrização. A cada novo *layout* de pátio ou a cada alteração de um mesmo *layout*, é necessário uma nova série de regras de decisão a serem parametrizadas.

Este estudo de capacidade considera uma análise de risco dadas as incertezas envolvidas na demanda plurianual. Podem ser testados diferentes cenários de *layouts*, plano e grade de trens até alcançar uma intervenção de melhor custo-benefício. As menores intervenções em pátios superam R\$ 500 mil e demoram mais de 1 ano até a entrega, por isso o estudo de capacidade do pátio e a decisão por projetos de expansão devem ser feitos no horizonte estratégico.

Do nível de Planejamento em diante, o *layout* de pátio considerado é o vigente. No Planejamento é determinado o plano e a grade de trens buscando atender a demanda anual (ou mensal) esperada. Caso a frequência de trens supere a capacidade da malha ferroviária determinada, então espera-se que parte da demanda não seja atendida. Neste caso consideram-se as indicações de plano e grade de trens indicada no estudo estratégico buscando atender ao máximo a demanda. Com a determinação do plano e grade de trens, é calculada a necessidade de ativos (locomotivas e vagões) e equipe para atender ao plano e grade desenhados.

O time de Programação, então, determina a programação de trens. Ou seja, determina quais vagões irão compor cada trem. A programação de trens respeita o plano de trens pré-determinado, porém atendendo a demanda semanal. O tamanho dos trens pode variar frente ao planejado e alguns trens podem ser suprimidos. Nesta etapa também é feita a programação de equipagem, associando os maquinistas aos trens.

Finalmente, na etapa de Operação, a Programação é realizada, podendo ocorrer alguns desvios por conta da diferença entre a demanda semanal e a demanda efetiva do dia. É no nível operacional que o controlador de pátio

elabora e o manobrador cumpre o plano de manobras, resultando no registro das atividades realizadas.

2.3

Escopo de pesquisa

Esta pesquisa foca no nível de planejamento estratégico buscando uma método de análise meio termo entre as ferramentas analítica e simulação existentes hoje. Determina-se se um *layout* qualquer de pátio ferroviário plano de classificação com 1 sub-pátio necessita ou não de projetos de expansão de *layout* a partir da avaliação do tempo de processamento da demanda prevista para o mesmo. Alterações de *layout* como a inclusão de um AMV ou uma nova linha se traduzem como um novo pátio a ser avaliado. O pátio de classificação é um nó importante na malha ferroviária que, sendo gargalo, restringe a capacidade de atendimento às demandas, gerando perda de produção.

Esta pesquisa busca definir o problema via programação matemática e desenvolver um método capaz de responder se um pátio ferroviário (com 1 sub-pátio) tem capacidade de atender à demanda planejada. É necessário que tal método seja replicável para diferentes *layouts*, que retorne uma resposta de qualidade próxima à simulação e que consuma um tempo adequado de parametrização *setup* e processamento computacional.

Matematicamente, a medição da capacidade de processamento do pátio pode ser interpretada como um problema de otimização por *scheduling*. O objetivo é processar o maior número de trens (ou vagões) o mais rápido possível. Se toda a demanda for processada dentro de uma janela de tempo aceitável, então, pode-se concluir que o pátio ferroviário tem capacidade de processar toda a demanda.

2.4

Premissas

É esperado que um bloco de vagões do mesmo tipo, com a mesma origem, o mesmo destino e o mesmo peso bruto, siga por todo o circuito sem que haja separação dos vagões. Nestes casos, o bloco de vagões pode ser tratado como um vagão único de maior comprimento. Neste trabalho, os blocos de vagões são referidos apenas como vagões para facilitar o entendimento.

Como em [1], este trabalho se restringe a um modelo *offline* onde todos os parâmetros de entrada são conhecidos. Na MRS Logística, os trens de carga geral têm sua composição de vagões previamente definida (dados pelo plano de trens), assim como sua rota de parada em pátios de classificação e os respectivos horários de partida e chegada em cada pátio (dados pela grade de trens). Como

o modelo de otimização é aplicado a um pátio específico, pode-se considerar que os demais elementos do sistema não sofrerão alteração. Assim, assume-se o plano e a grade de trens de carga geral planejados para determinar quais vagões compõem cada trem e quais os horários de chegada dos trens no pátio.

A sequência dos vagões no trem, no entanto, não é determinada na grade de trens de carga geral, mas deve obedecer às regras de formação de trem, que são estabelecidas para garantir uma circulação segura. As principais regras são: ordenação dos vagões mais pesados para os mais leves, sendo os mais pesados conectados à locomotiva e diferença máxima de peso e comprimento permitida entre vagões vizinhos. O tipo de cada vagão, com suas características de peso e comprimento, é conhecido previamente por ser determinado pela demanda. Sendo assim, existe um conjunto possível de ordenação para cada trem, e uma ordenação viável de cada trem deve ser escolhida como *input* do modelo.

Na operação ferroviária, parâmetros como horário de chegada e formação do trem podem variar diariamente. Porém, para este estudo, considerando uma avaliação estratégica de capacidade, estes parâmetros são definidos *a priori*. Garantindo a funcionalidade deste método proposto, outros cenários podem ser elaborados e testados no modelo matemático de forma independente, obtendo-se uma função de capacidade do pátio dado o cenário de entrada. Outras atividades que acontecem no dia-a-dia da operação como inspeção dos trens de chegada e saída, testes para partida do trem e estocagem de vagões com problemas mecânicos também não são consideradas neste estudo devido ao interesse de avaliar a capacidade do pátio num nível estratégico. As atividades de inspeção e testes para partida requerem um tempo irrelevante quando comparado ao tempo dedicado à classificação dos vagões. Além disso, a frequência de desanexação de vagões por problemas mecânicos é muito pequena.

A análise independente de um pátio de classificação significa avaliar isoladamente um nó do sistema ferroviário. É esperado que o *output* desta análise isolada influencie os demais pátios de classificação e linhas de circulação do sistema. Neste estudo é considerada a análise isolada de cada pátio.

Neste estudo, o *layout* do pátio é delimitado por conhecimento tácito da operação ferroviária de cada pátio. Para cada pátio é determinado um ponto na linha onde termina o pátio de classificação e começa a linha de circulação, terminal ou oficina. Os pontos de origem ou destino dos trens se darão em algum desses pontos de limite do pátio. Desta forma, o pátio de classificação pode receber/enviar trens de/para oficinas, terminais e linhas de circulação. Toda a movimentação de vagões ficará restrita às linhas dentro dos limites do pátio de classificação.

Neste estudo não é considerado o tempo de deslocamento dos manobreadores que precisam acompanhar o deslocamento de vagões quando a movimentação acontece no sentido oposto à posição da locomotiva (cobertura de cauda) e, que também precisam executar a mudança de direção do AMV, pois a maioria dos AMVs são manuais. Esse tempo de deslocamento é relevante na triagem dos vagões a nível operacional, sendo, para um estudo estratégico, traduzido no tempo de movimentação dos vagões. Ou seja, considera-se, no tempo de movimentação do vagão, um acréscimo do tempo de movimentação do manobrador.

A simplificação mais crítica neste estudo é ignorar a existência de locomotivas nas movimentações de vagões. No modelo matemático proposto neste estudo, toda a ocupação do pátio por vagões e a movimentação dos vagões é considerada para definição se foi ou não possível o processamento de toda a demanda de vagões considerada. No entanto, não é levada em consideração a ocupação do pátio por locomotivas e a necessidade de se ter uma ou mais locomotivas anexadas ao comboio de vagões para que haja a movimentação. A inclusão das locomotivas no modelo geraria uma complexidade não desejada inicialmente. Além disso, este aspecto pode ser ignorado por se tratar de horizonte estratégico, sendo possível redistribuição ou aquisição de locomotivas para operação nos pátios onde for exigido incremento de frota.

Mesmo com as simplificações frente à operação que ocorre no dia-a-dia, a metodologia apresentada tem relevância para o planejamento estratégico da ferrovia. Considerando tempos de movimentação conservadores, podemos chegar às seguintes conclusões:

1. Se toda a demanda for processada com folga, ou seja, em um tempo total bem menor que o tempo máximo permitido, então poderemos dizer com segurança que o pátio tem capacidade de processar toda a demanda sem nenhuma alteração no *layout*.
2. Se toda a demanda for processada dentro do tempo, porém próximo ao tempo total máximo permitido, mesmo em cenários diferentes de plano e grade de trens, então poderemos dizer que será necessário uma avaliação mais detalhada deste pátio. Sendo necessário uso de outras ferramentas, como exemplo a simulação.
3. Se toda a demanda for processada além do tempo total máximo permitido, mesmo em cenários diferentes de plano e grade de trens, então poderemos dizer que será necessário investimentos que promovam melhorias no *layout*. A partir de então, será necessário um estudo mais

detalhado como no item anterior. Neste caso, porém, ainda pode-se utilizar a ferramenta proposta alterando o *layout* do pátio de classificação de diferentes formas, para novas conclusões. A alteração de *layout* de menor custo que permitir o processamento de toda a demanda dentro do tempo total máximo permitido indicará o investimento a ser priorizado no estudo detalhado.

Sendo assim, qualquer solução obtida pelo método proposto que permita ao especialista concluir pelo item 1 é uma solução efetiva, mesmo não sendo a ótima. Para concluir os itens 2 e 3, a solução ótima é mais eficaz. Uma solução não ótima pode indicar uma necessidade de estudo detalhado incorreta. Ainda assim, eliminação de alguns pátios de classificação da necessidade de um estudo detalhado é melhor que o cenário atual onde quase todos os pátios seguem para estudo detalhado por falta de uma ferramenta mais rápida que permita este filtro.

No próximo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica no tema avaliação de capacidade de processamento de vagões em pátios planos de classificação.

3

Revisão de Literatura

Este capítulo apresenta uma visão geral histórica do problema de classificação em pátios ferroviários planos com foco em abordagens para avaliar a capacidade do pátio ou para avaliar sua eficiência. Há, ainda, uma breve revisão sobre conceitos de *scheduling* de produção, útil para a modelagem matemática do problema pesquisado. Além disso, a última seção reúne trabalhos que discutem problemas que se relacionam com o processo de classificação de vagões em pátios planos e que subsidiam os métodos propostos neste estudo.

3.1

Sobre Cálculo de Capacidade em Pátios Ferroviários de Classificação

A primeira revisão encontrada com foco em pátios de classificação ferroviária remonta a 1975 [7]. Tal relatório técnico elaborado para o Departamento de Transportes dos Estados Unidos teve como objetivo compilar os estudos sobre o tema até aquela data e fornecer uma descrição introdutória dos processos nos pátios ferroviários com ênfase nos pátios de classificação. O relatório também traz percepções práticas relevantes de ferroviários entrevistados. Naquele trabalho, os autores definem os pátios de classificação como um nó na rede ferroviária onde os vagões chegam em trens que são desacoplados, separados e acoplados em um novo trem de partida. Os pátios de classificação discutidos tem três conjuntos de linhas paralelas: linhas de recepção, linhas de triagem e linhas de formação. A figura 2.8 (1) ilustra o pátio de classificação descrito pelos autores. Para pequenos pátios locais de classificação, os autores afirmam que é possível ter pátios com apenas um grupo de linhas compartilhando as etapas de recebimento, triagem e formação. No entanto, esse tipo de *layout* não foi o foco do relatório e não foi declarado a presença de AMVs ligando as linhas no interior do pátio, exceto por um ou dois nas extremidades semelhantes à área de triagem na Figura 2.8 (1). Além disso, trazem à tona algumas das mais avançadas ferramentas de estudo de operação de pátio para a época, que se baseiam em simulações, sendo os modelos desenvolvidos principalmente pelo pessoal ferroviário, embora ainda não sendo amplamente utilizados devido às dificuldades de compilar todos os dados necessários como *input* para o modelo.

De acordo com Hansmann, em sua tese de doutorado [9], as estratégias

para maior eficiência na triagem de vagões remontam a 1880 quando o método baseado em regras de Further foi aplicado na prática. Tal técnica de classificação funciona para qualquer trem de chegada, uma vez que geralmente há um grande número de linhas de triagem e muitas movimentações entre a alça de manobra e as linhas paralelas do pátio para concluir a classificação. Pela simplicidade de serem aplicados, os métodos baseados em regras (simultâneos, triangulares e geométricos, por exemplo) estiveram no centro das pesquisas pelos vinte anos seguintes. A capacidade de processamento de um pátio de classificação por esses métodos, no entanto, é uma consequência, e não o objetivo. De acordo com o autor, a primeira abordagem tomando como objetivo a eficiência da classificação para então gerar um plano de manobras foi uma otimização matemática introduzida em 1967 pelo Grupo de Pesquisa Operacional da *Schweizer Bundesbahnen*.

Complementando as técnicas de simulação citadas por [7] e a otimização citada por [9], funções estatísticas (baseadas em teorias de filas ou não) também tiveram destaque na busca pela determinação da capacidade de processamento de pátios ferroviários. Assad (1980) [10] explora essa abordagem analítica em sua revisão. O autor comenta a existência de pequenos pátios em que os processos de recebimento, triagem e formação compartilham as mesmas linhas, no entanto, não cita nenhum estudo referente a esse tipo de pátio.

A Tabela 3.1 lista os principais trabalhos sobre pátios ferroviários de classificação, de 1955 a 2019, destacando o método de cálculo de capacidade aplicado. O Gráfico 3.1 resume a Tabela 3.1 corroborando com Hansmann, que em sua tese [9] publicada em 2010, já indicou um interesse crescente de estudo de pátios ferroviários de classificação por abordagens de otimização matemática e heurísticas, a maioria dos quais relacionados à modelagem por meio de coloração de grafos, *scheduling* ou empacotamento. O Gráfico 3.1 mostra um crescente interesse na otimização também na última década. Mesmo para os trabalhos que trazem uma abordagem heurística ou meta-heurística para resolução do problema, a modelagem matemática está presente, como acontece nos casos [8], [11], [12], [13], [14] e [15].

Tabela 3.1: Resumo dos artigos revisados indicando o método de cálculo da capacidade de processamento de um pátio ferroviário

| Ano da publicação | Referência | Método de Cálculo |
|----------------------------|------------|---|
| 1955 | [16] | Teoria de filas com simulação de Monte Carlo |
| 1975 | [7] | Modelos de simulação |
| 1977 | [17] [18] | Teoria de filas |
| 1982 | [19] | Modelo de simulação |
| 1982 | [20] | Teoria de filas |
| 1982 | [21] | Função baseada em probabilidade |
| 1983 | [22] | Algoritmo usando técnicas de triagem e programação dinâmica |
| 1983 | [23] | Funções baseadas em métodos de classificação: triagem por bloco, por trem ou triangular |
| 1986 | [24] | Funções baseadas em métodos de classificação |
| 1987 | [25] [26] | Função baseada em métodos de classificação que variam durante o horizonte de análise |
| 1987 | [27] | Modelo de simulação |
| 1989 | [28] | Teoria de filas |
| 2000 | [14] | Modelo de partição de sequência mínima e algoritmos construtivos |
| 2003 | [29] | Modelagem por redes de Petri |
| 2003 | [30] | Otimizador Branch & Bound paralelo |
| 2003 | [31] | Modelo de Programação Inteira Mista e variadas heurísticas |
| 2003 | [32] | Modelo de simulação |
| 2004 | [33] | Algoritmo construtivo |
| 2005 | [34] | Modelo de Programação Inteira Mista |
| 2006 | [35] | Equações estatísticas |
| Continua na próxima página | | |

Tabela 3.1 – continuação da página anterior

| Ano da publicação | Referência | Método de Cálculo |
|----------------------------|------------|--|
| 2008 | [8] | Algoritmo baseado no modelo de partição de sequência mínima |
| 2008 | [11] | Modelo de programação inteira baseado em <i>scheduling</i> de produção e coloração de grafos |
| 2008 | [36] | Modelo de simulação |
| 2009 | [37] | Algoritmo de atribuição dinâmica |
| 2009 | [38] | Simulação de eventos discretos |
| 2010 | [39] | Algoritmo baseado em colônia de formigas e simulação |
| 2011 | [40] | Meta-heurística <i>simulated annealing</i> |
| 2015 | [41] | Modelo de programação inteira mista |
| 2015 | [42] | Funções estatísticas e modelo de simulação |
| 2016 | [4] | Modelo de otimização baseada em <i>scheduling</i> de produção |
| 2016 | [15] | Modelo de programação inteira mista e heurística baseada no método de busca harmônica |
| 2017 | [43] | Modelo de programação inteira com inicialização |
| 2017 | [44] | Modelo de programação inteira mista baseado no problema de partição de grafos |
| 2017 | [45] | Funções estatísticas baseadas em resultados de simulação |
| 2018 | [46] | Modelo de programação linear inteira mista |
| 2018 | [13] | Modelo de programação inteira mista e heurísticas |
| 2018 | [12] | Modelo de programação inteira binária e meta-heurística baseada em VNS |
| Continua na próxima página | | |

Tabela 3.1 – continuação da página anterior

| Ano da publicação | Referência | Método de Cálculo |
|-------------------|------------|--|
| 2019 | [47] | Heurística de busca local impulsio- nada por aprendizado de máquina (<i>Deep Graph Convolutional Neural Network</i>) |

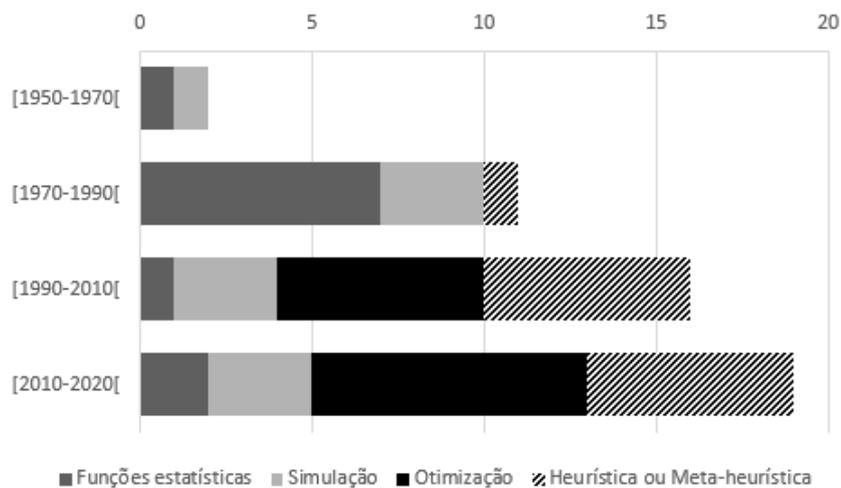


Figura 3.1: Métodos para cálculo de capacidade de pátios ferroviários aplicados ao longo dos anos

Com foco na modelagem matemática para otimização, em 2008, Hansmann e Zimmermann [8] se concentraram no processo de triagem que ocorre na área de mesmo nome do pátio. Os autores, então, chamaram o problema de classificação de vagões de forma eficiente de *Sorting of Rolling Stock Problem* (SRSP). Eles também introduziram uma estrutura para organizar os diferentes tipos de problemas de classificação de vagões que podem existir baseando-se na notação usada para a teoria de *scheduling* de produção. Nessa estrutura, os autores definem a categoria SRSP pela combinação dos seguintes aspectos: topologia do pátio, modo de classificação e estrutura da sequência de saída. A topologia do pátio é definida como na Figura 2.8 (1). O modo de classificação identifica a maneira de puxar uma fileira de vagões e classificá-los através das linhas de classificação. A estrutura da sequência de saída é determinada pelo modo em que a sequência de saída deve ser ordenada. Em seu artigo, uma aplicação real usando uma abordagem heurística é mostrada para o pátio do tipo *hump* da BASF, *The Chemical Company* usando um algoritmo aplicado a um problema de partição de sequência mínima.

A última revisão publicada sobre o tema é de Bohlin, Hansmann, e Zimmermann (2018) [1]. Em seu artigo, os autores comentam que a maior parte da pesquisa sobre otimização de pátios ferroviários de classificação se concentrou nas ferrovias dos Estados Unidos. Isso pode justificar porque os *layouts* estudados foram, em sua maioria, grandes pátios do tipo *hump*. Dos 19 artigos revisados por [1] que apresentam modelagem matemática para o problema, todos são desenvolvidos com foco nos pátios mostrados na Figura 2.8 (1). As duas aplicações em pátios reais apresentadas pelos autores também se restringem aos pátios do tipo *hump*. Os autores também afirmam não ter encontrado aplicações de otimização matemática na literatura para definir o melhor *layout* de pátio.

Da literatura revisada, os *layouts* de pátios planos apresentados na Figura 1.1 não tiveram nenhuma atenção ao longo dos anos. O foco tem sido grandes pátios de classificação do tipo *hump* que têm vinte ou mais linhas paralelas na área de triagem. O trabalho de Sabino et al. (2010) [39] é o que apresenta o *layout* do pátio mais semelhante aos de interesse desta pesquisa. No entanto, os autores estavam interessados em um problema de nível operacional de atribuição de locomotivas para mover grupos de vagões pelo pátio, usando a alocação da seção da linha para cada bloco de vagões (plano de manobra) como dado de entrada para o modelo. O objetivo dos autores é minimizar os custos operacionais de uso da locomotiva e a solução desenvolvida envolveu um algoritmo de otimização de colônias de formigas. Os autores também comentaram sobre o desenvolvimento de um modelo de simulação que estabelece todas as ordens de movimento para cada grupo de vagões, usando isso como dado de entrada para o modelo de otimização, considerando apenas um grupo de vagões em cada linha.

Adlbrecht et al. [41] e Jaehn, Otto e Seifried [13] apresentaram modelos de otimização aplicados a pátios planos, porém com características de processo simplificadas frente ao tratado neste estudo. Adlbrecht et al. [41] consideram a classificação de blocos de vagões para a formação de trens de saída com apenas uma locomotiva. Esse processo, apesar de considerado independente na modelagem dos autores, complementa a classificação por *hump* realizada no mesmo pátio, porém em outro conjunto de linhas. O pátio plano considerado é um conjunto de linhas paralelas acessado apenas por um lado, assim como em [13], que trata da formação de um trem com vagões específicos em uma sequência arbitrária. A classificação dos vagões foi modelada em [13] através de uma programação inteira mista. Algumas heurísticas foram testadas para solução porém com desempenho inferior ao esperado.

Alguns dos artigos revisados mencionaram a resolução de problemas de

classificação em pátios planos, mas neste caso, os *layouts* dos pátios eram semelhantes aos apresentados na Figura 2.8 (1) porém sem nenhuma elevação na região do *hump* como em [33] e [48]. Soluções para este tipo de pátio não são úteis para o problema dessa pesquisa, pois apresentam características mais restritivas, como a passagem apenas pelas vias de entrada ou saída. A diferença para a classificação em pátios planos apresentada na Figura 2.8 (3) é que os movimentos do vagão podem ser feitos passando por AMVs espalhados ao longo das extensões das linhas. O movimento usando a faixa de entrada ou saída é possível, mas não se limita a este tipo, o que dá mais flexibilidade ao processo de classificação, além de possuir mais de duas conexões de entrada/saída, o que permite receber ou embarcar trens em várias direções.

A partir da revisão de literatura realizada pelos autores, conclui-se que o trabalho aqui apresentado é pioneiro por focar esforços na modelagem via programação matemática do problema de classificação de vagões em pátios planos com 1 sub-pátio e variados *layouts*. A abordagem escolhida, alinhada ao estado evolutivo das abordagens estudadas, é a programação matemática baseada na teoria de *scheduling* de produção.

3.2

Sobre *Scheduling*

Esta seção traz elementos da teoria de *scheduling* de produção segundo Pinedo (2008) [5] e sua associação com o problema do pátio de classificação.

A teoria de *scheduling* de produção é uma estrutura para modelar via programação matemática problemas com base no ambiente de manufatura que busca o uso eficiente de recursos. A sua primeira aparição como área independente data da década de 1950. A partir daí, essa teoria reuniu muitos adeptos evoluindo o enfoque das pesquisas. Potts e Strusevich (2009) [49] em sua pesquisa sobre o tema resumiram os desenvolvimentos no campo da seguinte maneira: por volta dos anos 1950-1960, a ênfase estava no desenvolvimento de novos modelos e na aplicação de análise combinatória para construir algoritmos. Mais tarde (anos 1960-1970), a principal novidade era *branch and bound*, com problemas mais complexos. Pinedo adiciona programação dinâmica e formulações de programação inteira para este período [5]. Na terceira década (1970-1980), o desenvolvimento principal foi teórico, definindo-se diferentes classes de problemas de *scheduling*; por volta dos anos 1980-1990, algoritmos de aproximação e abordagens heurísticas para resolver problemas de *scheduling* ganharam destaque. Nesta época, os softwares voltados a solucionar problemas de *scheduling* começaram a ser construídos para uso prático [5]; a partir da década de 1990, os modelos de *scheduling* incorporaram ca-

racterísticas mais complexas para imitar o cenário real e passaram a ser mais amplamente aplicados na prática.

As diretrizes gerais para modelagem de problemas com base na teoria de *scheduling* de produção consistem em um conjunto finito de tarefas (*jobs*) a serem processados, geralmente denotados por $j \in J = \{1, \dots, n\}$ e outro de máquinas que irão processar as tarefas, geralmente denotados por $i \in I = \{1, \dots, m\}$. As tarefas devem passar por uma sequência de operações para serem concluídos e cada máquina está apta a realizar determinadas operações, cada operação levando um determinado tempo e, durante esse tempo, a tarefa atribuída preenche a capacidade da máquina. O_j^i , que é uma variável teórica, usada para explicar o modelo porém não usada na modelagem, geralmente se refere à atividade da tarefa j na máquina i . A questão a ser respondida pelo modelo é como melhor agendar as tarefas através das máquinas, sequenciadas no tempo, na busca pela otimização da função objetivo e respeitando as características do ambiente de manufatura. Esta programação matemática leva a um problema de otimização combinatória. A variável que geralmente descreve o cronograma calculado é y_{ij} que expressa a hora de início do processamento da tarefa j na máquina i .

A função objetivo deve ser escolhida de forma a beneficiar os objetivos da vida real para o problema de interesse. Alguns modelos podem utilizar funções multi-objetivos mais complexas. Como um exemplo mais simples, algumas das funções objetivo regulares listadas por Pinedo [5] são apresentadas abaixo.

Minimizar o *makespan* (normalmente denotado por $Min C_{max}$): minimiza o tempo da conclusão da última tarefa (finalizando todo o processamento necessário em todas as máquinas).

Minimizar o atraso máximo (geralmente denotado por $Min L_{max}$): minimiza o intervalo máximo de tempo entre a conclusão da tarefa j e sua data de vencimento, que é positivo quando a conclusão do trabalho ocorre após a data de vencimento.

Minimizar o atraso total (normalmente denotado por $Min \sum T_j$): minimiza a soma de todos os atrasos das tarefas. Cada atraso de tarefa tem valor 0 no caso da conclusão do trabalho ser antes da data de vencimento. Caso contrário, contabiliza-se a diferença entre o tempo de conclusão e a data de vencimento.

Minimizar o número de trabalhos atrasados (normalmente denotado por $Min \sum U_j$): minimiza a contagem de todas as tarefas concluídas após suas datas de vencimento.

O ambiente de manufatura pode ser descrito com base na disposição das máquinas no chão de fábrica. Os possíveis ambientes listados por Pinedo [5]

são reproduzidos a seguir.

Máquina única: apenas uma máquina para processar todas as tarefas.

Máquinas em paralelo: existe um subconjunto de máquinas em paralelo para que a tarefa j possa ser processada em qualquer uma delas. As máquinas no subconjunto podem ter velocidades de processamento idênticas ou diferentes.

Flow shop: todas as m máquinas são dispostas em série e cada tarefa j deve passar por todas as máquinas na mesma sequência.

Flow shop flexível (ou híbrido, ou multiprocessador): há um conjunto de estágios em série e cada tarefa j deve passar por todos os estágios na mesma sequência. Em cada estágio, existe um subconjunto de máquinas paralelas.

Job shop: cada tarefa tem uma sequência predefinida de operações e deve passar pelas máquinas nessa sequência predefinida.

Job shop flexível: cada tarefa tem uma sequência predefinida de operações e deve passar pelos estágios dessa sequência predefinida. Cada estágio possui um subconjunto de máquinas paralelas.

Open shop: cada tarefa j deve passar por todas as máquinas m , porém a rota (ou sequência de máquinas) para cada tarefa pode ser diferente.

Além da função objetivo e do ambiente da máquina, outros fatores contribuem para que o modelo expresse as características e restrições de processamento. Alguns dos fatores comumente aplicados e descritos em [5] estão listados abaixo.

Tempo de processamento (normalmente denotado por p_{ij}): o tempo de processamento da operação da tarefa j na máquina i .

Data de liberação (*release date*) (normalmente denotada por r_j): momento em que a tarefa j chega ao sistema, ou seja, quando ela pode ter sua primeira operação iniciada.

Data de vencimento (normalmente denotada por d_j): momento em que uma tarefa j deve ser concluída, ou seja, seu prazo (*deadline*).

Peso (normalmente denotado por w_j): um valor de prioridade da tarefa j quando comparada às outras tarefas.

Preemption: permissão para interromper o processamento de uma tarefa j em uma máquina antes de sua conclusão. Nesse caso, a tarefa j deve terminar a operação interrompida em um instante posterior na mesma máquina ou em outra máquina, no caso de máquinas paralelas.

Precedência: um requisito de que a tarefa j pode iniciar sua operação somente após outra tarefa ter completado algumas de suas operações.

Tempos de *setup* (normalmente denotados por $s_{jj'}$): o tempo necessário entre tarefas para processar a tarefa j seguida pela tarefa j' .

Processamento em lote: a capacidade de uma máquina de processar mais de uma tarefa por vez. Nesse caso, o tempo de processamento de todas as tarefas pode ser igual ao da última tarefa concluída.

Quebras: períodos em que algumas máquinas não estão disponíveis para realizar o processamento das tarefas.

Recirculação: permissão para que uma tarefa seja processada pela mesma máquina (ou estágio) mais de uma vez.

Disciplina de fila: regra de gerenciamento do estoque intermediário. As tarefas não podem esperar entre quaisquer operações consecutivas (**sem espera**). Quando a área de estocagem que precede a máquina tem capacidade limitada, as tarefas podem esperar na máquina anterior impedindo sua próxima operação (**bloqueio**). Ainda assim, todas as filas intermediárias podem seguir a disciplina FIFO (*First In First Out*).

Apesar de classificar o ambiente de manufatura nessas características, Pinedo [5] afirma que outros problemas podem ainda conter outros aspectos. No entanto, a teoria de *scheduling* de produção pode ser aplicada nesses casos através da adoção de novas restrições.

3.3

Problemas Correlatos

Uma abordagem usando a teoria de *scheduling* de produção aplicada a problemas de classificação de pátio foi apresentada por Guo et al. [4]. Naquele artigo, os autores apresentaram um modelo de programação matemática para o problema de classificação de vagões em um pátio do tipo *hump*, com ênfase no horizonte tático de planejamento. Neste estudo, a modelagem matemática permite decisão quanto à formação dos trens de saída, ou seja, a ordenação dos vagões no trem. Porém, os autores não detalharam as etapas de classificação para restringi-la pelo comprimento ou disposição das linhas (*layout*). No exemplo apresentado pelos autores, presume-se que o pátio sempre tenha capacidade suficiente para processar um trem por vez. Por premissa, na modelagem proposta por [4], vagões que chegam no mesmo trem, devem sair no mesmo trem.

Outra abordagem utilizando *scheduling* de produção aplicada a um problema no contexto ferroviário foi apresentada por Lange e Werner [3]. Os autores aplicaram esta abordagem em um problema de circulação de trens em linha singela (uma única linha de circulação) como um problema de *job shop* com restrições de bloqueio. Uma de suas formulações MIP, com variáveis de

precedência, possui uma restrição para garantir o bloqueio da máquina, que serviu de inspiração para o modelo desenvolvido nesta dissertação.

Kroon, Lentink e Schrijver [11] modelaram a classificação de vagões para trens de passageiros através de um MILP baseado na teoria de *scheduling*. Os autores criaram uma restrição para bloquear o cruzamento de unidades de trem através do mesmo trilho, que inspirou esta dissertação. A restrição elaborada pelos autores não permite que dois trens troquem de seções de linha ao mesmo tempo, o que é fisicamente impossível.

4

Modelo Matemático

O problema de classificação de vagões em pátios planos de classificação com 1 sub-pátio aqui apresentado foi baseado na teoria de *scheduling* de produção, tomando como base os conceitos e notação apresentados por [5]. Os vagões (ou bloco de vagões) são as tarefas (*jobs*) $j \in J = \{1, \dots, n\}$ e os trechos de trilho são as máquinas $q \in Q = \{1, \dots, m\}$. Todos os vagões devem seguir a mesma sequência de operações, porém encerram em operações diferentes, $i \in I = \{1, \dots, i^*\} \mid i^* \leq o$. O conjunto I de operações é específico deste problema pela característica de recirculação. Dado que a combinação tarefa-máquina (jq) pode se repetir diversas vezes, ou seja, o vagão pode retornar ao mesmo trecho de trilho, o índice i garante a diferenciação entre uma ocupação e outra.

As tarefas não precisam passar por todas as máquinas e não precisam executar o mesmo número de operações. Por exemplo, o vagão $j \in J$ pode encerrar na operação $i \in I$ enquanto o vagão $l \in J$ encerra na operação $k \in I$, sendo $j \neq l$, $i \neq k$ e $i, k \leq o$. Ou seja, o vagão j pode concluir seu processamento após ocupação de um número de trechos diferente do vagão l . Não existe tempo de *setup* e, também, não é permitido interrupção da circulação (*no preemption*). Ainda, não existe estoque anterior aos trechos, portanto, o trecho q ocupado por um vagão j , só pode receber outro vagão quando o j ocupa outro trecho, liberando o anterior.

O_j^i , aqui usado como apoio na explicação do modelo, porém não sendo um parâmetro ou variável do modelo, é definido como a i -ésima operação do vagão j , ou seja, a circulação do vagão j na operação i . O parâmetro P representa o tempo de circulação entre O_j^i e O_j^{i+1} que é considerado o mesmo para qualquer trecho e qualquer vagão (máquinas idênticas). O_j^i acontece em apenas um trecho do pátio e apenas uma vez. Como explicado anteriormente, o mesmo trecho de pátio q pode ser ocupado mais de uma vez pelo mesmo vagão j , porém, nesse caso, a operação i deve ser diferente para cada caso.

Uma simplificação considerada neste modelo é que o comprimento de cada trecho, assim como o comprimento de cada vagão são idênticos. Ou seja, o comprimento de cada vagão é simplificado para um comprimento médio e este mesmo comprimento é replicado para todos os trechos. Assim, o menor

comprimento (mais restritivo) de vagão ou grupo de vagões deve ser usado para determinar o comprimento médio que deverá ser considerado na modelagem. Este comprimento será replicado para todos os vagões e todos os trechos. Esta simplificação permite que a ocupação dos trechos de linha do pátio seja dada apenas pela ocupação discreta da variável $z_{qj}^i \in \{0, 1\}$, garantindo que nenhuma linha seja ocupada além do seu comprimento. Esta simplificação é razoável na prática dado que os vagões que são classificados em um mesmo pátio são, em sua maioria, do mesmo tipo e, portanto, do mesmo comprimento.

A chegada e a partida dos vagões são através de trens. Um trem $t \in T = \{1, \dots, v\}$ é um subconjunto de vagões, sendo $t \subset J$. Além disso, o conjunto T pode ser subdividido em dois outros conjuntos, trens de chegada T_α e trens de saída T_β onde $T = T_\alpha \cup T_\beta$. Se os vagões $j, l \in J$ e $j, l \in t^*$ dado $t^* \in T_\alpha$, então, os vagões i e j chegam no pátio pelo mesmo trem. Analogamente, se $j, l \in J$ e $j, l \in t^*$ dado $t^* \in T_\beta$, então, os vagões i e j saem do pátio pelo mesmo trem. Ainda, se $t, t^* \in T_\alpha$, então $t \cap t^* = \emptyset$. Ou seja, cada vagão chega no pátio em um único trem t . Da mesma forma, se $t, t^* \in T_\beta$, então $t \cap t^* = \emptyset$. Ou seja, cada vagão sai do pátio em um único trem t . Se o vagão não tem previsão de partida do pátio, então ele não estará em nenhum trem de saída, $j \notin t$ sendo $t \in T_\beta$. As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 resumem os conjuntos, parâmetros e variáveis usadas no modelo, respectivamente.

Tabela 4.1: Conjuntos

| | | |
|-----------------------------|-----------------------|---|
| Vagões (<i>jobs</i>) | $J = \{1, \dots, n\}$ | $j, l \in J$ |
| Trechos (<i>machines</i>) | $Q = \{1, \dots, m\}$ | $q, s \in Q$ |
| Operações | $I = \{1, \dots, o\}$ | $i, k \in I$ |
| Trens | $T = \{1, \dots, v\}$ | $t \in T \quad T = T_\alpha \cup T_\beta \quad T_\alpha \cap T_\beta = \emptyset$ |

Tabela 4.2: Parâmetros

| | |
|------------|--|
| P | tempo de movimentação (ou tempo de processamento) de qualquer vagão em qualquer trecho |
| r_j | data de chegada (<i>release date</i>) - instante mais cedo que o vagão j está disponível para chegar no pátio de classificação, ou seja, o horário de chegada do trem $t \in T_\alpha j \in t$ |
| AMV_{qs} | 1 se o trecho q é adjacente ou conectado por um AMV ao trecho s ; 0 caso contrário |
| PCH_j | trecho no qual o vagão j deve estar no instante da chegada do trem $t \in T_\alpha j \in t$ |
| PSA_j | trecho no qual o vagão j deve estar para que o trem $t \in T_\beta j \in t$ possa partir |
| M | número grande o suficiente |

Tabela 4.3: Variáveis

| | |
|---------------------------|--|
| $y_j^i \in R$ | instante de início da operação i do vagão j |
| $z_{qj}^i \in \{0, 1\}$ | 1 se a operação i do vagão j acontecer no trecho q ; 0 caso contrário |
| $x_{ijkl}^q \in \{0, 1\}$ | 1 se a operação i do vagão j precede a operação k do vagão l no trecho q ; 0 caso contrário |
| $f_j^i \in \{0, 1\}$ | 1 se a operação i do vagão j é a última operação antes da partida do trem $t \in T_\beta j \in t$; 0 caso contrário |
| $C_j \in R$ | instante de conclusão do vagão j , ou horário de partida do trem $t \in T_\beta j \in t$ |
| $C_{max} \in R$ | <i>makespan</i> - instante de partida do último vagão $j \in t, t \in T_\beta$ |

Matematicamente, a recirculação, ou seja, os vagões poderem fazer duas ou mais atividades (circulação) diferentes no mesmo trecho, pode ser representada por $z_{qj}^i = 1$ e $z_{qj}^k = 1$ sendo $i, k \in I, i \neq k$.

O objetivo desta modelagem é avaliar consistentemente a capacidade de processamento de vagões de um dado pátio ferroviário em um dado horizonte de tempo (H) definido pelo especialista ferroviário. Sendo assim, a função objetivo do modelo (4-1) busca processar todos os trens o mais rápido possível. Por [5], minimizar o *makespan* na função objetivo significa, geralmente, que os recursos terão utilização alta e balanceada. Dessa forma, lembrando as conclusões listadas na Sessão 2.4,

1. Se $C_{max} \ll H$, pode-se dizer com segurança que o pátio tem capacidade de processar toda a demanda.
2. Se $C_{max} \approx H$, já pode-se considerar um risco ao atendimento da demanda quando levado em consideração às simplificações de *input* e modelagem frente ao cenário real. Neste caso, é indicado uma avaliação mais detalhada.
3. Se $C_{max} > H$ para cenários variados de plano e grade de trens, conclui-se que, mesmo com o melhor plano de manobras, o pátio não tem capacidade para processar a demanda prevista com as condições de *layout* premissadas. Dessa forma, exigindo-se um projeto de expansão que gera um novo cenário a ser avaliado pelo modelo.

Na próxima página é apresentado a programação linear inteira mista (MILP) formulada sendo (4-1) a função objetivo sujeitando-se às restrições de (4-2) a (4-19).

$$\text{Min } C_{max} \quad (4-1)$$

Sujeito a:

$$y_j^{i+1} \geq y_j^i + \left(P * \sum_{q=0}^m z_{qj}^i \right) \quad \forall i, j | i < o \quad (4-2)$$

$$\sum_{q=0}^m z_{qj}^i = 1 - \sum_{k=0}^{i-1} f_j^k \quad \forall i, j | i > 1 \quad (4-3)$$

$$\sum_{q=0}^m z_{qj}^i \leq 1 \quad \forall i, j | i = 1 \quad (4-4)$$

$$\sum_{i=0}^o f_j^i = 1 \quad \forall j | j \in t, t \in T_\beta \quad (4-5)$$

$$\sum_{i=0}^o f_j^i = 0 \quad \forall j | j \notin t, t \in T_\beta \quad (4-6)$$

$$f_j^i \leq z_{qj}^i \quad \forall i, q, j | q = PSA_j \quad e \quad j \in t, t \in T_\beta \quad (4-7)$$

$$y_l^k \geq y_j^{i+1} - \left[M * (1 - x_{ijkl}^q) \right] - \left[M * (1 - z_{qj}^i) \right] - \left[M * (1 - z_{ql}^k) \right] \quad \forall q, i, j, k, l | i < o \quad (4-8)$$

$$x_{ijkl}^q + x_{klj}^q \geq 1 - \left[M * (1 - z_{qj}^i) \right] - \left[M * (1 - z_{ql}^k) \right] \quad \forall q, i, j, k, l | j \neq l \quad (4-9)$$

$$x_{ijkl}^q + \sum_{s=0}^m x_{k-1,l,i+1,j}^s \leq 1 \quad \forall q, i, j, k, l | i < o, \quad k > 1 \quad e \quad j \neq l \quad (4-10)$$

$$z_{qj}^{i+1} \leq \sum_{s=0}^m \left(AMV_{s,q} * z_{sj}^i \right) \quad \forall i, q, j | i < o \quad (4-11)$$

$$z_{qj}^i = 1 \quad \forall i, q, j | i = 1 \quad e \quad q = PCH_j \quad (4-12)$$

$$y_j^i = r_j \quad \forall i, j | i = 1 \quad e \quad j \notin t, t \in T_\alpha \quad (4-13)$$

$$y_j^i \geq r_j \quad \forall i, j | i = 1 \quad (4-14)$$

$$y_j^i = y_l^i \quad \forall i, j, l | i = 1 \quad e \quad j, l \in t, t \in T_\alpha \quad (4-15)$$

$$C_j \geq y_l^i \quad \forall i, j, l | j, l \in t, t \in T_\beta \quad (4-16)$$

$$C_j \geq y_j^i \quad \forall i, j | i = o \quad e \quad j \notin t, t \in T_\beta \quad (4-17)$$

$$y_j^{i+1} \geq C_j - M * \left(1 - \sum_{k=0}^i f_j^k \right) \quad \forall i, j | i < o \quad (4-18)$$

$$C_{max} \geq C_j \quad \forall j | j \in t, t \in T_\beta \quad (4-19)$$

A equação (4-2) garante que, para um mesmo vagão j , o instante de início da operação $i+1$ seja maior que o instante de início da operação i (logo anterior) somado ao seu tempo de processamento (circulação). Ou seja, O_j^{i+1} acontece obrigatoriamente após O_j^i (variável explicativa, não incluída no modelo). Cada vagão só ocupa um trecho de linha por vez, portanto, por (4-4), cada circulação O_j^i deve ocupar um, e somente um, trecho q . Esta equação é definida apenas para $i = 1$ pois é complementada pela equação (4-3) que garante a ocupação de um trecho q para toda circulação O_j^i até a última circulação O_j^{i*} , quando $f_j^{i*} = 1$. A variável $f_j^i \in \{0, 1\}$ tem valor 1 se O_j^i for a última circulação do vagão, ou seja, a última circulação anterior à partida do trem $t \in T_\beta | j \in t$. A variável f_j^i permite que cada vagão tenha um número total de movimentações independente. O vagão j pode ter um total de m' movimentações enquanto o vagão l tem um total de m'' . Para isso, basta $f_j^{m'} = 1$ e $f_l^{m''} = 1$.

A restrição (4-5) garante que, em algum instante, o vagão saia do pátio, ou seja, obriga $f_j^i = 1$ para algum índice i único. Essa restrição é aplicável para todo vagão que pertence a algum trem de saída ($j \in t | t \in T_\beta$). No caso de vagões que não pertencem a nenhum trem de saída ($j \notin t | t \in T_\beta$), ou seja, que devem permanecer no pátio durante todo o período de análise, a equação (4-6) garante a estadia dos vagões ao restringir f_j^i sempre igual a 0. Para que a circulação O_j^{i*} seja definida como a última do vagão j , esta circulação tem que ter acontecido no trecho pré-definido como PSA_j (4-7), ou seja, O_j^{i*} ocupa $q = PSA_j$. Dessa forma, o modelo respeita que, para que ocorra a saída do vagão, o mesmo deve estar na sua posição compondo o trem de saída.

A variável x_{ijkl}^q define a precedência no trecho q , ou seja, quem ocupa primeiro, o vagão j ou o vagão l . O índice de operação nesta variável permite a identificação de qual ocupação de cada vagão estamos avaliando, pois os vagões j e l podem ocupar o trecho q várias vezes. Assim, a variável $x_{ijkl}^q \in \{0, 1\}$ será 1 se O_j^i anteceder O_l^k e 0 caso contrário. Ou seja, a variável $x_{ijkl}^q \in \{0, 1\}$ será 1 se o vagão j na operação i ocupar o trecho q antes do vagão l na operação k e 0 caso contrário. Sendo assim, a Equação (4-8), obriga O_l^k a acontecer após O_j^i dado que o instante de início da operação k do vagão l deve ser igual ou maior que o início da operação $i + 1$ do vagão j , respeitando a precedência no trecho q ditada pela variável x_{ijkl}^q . As últimas duas parcelas eliminam essas restrições caso O_j^i e O_l^k não aconteçam no mesmo trecho $q \in Q$. Ao comparar operações em trechos diferentes, não é necessário garantir uma ocupação obrigatoriamente após a outra.

As equações (4-10) e (4-9), adaptadas de [11] e [3] respectivamente, garantem que dois vagões não troquem de posição no mesmo instante, o que seria fisicamente impossível por não existir ultrapassagem de vagões na mesma

linha. A Equação (4-9) indica que apenas um caso de precedência é possível quando se compara duas circulações O_j^i e O_l^k , ou O_j^i precede O_l^k , ou o contrário. Novamente, as últimas duas parcelas eliminam essas restrições caso O_j^i e O_l^k não aconteçam no mesmo trecho $q \in Q$. Além disso, a Equação (4-10) bloqueia a troca simultânea de vagões entre trechos. Ou seja, se O_j^i precede O_l^k em um trecho q , então O_j^{i+1} não pode ocorrer no trecho s onde ocorreu O_l^{k-1} . A Figura 4.1 exemplifica a situação bloqueada pela restrição (4-10). Entre as seções q e s existe um único trilho e, portanto, só ocorre a circulação de um vagão por vez.

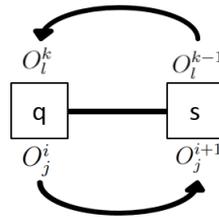


Figura 4.1: Exemplo de troca simultânea de vagões entre trechos, não permitido

A sequência possível de trechos a serem ocupados depende da vizinhança física entre os trechos (4-11). O parâmetro AMV_{sq} indica se o trecho $s \in Q$ é vizinho do trecho $q \in Q$. Por definição, $AMV_{sq} = 1$ se $s = q$, ou seja, um trecho é sempre vizinho dele mesmo. Os parâmetros PCH_j e PSA_j determinam, respectivamente, as posições, trechos $q \in Q$, de chegada e saída dos vagões no pátio. PCH_j e PSA_j são determinados por parâmetros previamente estabelecidos: ponto de origem ou destino do trem, composição de vagões contidas no trem, *layout* do pátio e regras de formação de trens. O vagão inicia sua operação no pátio a partir de sua chegada em um trem $t \in T_\alpha$. As restrições (4-13) e (4-14) inicializam o vagão no pátio respeitando seu instante de chegada r_j (*release date*). A Equação (4-14) faz com que qualquer movimentação do vagão no pátio só ocorra após a data de chegada mais cedo do vagão. E a Equação (4-12) garante que o primeiro trecho a ser ocupado pelo vagão seja aquele parametrizado como trecho de chegada ($q = PCH_j$). Os vagões chegam no pátio em trens, portanto (4-15) determina que todos os vagões pertencentes ao mesmo trem de chegada $t \in T_\alpha$ tenham o mesmo instante de chegada. Se o vagão j já inicia no pátio, então (4-13) garante que estará no pátio a partir de r_j onde, por definição, $r_j = 0$.

Em (4-16) o instante de conclusão C_j é definido como o mesmo valor para todos os vagões que formam o mesmo trem de saída. A equação (4-18) garante o bloqueio do último trecho ocupado pelo vagão j até que o mesmo saia do pátio pelo trem de saída $t \in T_\beta | j \in t$. Já para os vagões que permanecem no pátio, ou seja, não pertencem a nenhum trem de saída, a equação (4-17) garante que

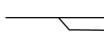
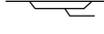
o instante de conclusão seja maior que a última operação realizada pelo vagão. Por (4-19), C_{max} , que é o *makespan* é definido como $\max\{C_j\mid j \in t, t \in T_\beta$. Ou seja, C_{max} é o instante de saída mais tarde dentre todos os vagões que saem do pátio. Os vagões que permanecem no pátio por não pertencerem a nenhum trem de saída não são considerados. P , C_j , C_{max} e y_j^i devem ser definidos na mesma unidade temporal, por exemplo, em minutos. O modelo matemático já garante $y_j^i \geq 0$ e $C_j \geq 0$ por isso não é necessário defini-los em R^+ .

5 Experimentos Computacionais

5.1 Definição das Instâncias

Com o objetivo de testar o funcionamento do modelo matemático e seu desempenho em diferentes cenários foram criadas dez instâncias para teste. A Tabela 5.1 define as instâncias criadas. As instâncias de **I2** a **I5** baseiam-se na instância **I1**, diferenciando-se desta apenas por um dos fatores: n (e v), m , o ou *Layout*, respectivamente. O mesmo vale para as instâncias de **I7** a **I10** que são variações da instância **I6**.

Tabela 5.1: Definição das Instâncias de Teste

| Inst. | n (vagões) | m (trechos) | o (operações) | v (trens) | <i>Layout</i> |
|--------------|-----------------|------------------|--------------------|----------------|---|
| I1 | 2 | 6 | 15 | 2 |  |
| I2 | 4 | 6 | 15 | 4 |  |
| I3 | 2 | 12 | 15 | 2 |  |
| I4 | 2 | 6 | 30 | 2 |  |
| I5 | 2 | 6 | 15 | 2 |  |
| I6 | 3 | 23 | 30 | 2 |  |
| I7 | 6 | 23 | 30 | 4 |  |
| I8 | 3 | 46 | 40 | 2 |  |
| I9 | 3 | 23 | 60 | 2 |  |
| I10 | 3 | 23 | 30 | 2 |  |

As dez instâncias de teste exigem do modelo solução para movimentações bem complexas, como inversão de vagões. No dia-a-dia ferroviário, inversão de vagões no trem é raro de ocorrer. Todas as movimentações possíveis na prática foram representadas nas instâncias de teste, porém numa frequência menor devido ao pequeno número de vagões.

Em seguida é descrito como cada conjunto (ver Tabela 4.1) e cada parâmetro (ver Tabela 4.2) do modelo podem ser calculados para um caso real. A instância **I1** é usada como exemplo para materializar cada definição. O

detalhamento dos parâmetros de todas as instâncias pode ser encontrado no Apêndice A.

Número de vagões (n):

Demanda plurianual por tipo de vagão e rota em vagões por dia. Esta média de vagões por dia deve contemplar tanto a demanda por vagões carregados quanto por vagões vazios. Com base em histórico, pode-se definir um percentual de variação dessa demanda. Para cada cenário de demanda a ser executado, define-se um número de vagões n . Após calcular a demanda em vagões por dia, é necessário converter todos os vagões para um mesmo comprimento, como se toda a demanda fosse transportada em vagões de mesmo comprimento (comprimento padrão). O comprimento do vagão padrão depende dos tipos de vagões que o pátio recebe. Pode ser o valor do vagão mais frequente ou a média do comprimento de todos os vagões. Ressaltando que, um vagão pode representar, na prática, um bloco de vagões (15 vagões, por exemplo). Para as instâncias da Tabela 5.1 foi arbitrado um número pequeno de vagões que permitisse todas as movimentações possíveis entre vagões. No caso da instância **I1**, $n = 2$, ocorrendo uma inversão entre os vagões.

Número de trechos (m):

Dado o *layout* a ser testado (atual ou projetado), calcula-se o comprimento útil de cada linha - comprimento entre AMVs físicos - e divide pelo comprimento do vagão padrão. O número de trechos em cada linha é o resultado dessa divisão, arredondando para baixo (conservador). De forma que uma linha sempre será capaz de receber vagões até sua ocupação total. Não é permitido a ocupação de um vagão sobre um AMV físico, por isso, é considerado apenas o comprimento útil da linha (comprimento onde se permite estocagem de vagões). Para a **I1**, $n = 6$, sendo cada linha com 2 trechos. A Figura 5.1 demonstra a distribuição de trechos pelo *layout* do pátio.

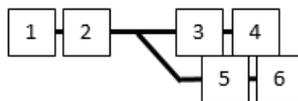


Figura 5.1: *Layout I1* discretizado em trechos

Número de operações (o):

A cardinalidade do conjunto $I = \{1, \dots, o\}$ deve ser grande o suficiente para garantir que nenhum vagão tenha sua movimentação restrita por falta de operações possíveis de serem executadas. Idealmente, $o \rightarrow \infty$, porém, na prática, sugere-se testar possíveis valores para o até que seja alcançada uma

solução viável e factível. Foi observado que valores de o justos podem gerar soluções viáveis, porém infactíveis por permitirem que dois vagões vizinhos troquem de posição q simultaneamente em $i = o$. Matematicamente, este fenômeno pode ser explicado com base na Equação (4-16). Por ela, $C_j \geq y_j^{i*}$ quando O_j^{i*} é a última circulação do bloco j . Logo, pode acontecer $C_j > y_j^{i*}$, e portanto, se $x_{i^*jkl}^q = 1$, sendo $q = PSA_j$, então $y_l^k \geq C_j$. Porém, o modelo permite que $y_l^k < C_j$ limitando apenas $y_l^k \geq y_j^{i*} + P$. Ou seja, para a última operação de um bloco, o modelo não garante bloqueio do trecho. Dado que o bloqueio do trecho não é garantido para a última operação de algum vagão, idealmente todos os vagões devem ter sua última operação em $i^* < o$. Observa-se que para soluções viáveis e factíveis, $\sum_{i=0}^{i^*} f_j^i = 1 \quad \forall j \in t, t \in T_\beta$. Sugere-se, no mínimo, $o > m$. Na instância **I1**, $o = 15$.

Número de trens (v):

Considera-se o plano de trens vigente para determinar quais vagões compõem cada trem. Geralmente é feito uma extrapolação do plano vigente para garantir atendimento de toda a demanda. Ou, uma nova alocação de vagões em trens é realizada, como se fosse um novo plano de trens. Na instância **I1**, $v = 2$, sendo um trem de chegada ($t = 1 \in T_\alpha$) e um de saída ($t = 2 \in T_\beta$), cada um contendo os dois vagões $j = 1$ e $j = 2$.

Tempo de movimentação (P):

Calculado a partir da velocidade média de circulação de um vagão no comprimento de um trecho (comprimento padrão). Pode ser baseado em histórico e calibrado conforme resultados obtidos com o modelo. O tempo de circulação parametrizado deve contemplar o tempo de movimentação do manobrador sendo uma estimativa conservadora. O tempo de circulação real varia de vagão para vagão, assim como o comprimento dos trechos também varia. Porém, no modelo proposto, o parâmetro P é simplificado por um número constante válido para todos os vagões em todos os trechos. Para a instância **I1** e todas as demais, $P = 5$ unidades de tempo de forma arbitrária.

Data de chegada mais cedo (r_j):

A ordem de chegada dos trens no pátio pode ser baseada na grade de trens vigente. Entre um trem e outro deve-se respeitar, no mínimo, o *headway* de circulação para determinar os horários de chegada. Dessa forma, no entanto, pode-se ter um resultado de capacidade do pátio menor do que se alcançaria sem essa restrição. Caso os resultados do modelo indiquem alteração na grade de trens vigente, esta informação deve servir como *input* para que na etapa de Planejamento a grade de trens seja revisada. Na instância **I1**, $r_1 = 10$ e $r_2 = 10$ ($v = 1$ é o único trem de chegada).

Adjacência entre trechos (AMV_{qs}):

Definida com base no *layout* do pátio sendo estudado e na numeração dos trechos. Retomando a Figura 5.1, observa-se que $AMV_{23} = 1$, $AMV_{25} = 1$ e $AMV_{26} = 0$, por exemplo. A Tabela 5.2 ilustra quando o parâmetro AMV é 1 ou 0 para a instância **I1**.

Tabela 5.2: AMV_{qs} para instância **I1**

| AMV_{qs} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Trecho de chegada (PCH_j):

Determinada pela região de origem do trem que, geralmente, só tem uma opção de ponto de entrada no pátio. No caso de ter mais de um ponto de entrada possível, deve-se escolher um específico para cada cenário a ser executado. No modelo proposto optou-se pela simplificação de determinar quais trechos são ocupados com a chegada do trem no pátio. Na prática, o controlador do pátio pode optar por diferentes linhas a serem ocupadas com a chegada do trem. Portanto, a determinação da linha de chegada pode implicar em redução da capacidade potencial do pátio. Optou-se por essa simplificação devido à dificuldade de modelar a possibilidade de escolha. Para os pátios onde é permitida movimentação na alça de manobra (linha que conecta o pátio à linha de circulação), indica-se determinar PCH_j nos trechos pertencentes à alça de manobra, evitando múltiplas opções de entrada no pátio. Para a instância **I1**, o trem $t = 1$ tem sua entrada da esquerda para a direita. Optou-se pelo vagão $j = 1$ chegando primeiro no pátio. Dessa forma, $PCH_1 = 2$ e $PCH_2 = 1$.

Trecho de saída (PSA_j):

Determinada pela região de destino do trem que, geralmente, só tem uma opção de ponto de saída no pátio, semelhante à entrada. No caso de ter mais de um ponto de saída possível, deve-se escolher um específico para cada cenário. Assim como na determinação de PCH_j , optou-se pela simplificação de determinar quais as seções são ocupadas para a saída do trem no pátio, o que novamente, pode implicar em redução da capacidade potencial do pátio. Semelhante à definição de PCH_j , para os pátios onde é permitida

movimentação na alça de manobra (linha que conecta o pátio à linha de circulação), indica-se determinar PSA_j nos trechos pertencentes à alça de manobra, evitando múltiplas opções de entrada no pátio. Para a instância **I1**, o trem $t = 2$ sai pela mesma linha de entrada, referenciando o Figura 5.1, a saída do trem acontece da direita para a esquerda. O objetivo da movimentação do pátio é inverter as posições dos vagões de forma que $j = 1$ saia primeiro do pátio. Dessa forma, $PCH_1 = 1$ e $PCH_2 = 2$.

Para a parametrização das posições de chegada (PCH_j) ou saída (PSA_j) de vagões, indica-se sempre declarar a chegada ou saída do vagão da extremidade do trem (primeiro ou o último) no trecho q da extremidade da linha. Dessa forma, evita-se uma possível ultrapassagem de vagões que estão chegando sobre vagões que estão saindo, e vice-versa. A parametrização correta de PCH_j e PSA_j garante uma solução viável e factível. A Tabela 5.3 resume para cada vagão da instância **I1** os parâmetros r_j , $t \in T_\alpha$, PCH_j , $t \in T_\beta$ e PSA_j .

Tabela 5.3: Resumo dos parâmetros por vagão para instância **I1**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|----------|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 2 |

Número grande (M):

Um número grande o bastante. Como geralmente estudamos o pátio num período de 1 dia, discretizado em minutos, sugere-se $M = 2 * 24 * 60$, que seria o dobro de minutos contido em um dia. Neste caso, P também deve ser determinado em minutos e a função objetivo será, também, em minutos.

Para a parametrização do modelo de forma prática, o ideal seria desenvolver um gerador de cenários que, pelo número de vagões médio e sua margem de variação por tipo de produto e rota, gerasse diferentes planos e grades de trens viáveis para execução no modelo (variando n , v e r_j). Dessa forma, fixa-se o *layout* a ser analisado e executa-se várias rodadas de análise, cada uma com uma entrada de plano e grade de trens diferentes. Dessa forma, pode-se gerar um gráfico do tempo gasto para processar todos os vagões em cada cenário (C_{max} x cenário). Então, pode-se ter uma análise de risco de atendimento à demanda com aquele *layout* fixado. Concluído este primeiro gráfico de desempenho por cenário, pode-se executar os mesmos cenários para um outro *layout* (por exemplo, projetado), de forma a comparar os desempenhos desse novo *layout* com aquele previamente analisado. Assim, é possível determinar se um

layout é significativamente melhor que outro. Os parâmetros P , PCH_j e PSA_j também podem ser variados nos cenários de teste, porém acredita-se que tenham menor relevância dado o conhecimento tácito da operação ferroviária. Esses últimos parâmetros tem um intervalo mais limitado para variação.

5.2

Planejamento dos Experimentos

As sessões seguintes apresentam os métodos e resultados de diferentes abordagens para resolução do modelo de otimização desenvolvido. Na Sessão 5.3, Otimização Clássica, o modelo é submetido a um solver comercial para execução até a solução ótima. Cada uma das dez instâncias de teste são resolvidas e seus resultados são comparados.

Nas sessões seguintes, diferentes métodos de inicialização de variáveis são testados, para as mesmas dez instâncias, de forma a alcançar um método de melhor custo x benefício nos critérios: esforço de parametrização/*setup*, tempo de execução e qualidade da solução. A referência para qualidade da solução é a solução ótima encontrada na Otimização Clássica. A referência para esforço de parametrização/*setup* também é a Otimização Clássica onde não é necessário nenhuma atividade adicional à definição dos parâmetros do modelo. Para o tempo de execução, busca-se o menor possível entre todos os métodos testados.

Após definição do método de melhor custo x benefício nos critérios citados, a Sessão 5.8 amplia a dimensão das instâncias de teste para observar os resultados do método parametrizado para instâncias maiores.

O modelo e todas as estratégias de inicialização foram codificados usando a linguagem Julia no ambiente de desenvolvimento Atom sendo executado em um computador com processador Intel *i7* 3.30 GHz com 24,0 GB de memória RAM. O *solver* usado foi o GUROBI 5.6.

5.3

Otimização Clássica

Após a parametrização das instâncias, o modelo foi executado até encontrar a solução ótima. O objetivo desta primeira rodada de experimentos foi conferir o comportamento do modelo. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos com o modelo apresentado na seção anterior resolvido por *solver* comercial exato para as 10 instâncias de teste previamente definidas. Os resultados de cada instância são resumidos em seis saídas do *solver*: o valor da função objetivo para a solução ótima (**FO***), o tempo computacional consumido para alcançar a solução ótima em segundos de CPU (**Tempo***), o valor da função objetivo para a primeira solução viável encontrada pelo *solver* (**FO 1^a sol**), o

tempo computacional consumido para alcançar a primeira solução viável em segundos de CPU (**Tempo** 1ª sol), o gap apresentado pelo *solver* quando encontrada a primeira solução viável (**GAP** 1ª sol) e a diferença percentual da primeira solução viável obtida para a solução ótima (**Dif%** (1ª-FO*)/FO*).

Tabela 5.4: Otimização Clássica

| Inst. | Resultados | | | | | |
|-------|------------|----------|--------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| | FO* | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | GAP 1ª sol | Dif % (1ª-FO*)/FO* |
| I1 | 30 | 1,42 | 80 | <1 | 75,0% | 167% |
| I2 | 50 | 50,27 | 160 | 26 | 75,0% | 220% |
| I3 | 50 | 8,16 | 80 | <1 | 75,0% | 60% |
| I4 | 30 | 9,37 | 155 | 1 | 87,1% | 417% |
| I5 | 40 | 3,30 | 80 | <1 | 75,0% | 100% |
| I6 | 85 | 36,48 | 240 | 18 | 64,6% | 182% |
| I7 | 115 | 2.428,57 | 115 | 2.426 | 0% | 0% |
| I8 | 160 | 525,22 | 265 | 107 | 39,6% | 66% |
| I9 | 85 | 315,11 | 795 | 94 | 89,3% | 835% |
| I10 | 85 | 127,17 | 160 | 79 | 46,9% | 88% |

Tomando como referência a Figura 5.1, a Figura 5.2 ilustra a solução ótima para a instância **I1**. Em seguida, a Tabela 5.5 reflete a mesma solução, indicando em que trecho cada vagão estava no decorrer do tempo. As soluções das demais instâncias podem ser encontradas, em formato de tabela, no Apêndice B. Todas as instâncias apresentadas na Tabela 5.1 foram ilustradas em um vídeo que pode ser acessado em: <https://youtu.be/UplajZWG-Kc>.

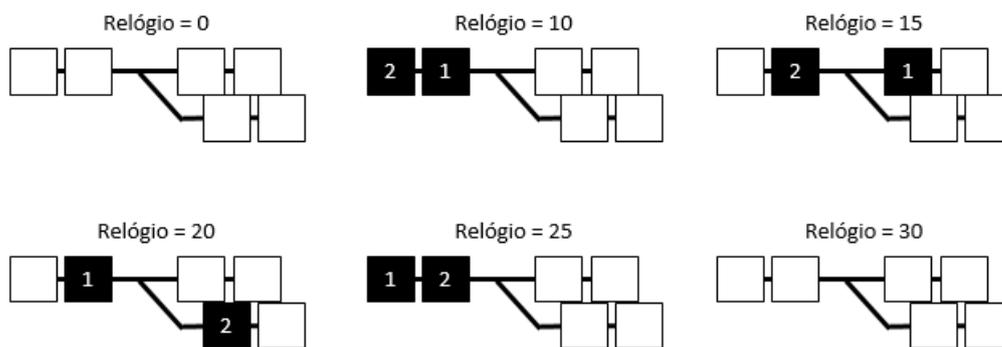


Figura 5.2: Solução ótima **I1** ilustrada

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.4, observa-se que o modelo consegue, de fato, resolver instâncias com variados *layouts* de pátio. Para estes resultados preliminares, os fatores que aparentam influenciar mais significativamente o tempo computacional de execução são n , m e o , o número de vagões, trechos e operações, respectivamente. Nas instâncias **I2** e **I7**, a duplicação do

Tabela 5.5: Solução ótima para instância **I1** em forma de tabela

| Relógio | q | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | | | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | |
| 15 | | 2 | 1 | | | |
| 20 | | 1 | | | 2 | |
| 25 | 1 | 2 | | | | |
| 30 | | | | | | |

número de vagões (n) gerou, por consequência, a duplicação do número de trens. Já na instância **I8**, a duplicação do número de trechos (m) exigiu um incremento de 10 unidades no conjunto operações ($o = 40$) para garantir uma solução viável e factível.

Observando o tempo computacional de execução até encontrar a solução ótima (**Tempo***), **I2** demorou 35 vezes mais que o cenário base **I1** quando o número de vagões (n) foi duplicado. Já **I7** superou 66 vezes o tempo de execução de **I6**. **I3**, com a duplicação do número de trechos (m), teve o tempo de execução multiplicado por 5. **I8** comparado à **I6** foi 14 vezes mais demorado. A duplicação do número de operações (o) em **I4** também impactou no tempo de execução, semelhante à duplicação de m para o cenário base, 6 vezes maior. **I9**, no entanto, teve um desempenho melhor que **I8**, 8 vezes maior que **I6**. Já em **I5**, a alteração do *layout* apenas aumentou o tempo de execução em 2 vezes comparado à **I1**. Muito semelhante à **I10** quando comparado à **I6**. Esses resultados indicam que alterações de *layout* não alteram o tempo de execução para instâncias com o mesmo número de vagões e trechos. Na prática, alterações como inclusão de um AMV não alteraria o tempo de execução de um cenário base já avaliado. Como o *layout* é o fator principal para alterações em análises de capacidade, pode-se esperar o mesmo tempo de execução que outros cenários já realizados com a mesma demanda, indicando uma previsibilidade ao especialista ferroviário. No entanto, a inclusão de uma linha no *layout* altera o número de trechos m , o que gera um incremento no tempo de execução.

Analisando as soluções encontradas pelo MILP proposto, pode-se concluir que o modelo gera soluções viáveis que podem ser usadas para avaliar a capacidade de processamento de pátios ferroviários e indicar investimentos em infraestrutura que geram maior retorno em capacidade de processamento, ou seja, que reduzem o tempo total de processamento de todos os vagões. Este modelo assume parâmetros de insumos já conhecidos no processo de planejamento estratégico da MRS Logística. As simplificações assumidas na construção do modelo não representam risco para a análise a nível estratégico de planeja-

mento. No entanto, foi encontrada uma limitação no modelo, após a primeira rodada de experimentos para instâncias de teste. Como pode ser observado na Figura 5.2 para a instância **I1**, do momento de relógio = 15 para relógio = 20, o vagão $j = 1$ se move do trecho $q = 3$ para o trecho $q = 2$, ao mesmo tempo que o vagão $j = 2$ se move do trecho $q = 2$ para o trecho $q = 5$. No momento relógio = 15, o vagão $j = 1$ tem seu trecho de destino igual ao trecho de origem do vagão $j = 2$. Tanto para a movimentação do vagão $j = 1$ quanto para a movimentação do vagão $j = 2$ neste momento, um AMV do pátio é requisitado. Fisicamente, o AMV permite a movimentação de $q = 2$ para $q = 3$ ou de $q = 2$ para $q = 5$. Ou seja, o vagão $j = 2$ deveria se movimentar primeiro, e, após o AMV estar liberado, o vagão $j = 1$ se movimentar (ou o inverso). A solução ótima, considerando que esta movimentação fosse impedida, deveria ser $C_{max} = 35$. No momento de relógio = 15 para relógio = 20, o vagão $j = 1$ se move do trecho $q = 3$ para o trecho $q = 2$, e, logo após, no momento de relógio = 20 para relógio = 25, o vagão $j = 2$ se moveria do trecho $q = 2$ para o trecho $q = 5$. Atrasando as demais atividades em 5 unidades de tempo. Em um cenário de mais movimentações, a ausência de uma restrição que impeça a movimentação simultânea ao requisitar um AMV físico, pode causar um valor de função objetivo bem menor do que deveria. Para solucionar este problema sugere-se, para trabalhos futuros, incluir alguma restrição no modelo de forma que movimentações que requeiram AMV não sejam simultâneas. Para o modelo como está, esta limitação pode ser contornada acrescentando no tempo de movimentação (P) uma quantidade extra de unidades de tempo (refletida para todos os vagões) que reflitam a duração da movimentação sequencial, apesar do modelo indicar como simultânea.

As dez instâncias de teste apresentadas na Tabela 5.1 são instâncias pequenas que refletem as possíveis movimentações em pátios ferroviários. Entretanto, considerando-se a complexidade exponencial do método, torna-se necessário desenvolver estratégias para redução do tempo computacional. As próximas seções apresentam diferentes abordagens para inicialização do modelo pela atribuição de valores para as variáveis inteiras, que tornam o modelo mais complexo. Retomando a Tabela 4.3, as variáveis binárias do modelo são: x_{ijkl}^q , z_{qj}^i e f_j^i . Destas variáveis, z_{qj}^i é uma variável estrutural do modelo (em conjunto com y_j^i , que não é binária), ou seja, essa variável delimita a solução de forma que x_{ijkl}^q e f_j^i são consequências desta delimitação. Sendo assim, a estratégia apresentada na próxima seção se baseia na inicialização dessa variável estrutural.

5.4

Inicialização de rota definida por conhecimento tácito

O objetivo de inicializar o modelo com uma rota definida para cada vagão é partir de uma solução viável. Sendo assim, o tempo até encontrar uma primeira solução viável seria significativamente reduzido, com potencial de reduzir o tempo de execução até a solução ótima.

Para definir uma rota possível por vagão, a variável z_{qj}^i foi inicializada, conseqüentemente, permitindo a inicialização da variável f_j^i também. A determinação de uma rota inicial para cada uma das instâncias de teste foi baseada em conhecimento tácito da operação ferroviária. A tabela 5.6 resume a definição das variáveis z_{qj}^i e f_j^i diferente de 0 para inicialização da instância **I1**.

Tabela 5.6: Inicialização de rota para instância **I1**

| $j = 1$ | $j = 2$ |
|----------------|----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ |
| $z_{51}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ |
| $z_{61}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{32}^5 = 1$ |
| $z_{11}^6 = 1$ | $z_{22}^6 = 1$ |
| $f_1^6 = 1$ | $f_2^6 = 1$ |

Para as demais instâncias de teste da Tabela 5.1, as variáveis z_{qj}^i e f_j^i diferente de 0 podem ser consultadas no Apêndice C. Vale ressaltar que nenhuma das combinações de rotas usadas para inicialização das instâncias refletem a solução ótima, mas uma solução viável qualquer.

Para os experimentos mostrados na Tabela 5.7, a solução inicial foi baseada na definição das variáveis z_{qj}^i e f_j^i . As demais variáveis não foram iniciadas de forma que o *solver* executou algum processamento até encontrar uma primeira solução viável. Os resultados da Tabela 5.7 são apresentados da mesma forma que na Tabela 5.4, acrescidos de uma coluna: o tempo computacional consumido para calcular o valor do gap da primeira solução viável em segundos de CPU (**Tempo 1º GAP**).

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.7, observa-se que o número de vagões (n), o número de trechos (m) e o número de operações (o), respectivamente, continuam sendo os fatores que mais influenciam no prolongamento do tempo de execução, mesmo com a inicialização de variáveis. Diferentemente do cenário de otimização clássica, observa-se que com a inicialização da rota

Tabela 5.7: Inicialização de rota por conhecimento tácito

| Inst. | Resultados | | | | | | |
|-------|------------|--------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| | FO* | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | GAP 1ª sol | Tempo 1º GAP | Dif % (1ª-FO*)/FO* |
| I1 | 30 | 0,87 | 40 | <1 | 50,0% | <1 | 33% |
| I2 | 50 | 23,89 | 70 | <1 | 50,0% | 1 | 40% |
| I3 | 50 | 8,59 | 80 | <1 | 68,8% | <1 | 60% |
| I4 | 30 | 4,96 | 40 | <1 | 50,0% | 1 | 33% |
| I5 | 40 | 1,35 | 60 | <1 | 66,7% | <1 | 50% |
| I6 | 85 | 19,76 | 135 | 2 | 37,0% | 18 | 59% |
| I7 | 115 | 617,95 | 135 | 11 | 14,8% | 169 | 17% |
| I8 | 160 | 252,62 | 240 | 11 | 33,3% | 110 | 50% |
| I9 | 85 | 248,72 | 125 | 8 | 32,0% | 96 | 47% |
| I10 | 85 | 45,80 | 135 | 2 | 37,0% | 19 | 59% |

Tabela 5.8: Comparativo entre Otimização clássica e Inicialização de rota

| Inst. | Dif % para Otimização Clássica | | | |
|-------|--------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | Tempo 1º GAP |
| I1 | -39% | -50% | 0% | 0% |
| I2 | -52% | -56% | -100% | -96% |
| I3 | +5% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | -47% | -74% | -100% | 0% |
| I5 | -59% | -25% | 0% | 0% |
| I6 | -46% | -44% | -89% | 0% |
| I7 | -75% | +17% | -100% | -93% |
| I8 | -52% | -9% | -90% | +3% |
| I9 | -21% | -84% | -91% | +2% |
| I10 | -64% | -16% | -97% | -76% |

(variáveis z_{ij}^i e f_j^i), o tempo para calcular o gap da primeira solução é significativamente diferente do tempo consumido para apontar uma primeira solução viável. Para as instâncias **I7** e **I8**, o (**Tempo** 1ª sol) chega a ser 100 segundos de CPU menor que o (**Tempo** 1º GAP), uma redução de mais de 90% nos dois casos. A (**Dif %**) da função objetivo ótima para a primeira solução encontrada ficou entre 17% e 60% para todas as instâncias, indicando que a primeira solução viável pode ser uma opção de resposta na prática, reduzindo radicalmente o tempo de execução do modelo. Se a primeira resposta, mesmo não sendo a ótima, indicar que o pátio tem capacidade de processamento, não é necessário executar o *solver* até a solução ótima, pois esta apenas confirmaria a conclusão. O (**GAP** 1ª sol) pode ser um indicativo de quão próximo a primeira solução viável está da solução ótima. Portanto, para a instância **I7**,

por exemplo, poderia-se considerar a primeira solução viável como resposta do modelo (GAP de 14,8%) se esta resposta já indicasse potencial do pátio ter capacidade de processamento, dado que o custo de melhorar a solução implica em muito tempo de execução (inviável na prática) e não traz valor para a conclusão.

A Tabela 5.8 apresenta, para cada uma das instâncias de teste, o comparativo percentual entre os resultados da otimização clássica (Tabela 5.4) e da inicialização de rota (Tabela 5.7), mostrando o quanto a inicialização melhorou ou não o desempenho do modelo. Matematicamente, “Dif % para Otimização Clássica” = (“Inicialização de rota” - “Otimização Clássica”) / “Otimização Clássica”. O comparativo é realizado em quatro fatores: o tempo computacional consumido para alcançar a solução ótima em segundos de CPU (**Tempo***), o valor da função objetivo para a primeira solução viável encontrada pelo *solver* (**FO 1ª sol**), o tempo computacional consumido para alcançar a primeira solução viável em segundos de CPU (**Tempo 1ª sol**) e o tempo computacional consumido para calcular o valor do gap da primeira solução viável em segundos de CPU (**Tempo 1º GAP**), sendo este último comparado ao (**Tempo 1ª sol**) da otimização clássica.

Pela Tabela 5.8, observa-se que com a inicialização o (**Tempo***) reduziu em quase todas as instâncias (entre 21% e 75% de queda), significativa principalmente para as instâncias mais demoradas (**I7** e **I8**). **I3** foi a única instância que apresentou incremento de tempo de execução com a inicialização de rota, porém um aumento de apenas +5%, trazendo um aumento absoluto de 0,43 segundos de CPU, quase irrelevante. O (**Tempo 1ª sol**) com inicialização de rota apresentou-se expressivamente inferior ao tempo consumido pela otimização clássica. A instância **I7**, por exemplo, encontrou a primeira solução viável em 11 segundos computacionais, uma redução de quase 100% do tempo anterior (2.426 segundos de CPU). As instâncias **I1**, **I3** e **I5** mantiveram o mesmo tempo de execução até encontrar a primeira solução do cenário de otimização clássica, porém nestes casos o tempo consumido já era 0 segundos de CPU na otimização clássica. O (**Tempo 1º GAP**), como esperado, consumiu mais tempo de execução que o (**Tempo 1ª sol**). Porém, destacou o fato de prolongar demasiadamente o tempo de execução, como pode ser observado para as instâncias **I8** e **I9**. Essas instâncias consumiram mais tempo com a inicialização de rota para calcular o gap da primeira solução que o cenário de otimização clássica.

Além do melhor desempenho em tempo de execução, a inicialização de rota por conhecimento tácito permitiu uma primeira solução viável melhor que aquela encontrada pelo modelo na otimização clássica. **I7** foi a única

instância que apresentou uma primeira solução viável mais distante da ótima quando comparada ao cenário de otimização clássica (+17%). No entanto, na otimização clássica, a primeira solução viável para a **I7** foi a própria solução ótima, o que consumiu muito tempo de execução. Dessa forma, entende-se que um incremento de 17% no valor da primeira solução viável é compensado pela drástica redução no tempo de execução até encontrar esta solução. Este evento implicou, inclusive, na redução do tempo de execução total, até encontrar a solução ótima.

Conclui-se que a inicialização de rota por conhecimento tácito é um método eficaz na redução do tempo computacional de execução, encontrando boas primeiras soluções viáveis. No entanto, este método depende de um conhecimento específico para que possa ser parametrizada uma rota útil ao modelo, além de depender da definição de vários parâmetros cuja quantidade cresce exponencialmente com o aumento da cardinalidade dos conjuntos. Comportamento oposto ao desejado que é de reduzir o tempo de parametrização. Na próxima seção, busca-se reduzir a quantidade de parâmetros inicializados por conhecimento tácito no modelo.

5.5

Inicialização do número máximo de movimentações definido por conhecimento tácito

Pelos experimentos com inicialização da rota, observa-se que o tempo computacional de execução foi consideravelmente reduzido e a primeira solução viável se aproximou da ótima. Dessa forma, inicializar o modelo com a rota é uma forma eficaz. Porém, a inicialização dos parâmetros para garantir inicialização da rota pode se tornar impraticável com o aumento da cardinalidade dos conjuntos: número de vagões, número de seções e número de operações, principalmente. Dessa forma, essa seção busca inicializar o modelo apenas com a definição do número máximo de movimentações por vagão, sem explicitar qual a rota. A expectativa é que o tempo de execução aumente em relação ao alcançado com a inicialização da rota.

O número máximo de movimentações por vagão deve ser, no mínimo, o caminho mais curto entre o trecho de chegada (PCH_j) e o trecho de saída (PSA_j) do mesmo. A partir deste número, por conhecimento tácito, acrescenta-se movimentações considerando o número de trens de chegada que precisam ocupar o pátio de forma que todos os vagões que compõe o trem de saída estejam disponíveis no pátio. Quanto maior a ocupação do pátio e quanto maior a mudança na ordenação dos vagões para compor os trens de saída, maior será o número de movimentações esperado.

Para definir o número máximo de movimentações por vagão, a variável f_j^i foi inicializada. A variável f_j^i não é estrutural neste modelo, porém a delimitação dela faz com que o conjunto de possíveis combinações para as variáveis z_{qj}^i , que são estruturais, seja reduzido. Nesta rodada de testes, a variável f_j^i foi definida com os mesmos valores da rodada anterior (inicialização da rota), que implica em uma definição de f_j^i por conhecimento tácito da operação ferroviária. A definição de f_j^i não depende de uma definição de rota. A Tabela 5.9 resume a definição da variável f_j^i diferente de 0 para inicialização da instância **I1**.

Tabela 5.9: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I1**

| | |
|-------------|-------------|
| $j = 1$ | $j = 2$ |
| $f_1^6 = 1$ | $f_2^6 = 1$ |

Para as demais instâncias de teste da Tabela 5.1, a variável f_j^i diferente de 0 pode ser consultada no Apêndice C. Vale ressaltar que nenhum dos números máximos de movimentações usadas para inicialização das instâncias refletem a solução ótima, mas uma solução viável qualquer.

Para os experimentos mostrados na Tabela 5.10, a solução inicial foi baseada na definição da variável f_j^i . As demais variáveis não foram iniciadas de forma que o *solver* executou algum processamento até encontrar uma primeira solução viável. Os resultados da Tabela 5.10 são apresentados da mesma forma que na Tabela 5.7.

Tabela 5.10: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por conhecimento tácito

| Inst. | Resultados | | | | | | |
|-------|------------|--------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| | FO* | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | GAP 1ª sol | Tempo 1º GAP | Dif % (1ª-FO*)/FO* |
| I1 | 30 | 1,39 | 40 | <1 | 50,0% | <1 | 33% |
| I2 | 50 | 28,99 | 70 | <1 | 50,0% | 2 | 40% |
| I3 | 50 | 47,63 | 80 | <1 | 75,0% | <1 | 60% |
| I4 | 30 | 5,21 | 40 | <1 | 50,0% | 1 | 33% |
| I5 | 40 | 1,85 | 50 | <1 | 60,0% | <1 | 25% |
| I6 | 85 | 21,24 | 115 | 4 | 26,1% | 20 | 35% |
| I7 | 115 | 677,89 | 135 | 47 | 14,8% | 207 | 17% |
| I8 | 160 | 621,26 | 265 | 224 | 39,6% | 224 | 66% |
| I9 | 85 | 107,56 | 105 | 13 | 19,0% | 95 | 24% |
| I10 | 85 | 48,11 | 115 | 4 | 26,1% | 20 | 35% |

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.10, observa-se que a instância **I3** foi a que mais prolongou o tempo de execução até encontrar a solução

Tabela 5.11: Comparativo entre Otimização clássica e Inicialização do número máximo de movimentações por vagão

| Inst. | Dif % para Otimização Clássica | | | |
|-------|--------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | Tempo 1º GAP |
| I1 | -2% | -50% | 0% | 0% |
| I2 | -42% | -56% | -100% | -92% |
| I3 | +484% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | -44% | -74% | -100% | 0% |
| I5 | -44% | -38% | 0% | 0% |
| I6 | -42% | -52% | -78% | +11% |
| I7 | -72% | +17% | -98% | -91% |
| I8 | +18% | 0% | +109% | +109% |
| I9 | -66% | -87% | -86% | +1% |
| I10 | -62% | -28% | -95% | -75% |

Tabela 5.12: Comparativo entre Inicialização de rota e Inicialização do número máximo de movimentações por vagão

| Inst. | Dif % para Inicialização de rota | | | |
|-------|----------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | Tempo 1º GAP |
| I1 | +60% | 0% | 0% | 0% |
| I2 | +21% | 0% | 0% | +100% |
| I3 | +454% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | +5% | 0% | 0% | 0% |
| I5 | +37% | -17% | 0% | 0% |
| I6 | +7% | -15% | +100% | +11% |
| I7 | +10% | 0% | +327% | +22% |
| I8 | +146% | +10% | +1.936% | +104% |
| I9 | -57% | -16% | +63% | -1% |
| I10 | +5% | -15% | +100% | +5% |

ótima dentre as cinco primeiras instâncias. Esse comportamento foi diferente dos demais experimentos, cujo tempo de execução estava sendo mais alongado pelo incremento do número de vagões (n) e não do número de trechos (m). No entanto, manteve-se o fato do número de vagões (n), número de trechos (m) e número de operações (o) serem os fatores que mais influenciam no prolongamento do tempo de execução. Semelhante ao cenário de inicialização de rota, observa-se que com a inicialização do número máximo de movimentações por vagão (variável f_j^i), o tempo para calcular o gap da primeira solução é significativamente maior do que o tempo consumido para apontar uma primeira solução viável, até 160 segundos de CPU.

Foi observado que para todas as instâncias o *solver* encontrou uma

solução inicial a partir da inicialização do número máximo de movimentações por vagão, exceto para a instância **I8**. Para a instância **I8**, depois de algum processamento, o *solver* não encontrou nenhuma solução viável e descartou a inicialização. Depois do descarte, o processamento foi executado da mesma forma como se fosse uma otimização clássica. Essa ocorrência indica que, no caso da inicialização do número máximo de movimentações por vagão, pode ser que a parametrização inicial não seja útil para o *solver* encontrar uma primeira solução e, neste caso, ao identificar o descarte da inicialização, o processamento deve ser interrompido e uma nova parametrização deve ser determinada para inicialização do modelo. Caso contrário, o desempenho da estratégia será inferior ao do cenário de otimização clássica. Desconsiderando a instância **I8** da Tabela 5.10, a (**Dif %**) da função objetivo ótima para a primeira solução encontrada ficou entre 17% e 60% para todas as instâncias, semelhante ao cenário de inicialização de rota, mantendo a indicação de que a primeira solução viável pode ser uma opção de resposta na prática.

A Tabela 5.11 apresenta, para cada uma das instâncias de teste, o comparativo percentual entre os resultados da otimização clássica (Tabela 5.4) e da inicialização do número máximo de movimentações por vagão (Tabela 5.10), mostrando o quanto a inicialização melhorou ou não o desempenho do modelo. Matematicamente, “Dif % para Otimização Clássica” = (“Inicialização do número máximo de movimentações por vagão” - “Otimização Clássica”) / “Otimização Clássica”. O comparativo é realizado nos mesmos quatro fatores apresentados na Tabela 5.8.

Pela Tabela 5.11, desconsiderando a instância **I8**, observa-se que com a inicialização de f_j^i por conhecimento tácito, o (**Tempo***) reduziu em quase todas as instâncias, significativa principalmente para a instância mais demorada (**I7**). **I3** foi a única instância que apresentou incremento de tempo neste cenário, semelhante ao ocorrido para inicialização de rota, porém aqui o aumento foi de +484%, trazendo um aumento absoluto de 39,47 segundos de CPU. O incremento de tempo demasiado na instância **I3** indica que, mesmo com inicialização, alcançar a solução ótima pode não ser efetivo na prática. O (**Tempo 1^a sol**), no entanto, apresentou-se expressivamente inferior ao tempo consumido pela otimização clássica (exceto na **I8** que não usou a inicialização proposta para gerar uma solução viável). O (**Tempo 1^o GAP**), como esperado, consumiu mais tempo de execução que o (**Tempo 1^a sol**). Semelhante ao cenário de inicialização de rota, observa-se, em alguns casos, um tempo de execução maior que aquele consumido para encontrar uma primeira solução viável com otimização clássica.

A Tabela 5.12 compara a inicialização de rota com a inicialização do

número máximo de movimentações por vagão. Matematicamente, “Dif % para Inicialização de rota” = (“Inicialização do número máximo de movimentações por vagão” - “Inicialização de rota”) / “Inicialização de rota”. Observa-se que na inicialização por apenas f_j^i , o tempo de execução é maior que aquele alcançado com a inicialização de rota (z_{qj}^i e f_j^i). Apesar do aumento no tempo de execução quando comparado à inicialização de rota, na Tabela 5.11 pode-se observar que ainda é um tempo de execução muito menor que aquele alcançado pelo cenário de otimização clássica, mesmo para o fator **Tempo** 1^a sol. Além disso, comparado à inicialização de rota, este cenário apresentou primeiras soluções viáveis melhores, mais próximas à ótima, indicando um melhor ajuste quando se considera o uso da primeira solução na prática. A instância **I9**, por exemplo, demorou 5 segundos computacionais a mais quando comparada à inicialização de rota para achar uma primeira solução viável, porém com uma redução de 16% no valor da primeira solução (de 125 para 105).

Conclui-se que a inicialização do número máximo de movimentações por vagão a partir de conhecimento tácito se manteve um método eficaz na redução do tempo computacional de execução, encontrando boas primeiras soluções viáveis. Porém com desempenho em tempo inferior à inicialização de rota. Sendo assim, na seção 5.6, testa-se a fixação da variável f_j^i ao invés da inicialização, na tentativa de reduzir o tempo computacional dado a inclusão de novas restrições que determinam valores para f_j^i .

Adicionalmente, o método de inicialização apresentado nesta seção ainda é dependente de certo conhecimento para que possa ser parametrizado um número de movimentações útil ao modelo. E, mesmo com uma boa parametrização inicial, o *solver* pode não aproveitar a solução inicializada, a exemplo da instância **I8**. Na seção 5.7 buscamos eliminar a parametrização por conhecimento tácito, desenvolvendo uma regra para a inicialização de f_j^i .

5.6

Fixação do número máximo de movimentações definido por conhecimento tácito

O objetivo de experimentar a fixação do número máximo de movimentações por vagão é reduzir o tempo computacional de execução. A fixação da variável é, na verdade, a inclusão de várias restrições de igualdade, definindo valores para f_j^i o que reduz o número de variáveis do modelo. No entanto, não é esperado que, por conhecimento tácito, sejam definidos valores para f_j^i que determinam a solução ótima. Assim, é esperado que a solução ótima para cada instância seja diferente das demais soluções ótimas encontradas nos demais cenários.

Para fixar o número máximo de movimentações por vagão, a variável f_j^i foi definida com os mesmos valores das últimas duas rodadas anteriores (inicialização de rota e inicialização do número máximo de movimentações por vagão), que implica em uma definição de f_j^i por conhecimento tácito da operação ferroviária. A fixação de f_j^i independe de uma definição de rota. Como exemplo, as equações (5-1), (5-2) e (5-3) foram acrescentadas ao modelo, para a instância **I1**.

$$f_1^6 = 1 \tag{5-1}$$

$$f_2^6 = 1 \tag{5-2}$$

$$f_j^i = 0 \quad \forall i, j | i \neq 6 \tag{5-3}$$

Para as demais instâncias de teste da Tabela 5.1, as restrições incluídas no modelo para a fixação do valor de f_j^i podem ser extraídas dos valores definidos para a mesma variável no Apêndice C. Vale ressaltar que nenhum dos números máximos de movimentações usados para inicialização das instâncias refletem a solução ótima, mas uma solução viável qualquer.

Para os experimentos mostrados na Tabela 5.13, a solução inicial foi baseada na definição da variável f_j^i . As demais variáveis não foram iniciadas de forma que o *solver* executou algum processamento até encontrar uma primeira solução viável. Os resultados da Tabela 5.13 são apresentados da mesma forma que na Tabela 5.10 e 5.7.

Tabela 5.13: Fixação do número máximo de movimentações por vagão por conhecimento tácito

| Inst. | Resultados | | | | | | |
|-------|------------|--------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| | FO* | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | GAP 1ª sol | Tempo 1º GAP | Dif % (1ª-FO*)/FO* |
| I1 | 40 | 0,14 | 40 | <1 | 0,0% | <1 | 0% |
| I2 | 60 | 4,71 | 90 | <1 | 38,9% | <1 | 50% |
| I3 | 80 | 0,54 | 80 | <1 | 0,0% | <1 | 0% |
| I4 | 40 | 0,15 | 40 | <1 | 0,0% | <1 | 0% |
| I5 | 50 | 0,22 | 50 | <1 | 0,0% | <1 | 0% |
| I6 | 115 | 3,96 | 115 | <1 | 0,0% | <1 | 0% |
| I7 | 135 | 54,66 | 135 | 31 | 0,0% | 53 | 0% |
| I8 | 190 | 46,08 | 195 | 40 | 2,6% | 43 | 3% |
| I9 | 105 | 13,52 | 105 | 12 | 0,0% | 13 | 0% |
| I10 | 115 | 3,82 | 115 | 3 | 0,0% | 3 | 0% |

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.13, observa-se novamente o prolongamento do tempo de execução para as instâncias com valores maior de

Tabela 5.14: Comparativo entre Otimização clássica e Fixação do número máximo de movimentações por vagão

| Inst. | FO* | Tempo* | Dif % para Otimização Clássica | | |
|-------|------|--------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | Tempo 1º GAP |
| I1 | +33% | -90% | -50% | 0% | 0% |
| I2 | +20% | -91% | -44% | -100% | -100% |
| I3 | +60% | -93% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | +33% | -98% | -74% | -100% | -100% |
| I5 | +25% | -93% | -38% | 0% | 0% |
| I6 | +35% | -89% | -52% | -100% | -100% |
| I7 | +17% | -98% | +17% | -99% | -98% |
| I8 | +19% | -91% | -26% | -63% | -60% |
| I9 | +24% | -96% | -87% | -87% | -86% |
| I10 | +35% | -97% | -28% | -96% | -96% |

Tabela 5.15: Comparativo entre Inicialização de rota e Fixação do número máximo de movimentações por vagão

| Inst. | FO* | Tempo* | Dif % para Inicialização de rota | | |
|-------|------|--------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | Tempo 1º GAP |
| I1 | +33% | -84% | 0% | 0% | 0% |
| I2 | +20% | -80% | +29% | 0% | -100% |
| I3 | +60% | -94% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | +33% | -97% | 0% | 0% | -100% |
| I5 | +25% | -84% | -17% | 0% | 0% |
| I6 | +35% | -80% | -15% | -100% | -100% |
| I7 | +17% | -91% | 0% | +182% | -69% |
| I8 | +19% | -82% | -19% | +264% | -61% |
| I9 | +24% | -95% | -16% | +50% | -86% |
| I10 | +35% | -92% | -15% | +50% | -84% |

n (vagões) e m (trechos). Para a instância **I7**, novamente constatou-se diferença entre o tempo para calcular o gap da primeira solução e o tempo consumido para apontar uma primeira solução viável, porém uma diferença menos significativa que nos casos de inicialização. A (**Dif %**) da função objetivo ótima para a primeira solução encontrada ficou em 0% para a maioria das instâncias, exceto para as instâncias **I2** (50%) e **I8** (3%). A solução ótima, para o caso da fixação do número máximo de movimentações por vagão, além de se aproximar bastante da primeira solução viável encontrada, não traz tanto benefício por descolar bastante da solução ótima global do problema. A Tabela 5.14 mostra a comparação da solução ótima no cenário de otimização clássica com aquela do cenário de fixação de f_j^i para cada instância (coluna **FO***). Matematica-

Tabela 5.16: Comparativo entre Inicialização e Fixação do número máximo de movimentações por vagão

| | | Dif % para Inicialização do número máximo de movimentações por vagão | | | |
|-------|------|--|--------------|-----------------|-----------------|
| Inst. | FO* | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | Tempo 1º GAP |
| I1 | +33% | -90% | 0% | 0% | 0% |
| I2 | +20% | -84% | +29% | 0% | -100% |
| I3 | +60% | -99% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | +33% | -97% | 0% | 0% | -100% |
| I5 | +25% | -88% | 0% | 0% | 0% |
| I6 | +35% | -81% | 0% | -100% | -100% |
| I7 | +17% | -92% | 0% | -34% | -74% |
| I8 | +19% | -93% | -26% | -82% | -81% |
| I9 | +24% | -87% | 0% | -8% | -86% |
| I10 | +35% | -92% | 0% | -25% | -85% |

mente, “Dif % para Otimização Clássica” = (“Fixação do número máximo de movimentações por vagão” - “Otimização Clássica”) / “Otimização Clássica”. Para os experimentos com inicialização de variáveis, esse descolamento da solução ótima não ocorre, as Tabelas 5.15 e 5.16 comparam a solução ótima da fixação com aquelas de inicialização e observa-se a mesma diferença percentual do cenário de otimização clássica. Matematicamente, “Dif % para Inicialização de rota” = (“Fixação do número máximo de movimentações por vagão” - “Inicialização de rota”) / “Inicialização de rota”. e “Dif % para Inicialização do número máximo de movimentações por vagão” = (“Fixação do número máximo de movimentações por vagão” - “Inicialização do número máximo de movimentações por vagão”) / “Inicialização do número máximo de movimentações por vagão”. Extrapolando para a prática, poderia-se balizar pelo **GAP** 1ª sol para determinar se usa a primeira solução ou se aguarda a solução ótima, caso a primeira solução viável não elimine a dúvida quanto à necessidade de investimentos no pátio.

O comparativo aqui, é realizado em cinco fatores, acrescentando aos demais já apresentado a comparação entre valores da solução ótima (**FO***).

Pela Tabela 5.14, observa-se que com a fixação de f_j^i por conhecimento tácito, o **Tempo** 1ª sol reduziu (ou manteve) em todas as instâncias, de forma significativa, principalmente, para a instância mais demorada (**I7**). Ao comparar com o cenário de inicialização do número máximo de movimentações por vagão (Tabela 5.15), o **Tempo** 1ª sol também reduziu para todas as instâncias, porém em menor grau. **I7** que havia tido redução de 99% frente ao cenário de otimização clássica, reduziu apenas 34% no cenário de inicialização

do número máximo de movimentações por vagão. Já comparando com o cenário de inicialização de rota, o **Tempo** 1^a sol aumentou significativamente para as instâncias maiores (de **I7** a **I10**). A qualidade da primeira solução viável encontrada (**FO** 1^a sol) foi um pouco melhor, porém não compensando o aumento no tempo de execução.

Conclui-se que a fixação do número máximo de movimentações por vagão a partir de conhecimento tácito reduziu o tempo computacional de execução, encontrando boas primeiras soluções viáveis. Porém, ainda inferior aos cenários de inicialização de rota pelo tempo e pela qualidade da solução ótima. Sendo assim, na seção 5.7, busca-se a inicialização da variável f_j^i novamente, porém a partir de um método de cálculo definido, na tentativa de reduzir ou manter o tempo computacional de execução e de reduzir o tempo de especialistas na parametrização da inicialização.

5.7

Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto

Nesta seção, as instâncias são inicializadas a partir da definição da variável f_j^i por um método matemático: um *fator chave* é multiplicado ao número mínimo viável de movimentações por vagão. Espera-se que, se a instância se tratasse da movimentação de um único vagão da posição de chegada para a posição de destino, o número mínimo de movimentações viáveis já seria a solução ótima. Definindo *fator chave* = 1,0, a inicialização da instância já geraria como primeira solução viável, a solução ótima. Porém, extrapolando este raciocínio para instâncias com vários vagões, onde a movimentação de um interfere diretamente na movimentação de outro, o número de movimentações mínimo viável para cada vagão (caminho mais curto), de forma independente, pode, quando agrupado, ser inviável. Nestes casos, uma opção seria definir *fator chave* > 1,0, até que a inicialização gere uma solução viável. Com isso, é esperado que a primeira solução viável gerada pela inicialização seja bem próxima da ótima, potencialmente reduzindo o tempo de execução.

Para inicializar o número máximo de movimentações por vagão, a variável f_j^i foi definida a partir do cálculo do caminho mais curto entre o trecho de chegada e o trecho de saída de cada vagão individualmente, multiplicando este valor pelo *fator chave*. O cálculo do caminho mais curto para os experimentos desta seção foi feito manualmente. No caso de vagões cuja posição de chegada e saída são iguais, o caminho mais curto deve resultar em 1. O *fator chave* de multiplicação variou de 1,0 a 4,5 para cada instância. Para a instância **I1**, por exemplo, o vagão $j = 1$ tem sua chegada no trecho $q = 2$ e sua

saída no trecho $q = 1$. Dessa forma, pelo *layout* apresentado na Figura 5.1 fica fácil perceber que o caminho mais curto é $q = \{2, 1\}$, totalizando duas movimentações. Assim, quando o *fator chave* de multiplicação é 1,0, o índice i para que $f_1^i = 1$ deve ser 2. Quando o *fator chave* é 1,5, o índice i para que $f_1^i = 1$ deve ser 3, e assim por diante. A Tabela 5.17 mostra a inicialização de f_j^i , para a instância **I1**, apresentando todo $f_j^i \neq 0$, para cada *fator chave* de multiplicação. No caso em que o resultado da multiplicação do caminho mais curto não resultar em um número inteiro, o resultado é arredondado para cima.

Tabela 5.17: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I1** através de fator multiplicador do caminho mais curto

| | | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-----|--|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| j | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| 1 | | $f_1^2 = 1$ | $f_1^3 = 1$ | $f_1^4 = 1$ | $f_1^5 = 1$ | $f_1^6 = 1$ | $f_1^7 = 1$ | $f_1^8 = 1$ | $f_1^9 = 1$ |
| 2 | | $f_2^2 = 1$ | $f_2^3 = 1$ | $f_2^4 = 1$ | $f_2^5 = 1$ | $f_2^6 = 1$ | $f_2^7 = 1$ | $f_2^8 = 1$ | $f_2^9 = 1$ |

Para as demais instâncias de teste da Tabela 5.1, as definições de f_j^i podem ser consultadas no Apêndice D para inicialização do número máximo de movimentações por vagão através de fator multiplicador do caminho mais curto.

Para os experimentos mostrados nas Tabelas desta seção, a solução inicial foi baseada na definição da variável f_j^i . As demais variáveis não foram iniciadas de forma que o *solver* executou algum processamento até encontrar uma primeira solução viável.

A Tabela 5.18 apresenta, para cada instância, o tempo em segundos de CPU consumidos pelo *solver* até encontrar a primeira solução viável, resultado comparável à coluna **Tempo** 1^a sol das Tabelas 5.4, 5.7, 5.10 e 5.13. As células preenchidas com **x** indicam que, após algum processamento, a inicialização não produziu nenhuma solução inicial e foi descartada. Semelhante ao ocorrido com a instância **I8** no cenário de inicialização do número máximo de movimentações por conhecimento tácito (Tabela 5.10). Nesses casos, a Tabela 5.18 não mostra o tempo decorrido até encontrar a primeira solução viável e sim, indica que a inicialização foi descartada. As células preenchidas com - indicam que a inicialização violou alguma restrição do modelo e, por isso, foi descartada. Isso ocorre quando o *fator chave* multiplicado pelo caminho mais curto (arredondado para cima) gera um número superior à cardinalidade do conjunto de operações (o) para algum vagão. Pelos resultados apresentados na Tabela 5.18, percebe-se que, consistentemente, quanto menor o *fator chave* de multiplicação, menor o tempo de execução até encontrar a primeira solução viável. Isto, quando se descarta as soluções cuja inicialização foi descartada

pelo *solver*. Exceção à essa regra ocorre em 4 dos 40 resultados apresentados, são eles: **I1** fator 4,5, **I2** fator 4,0, **I4** fator 2,5 e **I4** fator 3,5. Para os casos cuja inicialização foi descartada, esse descarte ocorre em menos de 1 segundo computacional de processamento. Sendo assim, o caminho ideal seria começar o processamento pelo fator 1,0 e, caso a solução seja descartada, parar o processamento e aumentar para o fator 1,5 e assim por diante até o primeiro processamento cuja inicialização seja aproveitada. Essa metodologia é corroborada pelo fato de que, a partir do primeiro *fator chave* cuja inicialização é utilizada pelo *solver*, os demais fatores, em geral, geram inicializações aproveitáveis até que o fator cresce a ponto de, para algum vagão, a restrição ser violada. Exceção à esse fato observado ocorre na **I7** fator 1,5. Pelos resultados da Tabela 5.18 também pode-se avaliar se a escolha da cardinalidade do conjunto de operações foi satisfatória (parâmetro definido manualmente). Se nenhuma inicialização foi aproveitada pelo *solver* até o momento que alguma restrição passa a ser violada, isto indica que *o* deve ser um valor maior que o atual para aquela instância.

Tabela 5.18: Tempo em segundos de CPU para encontrar a 1ª solução viável a partir da inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático

| Inst. | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-------|------------------------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|------|
| | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| I1 | x | x | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,13 | 0,10 |
| I2 | x | x | 0,27 | 0,31 | 0,58 | 2,36 | 1,84 | 3,52 |
| I3 | x | x | x | x | x | x | 0,16 | 0,18 |
| I4 | x | x | 0,26 | 0,18 | 0,33 | 0,19 | 0,20 | 0,22 |
| I5 | x | x | x | x | 0,07 | 0,07 | 0,09 | 0,10 |
| I6 | 2,91 | 4,83 | 9,22 | - | - | - | - | - |
| I7 | 24,02 | x | 234,87 | - | - | - | - | - |
| I8 | 21,85 | - | - | - | - | - | - | - |
| I9 | 12,12 | 15,91 | 26,54 | 29,55 | 51,23 | 136,73 | 327,12 | - |
| I10 | 2,91 | 5,81 | 9,64 | - | - | - | - | - |

A Tabela 5.19 apresenta, como na Tabela 5.18, para cada instância, a diferença percentual entre a primeira solução viável encontrada e a solução ótima, resultado comparável à coluna **Dif%** $(1^a-FO^*)/FO^*$ das Tabelas 5.4, 5.7, 5.10 e 5.13. As células preenchidas com **x** ou com **-** têm o mesmo significado daquele já apresentado para a Tabela 5.18: a inicialização não produziu nenhuma solução inicial e foi descartada e a inicialização violou alguma restrição do modelo e foi descartada, respectivamente. Pelos resultados apresentados, percebe-se que, quanto menor o *fator chave* de multiplicação, menor a diferença percentual da primeira solução viável para a solução ótima.

Tabela 5.19: Diferença percentual entre a primeira solução viável e a solução ótima a partir da inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático

| Inst. | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-------|------------------------------|-----|-----|------|------|-------|------|------|
| | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| I1 | x | x | 0% | 17% | 33% | 50% | 67% | 83% |
| I2 | x | x | 0% | 0% | 40% | 120% | 80% | 100% |
| I3 | x | x | x | x | x | x | 0% | 10% |
| I4 | x | x | 0% | 17% | 33% | 50% | 67% | 83% |
| I5 | x | x | x | x | 0% | 12,5% | 25% | 038% |
| I6 | 0% | 47% | 88% | - | - | - | - | - |
| I7 | 0% | x | 61% | - | - | - | - | - |
| I8 | 0% | - | - | - | - | - | - | - |
| I9 | 0% | 47% | 88% | 135% | 176% | 224% | 265% | - |
| I10 | 0% | 59% | 82% | - | - | - | - | - |

Exceção à essa regra ocorre em 2 dos 40 resultados apresentados: **I2** fator 4,0 e fator 4,5. Observa-se que, cada instância tem um *fator chave* mínimo específico onde a inicialização passa a ser aproveitada pelo *solver*. Para a instância **I1**, por exemplo, o fator mínimo é 2,0, enquanto que para a instância **I3**, o fator mínimo é 4,0. Observa-se, também, que a primeira solução viável encontrada nos cenários onde a inicialização foi aproveitada pelo *solver*, cujo fator é o mínimo para cada instância, a diferença percentual para a solução ótima é 0% em todos os casos. Esse fato indica que, efetivamente para este cenário de inicialização, onde a análise comece do menor fator e vai progredindo com pequenos incrementos no *fator chave* de multiplicação, a primeira solução viável encontrada para o primeiro cenário onde a inicialização é aproveitada será muito próxima à solução ótima. Vale destacar que a primeira solução viável é aquela usada pelo modelo para inicializar o processamento rumo à função objetivo ótima. No caso da instância **I7**, por exemplo, o *solver* encontrou uma primeira solução cuja função objetivo era 155 e, 0,40 segundos de CPU depois, encontrou a solução cuja função objetivo era 115, porém apenas a última solução foi usada para inicializar o modelo. Sendo assim, a solução cuja função objetivo tem valor 115 é considerada como a primeira solução viável.

Considerando, então, que serão executados os cenários partindo do *fator chave* igual a 1,0, desconsiderando os casos em que o *solver* descartou a inicialização e encerrando no primeiro caso em que o *solver* aproveita a inicialização para gerar uma solução inicial para o modelo, a Tabela 5.20 apresenta os resultados para o *fator chave* mínimo. Para cada instância são apresentados os resultados apenas para o *fator chave* indicado na coluna **Fator chave**. As demais colunas são semelhantes às aquelas apresentadas nas seções

anteriores. Para o tempo total de análise, nos casos que o *fator chave* difere de 1,0, pode ser acrescentado 1 segundo computacional para cada cenário descartado, o que é quase insignificante dado que, no pior caso (*fator chave* = 4,0) acrescentaria 6 segundos computacionais ao tempo total de análise.

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.20, observa-se novamente o prolongamento do tempo de execução para as instâncias com valores maior de n (vagões) e m (trechos). Para a maioria das instâncias também constatou-se diferença entre o tempo para calcular o gap da primeira solução e o tempo consumido para apontar uma primeira solução viável. A (**Dif %**) da função objetivo ótima para a primeira solução encontrada ficou em 0% para todas as instâncias, como já observado na Tabela 5.19. A primeira solução viável assim como a função objetivo da solução ótima são iguais à função objetivo ótima do cenário de otimização clássica, podendo dizer que é a solução ótima global do problema. De todos os cenários testados, a inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático é o mais efetivo em termos de se usar a primeira solução viável alcançada.

Dado a comprovação da qualidade da primeira solução viável, basta saber se este cenário trouxe ganho significativo em tempo quando comparado aos demais cenários de otimização clássica, inicialização por conhecimento tácito ou fixação. A Tabela 5.21 compara o tempo computacional consumido para alcançar a primeira solução viável em segundos de CPU (**Tempo 1ª sol**) do cenário “Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto” para com os demais cenários testados: Otimização clássica (**Otimiz. clássica**), Inicialização de rota definida por conhecimento tácito (**Inic. Rota**), Inicialização do número máximo de

Tabela 5.20: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático

| Inst. | Fator chave | FO* | Tempo* | Resultados | | | | |
|-------|-------------|-----|--------|------------|--------------|------------|--------------|--------------------|
| | | | | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | GAP 1ª sol | Tempo 1º GAP | Dif % (1ª-FO*)/FO* |
| I1 | 2,0 | 30 | 1,96 | 30 | <1 | 33,3% | <1 | 0% |
| I2 | 2,0 | 50 | 5,99 | 50 | <1 | 30,0% | 1 | 0% |
| I3 | 4,0 | 50 | 7,90 | 50 | <1 | 60,0% | <1 | 0% |
| I4 | 2,0 | 30 | 8,30 | 30 | <1 | 33,3% | 1 | 0% |
| I5 | 3,0 | 40 | 1,56 | 40 | <1 | 50,0% | <1 | 0% |
| I6 | 1,0 | 85 | 19,69 | 85 | 3 | 0,0% | 19 | 0% |
| I7 | 1,0 | 115 | 138,33 | 115 | 24 | 0,0% | 137 | 0% |
| I8 | 1,0 | 160 | 118,79 | 160 | 22 | 0,0% | 118 | 0% |
| I9 | 1,0 | 85 | 97,51 | 85 | 12 | 0,0% | 97 | 0% |
| I10 | 1,0 | 85 | 22,77 | 85 | 3 | 0,0% | 22 | 0% |

movimentações definido por conhecimento tácito (**Inic. max.Mov.**) e Fixação do número máximo de movimentações definido por conhecimento tácito (**Fix. max.Mov.**). Matematicamente, “Dif % do tempo em segundos de CPU para encontrar a 1ª solução viável” = (“**Tempo 1ª sol**” no método “Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto” - “**Tempo 1ª sol**” em cada um dos outros métodos) / “**Tempo 1ª sol**” em cada um dos outros métodos.

Pela Tabela 5.21, observa-se que com a inicialização de f_j^i por método matemático, o **Tempo 1ª sol** reduziu (ou manteve) em todas as instâncias quando comparado à otimização clássica ou à inicialização de f_j^i por conhecimento tácito. O mesmo quase ocorre quando comparado ao cenário de fixação de f_j^i por conhecimento tácito, onde apenas a instância **I6** prolongou mais, sendo 3 segundos computacionais mais longa. Já comparando com o cenário de inicialização de rota, o **Tempo 1ª sol** aumentou significativamente para as instâncias maiores (de **I6** a **I10**). Dentre todos os cenários testados, pode-se dizer que este é o segundo melhor modelo no critério **Tempo 1ª sol**, perdendo apenas para o cenário de inicialização de rota. No entanto, a preferência por esse cenário prevalece dado a qualidade da solução encontrada.

Conclui-se que a inicialização do número máximo de movimentações por vagão a partir de método matemático é efetivo quando opta-se por usar a primeira solução viável encontrada, analisando do menor *fator chave* para o maior. O tempo computacional de execução ficou significativamente reduzido, podendo ser um método potencial para uso na prática. A próxima seção

Tabela 5.21: Comparação do tempo em segundos de CPU para encontrar a 1ª solução viável no cenário de Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático com os demais

| Inst. | Fator chave | Dif % do tempo em segundos de CPU para encontrar a 1ª solução viável | | | |
|-------|-------------|--|------------|----------------|---------------|
| | | Otimiz. Clássica | Inic. Rota | Inic. max.Mov. | Fix. max.Mov. |
| I1 | 2,0 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| I2 | 2,0 | -100% | 0% | 0% | 0% |
| I3 | 4,0 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| I4 | 2,0 | -100% | 0% | 0% | 0% |
| I5 | 3,0 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| I6 | 1,0 | -83% | +50% | -25% | +100% |
| I7 | 1,0 | -99% | +118% | -49% | -23% |
| I8 | 1,0 | -79% | +100% | -90% | -45% |
| I9 | 1,0 | -87% | +50% | -8% | 0% |
| I10 | 1,0 | -96% | +50% | -25% | 0% |

apresenta instâncias maiores submetidas à inicialização discutida nesta seção.

5.8

Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto submetida a instâncias maiores

Dado o bom desempenho da inicialização do número máximo de movimentações por vagão a partir de método matemático, esta seção busca submeter este mesmo método a instâncias maiores. A Tabela 5.22 define as instâncias testadas nesta seção.

Tabela 5.22: Definição das Instâncias Maiores

| Inst. | n (vagões) | m (trechos) | o (operações) | v (trens) | <i>Layout</i> |
|--------------|-----------------|------------------|--------------------|----------------|---|
| I11 | 7 | 23 | 30 | 6 |  |
| I12 | 8 | 23 | 30 | 6 |  |
| I13 | 9 | 23 | 30 | 6 |  |
| I14 | 10 | 23 | 30 | 6 |  |
| I15 | 11 | 23 | 40 | 6 |  |

Como pode ser observado, as instâncias são semelhantes à instância **I7** (ver Tabela 5.1) porém com incremento no número de vagões (n). O objetivo destes experimentos é observar o comportamento do tempo de execução com o aumento da variável que mais influencia neste resultado, a partir da instância que apresentou maior tempo de execução nos demais experimentos. Para a instância **I15**, o número de operações (o) foi incrementado para garantir uma solução viável para a instância. O detalhamento dos parâmetros para cada instância pode ser encontrado no Apêndice A e a inicialização do número máximo de movimentações por vagão no Apêndice D. Foi dado um limite de tempo de execução de 3.600 segundos computacionais. Superando este limite, o *solver* encerra a execução do modelo.

Tabela 5.23: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão por método matemático em instâncias maiores

| Inst. | Fator chave | Resultados | | | | | | |
|--------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| | | FO* | Tempo* | FO 1ª sol | Tempo 1ª sol | GAP 1ª sol | Tempo 1º GAP | Dif % (1ª-FO*)/FO* |
| I11 | 1,0 | 110 | 178,29 | 110 | 40 | 0,0% | 177 | 0% |
| I12 | 1,0 | 105 | 236,85 | 105 | 43 | 0,0% | 235 | 0% |
| I13 | 1,0 | 105 | 324,33 | 105 | 53 | 0,0% | 322 | 0% |
| I14 | 1,0 | 105 | 1.603,93 | 105 | 317 | 0,0% | 1.599 | 0% |
| I15 | 1,0 | . | . | . | . | . | . | . |

Semelhante à seção anterior, as instâncias são inicializadas com a definição da variável f_j^i a partir do cálculo do caminho mais curto entre o trecho de chegada e o trecho de saída de cada vagão individualmente, multiplicando este valor pelo *fator chave*. O método de inicialização inicia com *fator chave* = 1,0 e incrementa o mesmo em 0,5 a cada rodada. Assim que uma solução inicial viável é gerada, encerra-se a inicialização e é aproveitada a melhor solução encontrada em 3.600 segundos computacionais. O cálculo do caminho mais curto para os experimentos desta seção foi feito manualmente.

A Tabela 5.23 apresenta os resultados para cada instância definida na Tabela 5.22, considerando o primeiro *fator chave* a gerar uma solução viável. As colunas são semelhantes às aquelas apresentadas nas seções anteriores, idênticas à Tabela 5.20. As células preenchidas com “.” indicam que a instância extrapolou a memória disponível no computador, o que inviabilizou a obtenção de qualquer resultado. Este é o caso para a instância **I15** inicializada por qualquer *fator chave*. Para esta instância, só é representado o *fator chave* = 1,0 na Tabela 5.23. As demais instâncias tiveram uma solução inicial viável a partir da inicialização *fator chave* = 1,0. Sendo assim, não foi necessário verificar cenários com *fator chave* > 1,0. Observa-se que para todos os cenários executados, a diferença percentual entre a primeira solução viável encontrada e a ótima é 0%, semelhante aos resultados da seção anterior. As soluções ótimas podem ser encontradas no Apêndice B.

Os tempos computacionais de execução (**Tempo***, **Tempo** 1^a sol e **Tempo*** 1^o GAP) crescem consistentemente com o aumento do número de vagões. A Figura 5.3 ilustra graficamente esse efeito. Nota-se um crescimento exponencial, principalmente considerando o tempo até alcançar a solução ótima. Apesar do crescimento no tempo até encontrar uma primeira solução viável (**Tempo** 1^a sol) não ser na mesma taxa, pode-se também esperar um comportamento exponencial com o aumento de n . A complexidade do problema fica evidente com a extrapolação de memória causada na execução da instância **I15**.

As instâncias testadas, apesar de uma amostra pequena, representam casos muito complexos e raros na prática. Como exemplo, a inversão de vagões nas instâncias de **I1** a **I5** com entrada e saída pela mesma extremidade do pátio. Os tipos de movimentações que foram resolvidas pelo modelo, indicam que qualquer tipo de movimentação na prática será resolvido pelo modelo dado que a expectativa é que sejam condições bem menos complexas do que essas já testadas.

Conclui-se que o método proposto pode ser utilizado na indústria em qualquer pátio porém para casos específicos dado que consegue resolver instân-

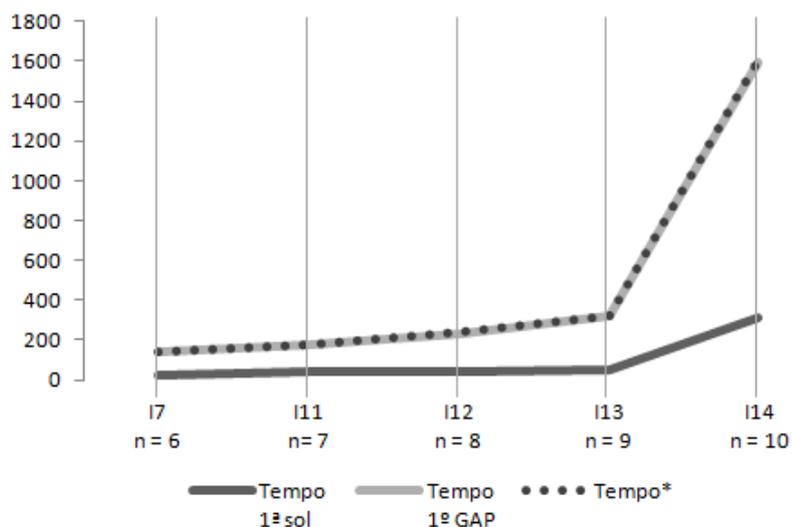


Figura 5.3: Tempo de execução das instâncias com aumento do número de vagões

cias com até 10 vagões. Lembrando que cada vagão no modelo pode representar um bloco de vagões. Entretanto, para um uso irrestrito são necessários maiores avanços na redução do tempo de execução e da complexidade computacional.

6

Conclusões

Este estudo teve por finalidade permitir uma análise estratégica da capacidade de pátios de classificação planos com 1 sub-pátio, a partir do ponto de vista de uma empresa operadora ferroviária que deve decidir por investir ou não na infraestrutura do pátio de classificação baseando-se no desempenho esperado do mesmo. Ferramentas que permitam ao especialista concluir que o pátio tem capacidade de processamento sem a necessidade de estudos detalhados do pátio são de grande utilidade para o planejamento e operação ferroviária. Três condições são *sine qua non* para um resultado de sucesso no método de análise proposto: ser aplicável a qualquer pátio de classificação plano com 1 sub-pátio, consumir um tempo baixo para parametrização/*setup* e ter o tempo de execução computacional menor que 1h.

Para alcançar a finalidade proposta, o primeiro objetivo foi descrever o problema. A partir da revisão bibliográfica notou-se que este estudo é pioneiro por focar esforços na modelagem do problema de classificação de vagões em pátios planos com 1 sub-pátio. O formato escolhido para descrição matemática do problema, alinhada ao estado evolutivo das abordagens revisadas, é a programação matemática baseada na teoria de *scheduling* de produção.

Por se tratar de um problema de horizonte estratégico, foram assumidas algumas premissas simplificadoras. Por exemplo, assume-se que sempre haverá locomotiva e equipe de manobra para realizar a circulação apontada pelo modelo. As linhas ferroviárias são discretizadas em trechos de comprimento padrão, mesmo comprimento definido para todos os vagões. Não é levada em consideração a ocupação do pátio por locomotivas. Não é considerado tempo para inspeção de vagões ou teste de partida para trens. Nenhuma dessas premissas, no entanto, inviabiliza o uso prático do modelo. Algumas delas podendo ser contornadas ao considerar um acréscimo no tempo de movimentação.

Dos principais fatores que influenciam o processamento do pátio, a disponibilidade de locomotivas e de equipe de manobra pode ser ignorada por se tratar de uma análise estratégica. A demanda em vagões, a sequência de vagões nos trens e o *layout* são parametrizados com base em informações já conhecidas pelos especialistas. Ademais, o plano de manobra é otimizado

através da solução do modelo. Qualquer pátio de classificação plano com 1 sub-pátio pode ser representado pelo modelo alterando os parâmetros de entrada. Além disso, a parametrização proposta é simples e cumpriu a condição *sine qua non* de consumir um tempo baixo para parametrização/*setup*. Existe um conjunto de possibilidades ao parametrizar a sequência de vagões nos trens. Com isso, uma ordenação viável de cada trem deve ser escolhida como *input* do modelo. Para que seja possível concluir que o pátio não tem capacidade de processamento, o ideal seria testar diferentes cenários de parametrização, mantendo o *layout* fixo.

O segundo objetivo, para alcançar a finalidade proposta foi definir um método que permitisse testar a hipótese se o pátio tem ou não capacidade. Como o plano de manobras é um dos principais fatores que influenciam a capacidade de processamento de um pátio ferroviário, buscou-se pela solução ótima do modelo. A resolução do modelo via otimização traria o melhor plano de manobras e, portanto, a melhor resposta para o especialista. A otimização clássica consumiu um tempo de execução muito alto. Os fatores que influenciaram mais significativamente o tempo computacional de execução foram n , m e o , o número de vagões, trechos e operações, respectivamente. Com essa constatação, foram desenvolvidos diferentes métodos de inicialização das variáveis inteiras do modelo, buscando redução no tempo de execução. Foi observado pelos experimentos que, para a maioria dos cenários de inicialização, a primeira solução viável encontrada pelo modelo já se aproximava da ótima, de forma que pode ser usada como solução para o problema.

O método de inicialização que mais reduziu o tempo computacional de execução até encontrar a primeira solução viável foi a “Inicialização de rota definida por conhecimento tácito”. Porém, esta inicialização exige muito tempo do especialista para determinar uma rota viável como *input*.

O método “Inicialização do número máximo de movimentações definido por um fator multiplicador do caminho mais curto” é um método simples de ser aplicado que não onera o tempo de parametrização do modelo. A primeira solução viável encontrada com este método se aproximou muito da solução ótima e o tempo de execução foi relativamente baixo. Na tentativa de extrapolar este método para instâncias um pouco maiores, observou-se um aumento exponencial no tempo de execução. Indicando, desta forma, que a inicialização do número máximo de movimentações não seria suficiente para escalar o uso na indústria, onde o número de vagões e trechos pode superar aqueles testados neste estudo.

Conclui-se que este trabalho trouxe avanços à literatura sobre transportes ferroviários por descrever matematicamente um problema pouquíssimo discu-

tido à luz da otimização. A aplicação efetiva deste método em escala industrial, entretanto, carece de adaptações, principalmente buscando redução da complexidade computacional. A função objetivo *makespan* apresenta uma convergência discreta e difícil. Além disso, o parâmetro P ser o mesmo para todos os vagões e todos os trechos gera um problema de alta simetria. Sendo assim, a inclusão de restrições de quebra de simetria pode agilizar a convergência e reduzir a complexidade computacional, como exemplo as restrições 6-1 e 6-2.

$$x_{ijkl}^q \leq z_{qj}^i \quad \forall q, i, j, k, l \quad (6-1)$$

$$x_{ijkl}^q \leq z_{ql}^k \quad \forall q, i, j, k, l \quad (6-2)$$

Em particular, especialistas ferroviários indicam a necessidade de ajustes na permissão de circulação de vagões em sentidos opostos, entre seções de via adjacentes nas quais haja fisicamente um AMV. A forma de delimitação do pátio, também, merece um aprofundamento. Os trechos parametrizados como entrada ou saída de trens são consideradas como recursos disponíveis para o processamento do pátio. Ou seja, o modelo entende que pode ocupar estes trechos a qualquer momento com qualquer vagão. Na prática, os trens chegam e saem pela alça de manobra (ligação com a linha de circulação), mas geralmente não podem ocupar essas linhas para manobras. Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se definir entrada e saída dos trens pela alça de manobra porém restringir o uso das mesmas para qualquer outra movimentação.

O MILP desenvolvido traduz as atividades mais comuns em qualquer pátio ferroviário plano de classificação, evitando características individuais. No entanto, outras características que podem ser de interesse para um pátio de classificação específico, como o cumprimento do horário de saída (data de conclusão), o respeito à ordem de prioridade de saída entre os vagões e o bloqueio temporário de seções da via para manutenção podem ser incluídas como restrições no modelo ou através de diferentes funções objetivos. No que tange à parametrização do modelo, indica-se desenvolver um gerador de cenários que produza diferentes planos e grades de trens viáveis para execução no modelo. Sugere-se também o desenvolvimento de uma heurística construtiva para definir uma solução inicial viável.

Apesar de não ser escopo deste trabalho, observa-se que o problema aqui definido pode servir de inspiração para problemas táticos ou operacionais. Para tal, principalmente, devem ser acrescentadas restrições que modelem o número de locomotivas e o número de equipes de manobra disponíveis no pátio. Outro fator relevante para evolução da modelagem atual neste aspecto é a flexibilidade para que o modelo decida a formação dos trens de saída.

Referências Bibliográficas

- [1] BOHLIN, M.; HANSMANN, R.; ZIMMERMANN, U. T.. **Optimization of railway freight shunting**. International Series in Operations Research and Management Science, 268:181–212, 2018.
- [2] BONTEKONING, Y. M.; PRIEMUS, H.. **Breakthrough innovations in intermodal freight transport**. Transportation Planning and Technology, 27:335–345, 2004.
- [3] LANGE, J.; WERNER, F.. **Approaches to modeling train scheduling problems as job-shop problems with blocking constraints**. Journal of Scheduling, 21:191–207, 2018.
- [4] GUO, R.; GUO, J.; XIE, G.. **Optimizing model of a railroad yard 's operations plan based on production scheduling theory**. In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RAILWAY ENGINEERING DESIGN AND OPERATION, 2016.
- [5] MICHAEL L. PINEDO. **Theory, Algorithms, and Systems**. Springer Science+Business Media, New York, 3rd edition, 2008.
- [6] BARROW, K. **Precision Scheduled Railroading – evolution or revolution?**, 2012. Last accessed August 2020.
- [7] TROUP, K. F.; BELOVARAC, K. J.; POTRATZ, J. T.; O'NEIL, P.; KIRK, A.. **Railroad classification yard technology - an introductory analysis of functions and operations**. Technical Report FRA-ORD-75-55, U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Washington, DC, 1975.
- [8] HANSMANN, R. S.; ZIMMERMANN, U. T.. **Optimal sorting of rolling stock at hump yards**. Mathematics - Key Technology for the Future: Joint Projects Between Universities and Industry 2004-2007, 2008.
- [9] HANSMANN, R. S.. **Optimal Sorting of Rolling Stock**. Phd thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 2010.
- [10] ASSAD, A. A.. **Models for rail transportation**. Transportation Research Part A, 14:205–220, 1980.

- [11] KROON, L.G.; LENTINK, R.M.; SCHRIJVER, A.. **Shunting of passenger train units: An integrated approach**. *Transportation Science*, 42:436–449, 2008.
- [12] BELOŠEVIĆ, I.; IVIĆ, M.. **Variable neighborhood search for multistage train classification at strategic planning level**. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33:220–242, 2018.
- [13] JAEHN, F.; OTTO, A.; SEIFRIED, K.. **Shunting operations at flat yards: retrieving freight railcars from storage tracks**. *OR Spectrum*, 40:367–393, 2018.
- [14] DAHLHAUS, E.; MANNE, F.; MILLER, M.; RYAN, J.. **Algorithms for combinatorial problems related to train marshalling**. In: *IN PROCEEDINGS OF AWOCA 2000, IN HUNTER VALLEY, 2000*.
- [15] LI, H.; JIN, M.; SONG, R.; HE, S.; SONG, J.. **Dynamic railcar connection planning in classification yards**. *Transportation Letters*, 8:77–89, 2016.
- [16] CRANE, R. R.; BROWN, F. B.; BLANCHARD, R. O.. **An analysis of a railroad classification yard**. *Journal of the Operations Research Society of America*, 3:262–271, 1955.
- [17] PETERSEN, E. R.. **Railyard modeling: Part i. prediction of put-through time**. *Transportation Science*, 11:37–49, 1977.
- [18] PETERSEN, E. R.. **Railyard modeling: Part ii. the effect of yard facilities on congestion**. *Transportation Science*, 11:50–59, 1977.
- [19] GOMES, C. M. N.. **Análise de desempenho operacional de pátios ferroviários**. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1982.
- [20] TURNQUIST, M. A.; DASKIN, M. S.. **Queuing models of classification and connection delay in railyards**. *Transportation Science*, 16:207–230, 1982.
- [21] MARTLAND, C. D.. **Pmake analysis: Predicting rail yard time distributions using probabilistic train connection standards**. *Transportation Science*, 16:476–506, 1982.
- [22] YAGAR, S.; SACCOMANNO, F. F.; SHI, Q.. **An efficient sequencing model for humping in a rail yard**. *Transportation Research Part A: General*, 17:251–262, 1983.

- [23] DAGANZO, C. F.; DOWLING, R.G.; HALL, R. W.. **Railroad classification yard throughput: The case of multistage triangular sorting.** *Transportation Research Part A: General*, 17:95–106, 1983.
- [24] DAGANZO, C. F.. **Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements.** *Transportation Science*, 20:189–199, 1986.
- [25] DAGANZO, C. F.. **Dynamic blocking for railyards: Part i. homogeneous traffic.** *Transportation Research Part B*, 21:1–27, 1987.
- [26] DAGANZO, C. F.. **Dynamic blocking for railyards: Part ii. heterogeneous traffic.** *Transportation Research Part B*, 21:29–40, 1987.
- [27] ALVES, W. F.. **O impacto da mobilização na capacidade de pátios ferroviários.** Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1987.
- [28] SANTOS, V. M.. **Procedimentos para o dimensionamento de pátios ferroviários de classificação por gravidade.** Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1989.
- [29] CRUZ, M. M. C.; RICHIERI, M. A. S. S. F.. **Dados para um estudo do comportamento dinâmico de um pátio de manobras ferroviárias.** In: XXXV SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, p. 933–944, Natal, RN, 2003.
- [30] JÚNIOR, W. O. R.; LOPES, R. H. C.. **Um otimizador branch bound paralelo para manobras em pátios ferroviários.** In: XXXV SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, p. 1633–1646, Natal, RN, 2003.
- [31] HE, S.; SONG, R. CHAUDHRY, S. S.. **An integrated dispatching model for rail yards operations.** *Computers and Operations Research*, 30:939–966, 2003.
- [32] RAMOS, G. M.. **Análise prospectiva da capacidade de processamento de cargas pela ferrovia no porto de santos.** Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [33] DI STEFANO, G.; KOČI, M. L.. **A graph theoretical approach to the shunting problem.** *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 92:16–33, 2004.

- [34] LÜBBECKE, M. E.; ZIMMERMANN, U. T.. **Shunting minimal rail car allocation**. Computational Optimization and Applications, 31:295–308, 2005.
- [35] LANGONI, R. A. R.. **Metodologia para análise operacional de pátios ferroviários de classificação**, 2006.
- [36] VELOSO, S. M.. **Desenvolvimento de modelo lógico e aplicação ferramental para avaliação de capacidade de pátios ferroviários**. Monografia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- [37] BEKTAŞ, T.; CRAINIC, T. G.; MORENCY, V.. **Improving the performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 17:259–273, 2009.
- [38] MARINOV, M.; VIEGAS, J.. **Analysis and evaluation of double-ended flat-shunted yard performance employing two yard crews**. Mechanics Transport Communications Academic Journal, 2009.
- [39] SABINO, J. A.; LEAL, J. E.; STÜTZLE, T.; BIRATTARI, M.. **A multi-objective ant colony optimization method applied to switch engine scheduling in railroad yards**. Pesquisa Operacional, 30:487–514, 2010.
- [40] JAVADIAN, N.; SAYARSHAD, H. R.; NAJAFI, S.. **Using simulated annealing for determination of the capacity of yard stations in a railway industry**. Applied Soft Computing Journal, 11:1899–1907, 2011.
- [41] ADLBRECHT, J.A.; HÜTTLER, B.; ZAZGORNIK, J.; GRONALT, M.. **The train marshalling by a single shunting engine problem**. Transportation Research Part C, 58:56–72, 2015.
- [42] SILVA, L. C. F.. **Uma metodologia para avaliação de layout de pátios ferroviários de carga para estudos no nível estratégico**. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
- [43] GESTRELIUS, S.; ARONSSON, M.; JOBORN, M.; BOHLIN, M.. **Towards a comprehensive model for track allocation and roll-time scheduling at marshalling yards**. Journal of Rail Transport Planning and Management, 7:157–170, 2017.

- [44] OTTO, A.; PESCH, E.. **Operation of shunting yards: train-to-yard assignment problem.** *Journal of Business Economics*, 87:465–486, 2017.
- [45] ZHANG, L.; JIN, M.; YE, Z.; LI, H.; CLARKE, D. B.; WANG, Y.. **Macro-level classification yard capacity modeling.** *Transportation Research Record*, 2608:125–133, 2017.
- [46] ALEXANDROV, A.; GALKIN, A.; TIMUKHINA, E.; TUSHIN, N.. **Optimization flow model for handling car flows at the marshalling yard.** In: X INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE “POLYTRANSPORT SYSTEMS”, 2018.
- [47] VAN DE VEN, A.; ZHANG, Y.; LEE, W. J.; ESHUIS, R.; WILBIK, A.. **Determining capacity of shunting yards by combining graph classification with local search.** In: ICAART 2019 - PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGENTS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE, p. 285–293, Prague, Czech Republic, 2019.
- [48] DAHLHAUS E.; HORAK P.; MILLER, M.; RYAN, J. F.. **The train marshalling problem.** *Discrete Applied Mathematics*, 103:41–54, 2000.
- [49] POTTS, C. N.; STRUSEVICH, V. A.. **Fifty years of scheduling: a survey of milestones.** *Journal of the Operational Research Society*, 60:541–568, 2009.

A Detalhamento das instâncias

Neste Apêndice será apresentado os valores definidos para todos os parâmetros de cada instância apresentada no capítulo 5. Para uma explicação do que é cada parâmetro, favor consultar a Tabela 4.2. Além dos parâmetros apresentados nas Tabelas que seguem, $P = 5$ unidades de tempo para todas as instâncias. Assim como $M = 2.880$.

Tabela A.1: Valores para Parâmetros **I1**, **I3**, **I4** e **I5**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 2 |

Tabela A.2: Valores para Parâmetros **I2**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 25 | 3 | 2 | 4 | 1 |
| 4 | 25 | 3 | 1 | 4 | 2 |

Tabela A.3: Valores para Parâmetros **I6**, **I9** e **I10**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |

Tabela A.4: Valores para Parâmetros **I7**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |
| 4 | 45 | 3 | 13 | 4 | 1 |
| 5 | 45 | 3 | 14 | 0 | 19 |
| 6 | 45 | 3 | 15 | 4 | 2 |

Tabela A.5: Valores para Parâmetros **I8**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 28 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 30 |
| 3 | 0 | 0 | 38 | 2 | 29 |

Tabela A.6: Valores para Parâmetros **I11**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |
| 4 | 45 | 3 | 12 | 4 | 1 |
| 5 | 45 | 3 | 13 | 0 | 19 |
| 6 | 45 | 3 | 14 | 4 | 2 |
| 7 | 45 | 3 | 15 | 4 | 3 |

Tabela A.7: Valores para Parâmetros **I12**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |
| 4 | 45 | 3 | 11 | 4 | 1 |
| 5 | 45 | 3 | 12 | 0 | 19 |
| 6 | 45 | 3 | 13 | 4 | 2 |
| 7 | 45 | 3 | 14 | 4 | 3 |
| 8 | 45 | 3 | 15 | 4 | 4 |

Tabela A.8: Valores para Parâmetros **I13**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 3 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 2 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |
| 4 | 45 | 3 | 11 | 4 | 1 |
| 5 | 45 | 3 | 12 | 0 | 19 |
| 6 | 45 | 3 | 13 | 4 | 2 |
| 7 | 45 | 3 | 14 | 4 | 3 |
| 8 | 45 | 3 | 15 | 4 | 4 |
| 9 | 10 | 1 | 1 | 2 | 12 |

Tabela A.9: Valores para Parâmetros **I14**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 4 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 3 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |
| 4 | 45 | 3 | 11 | 4 | 1 |
| 5 | 45 | 3 | 12 | 0 | 19 |
| 6 | 45 | 3 | 13 | 4 | 2 |
| 7 | 45 | 3 | 14 | 4 | 3 |
| 8 | 45 | 3 | 15 | 4 | 4 |
| 9 | 10 | 1 | 2 | 2 | 12 |
| 10 | 10 | 1 | 1 | 2 | 11 |

Tabela A.10: Valores para Parâmetros **I15**

| j | r_j | $t \in T_\alpha$ | PCH_j | $t \in T_\beta$ | PSA_j |
|-----|-------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1 | 10 | 1 | 4 | 2 | 13 |
| 2 | 10 | 1 | 3 | 2 | 15 |
| 3 | 0 | 0 | 19 | 2 | 14 |
| 4 | 45 | 3 | 11 | 4 | 1 |
| 5 | 45 | 3 | 12 | 0 | 19 |
| 6 | 45 | 3 | 13 | 4 | 2 |
| 7 | 45 | 3 | 14 | 4 | 3 |
| 8 | 45 | 3 | 15 | 4 | 4 |
| 9 | 10 | 1 | 2 | 2 | 12 |
| 10 | 10 | 1 | 1 | 2 | 11 |
| 11 | 0 | 0 | 20 | 4 | 5 |

Tabela A.11: AMV_{qs} para instâncias **I1**, **I2** e **I4**

| AMV_{qs} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Tabela A.12: AMV_{qs} para instância **I3**

| AMV_{qs} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Tabela A.13: AMV_{qs} para instância **I5**

| AMV_{qs} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1913223/CA

Tabela A.17: AMV_{qs} para instância I8 - 3º Quadro

| AMV_{qs} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

B

Soluções ótimas das instâncias

Neste Apêndice serão apresentadas as soluções ótimas de cada instância mostrada no capítulo 5. As Tabelas a seguir indicam em que trecho cada vagão estava no decorrer do tempo do relógio. Os parâmetros usados para iniciar as instâncias estão descritos no Apêndice A.

Tabela B.1: Solução ótima para instância **I1**

| Relógio | q | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | |
| 15 | | 2 | 1 | | | |
| 20 | | 1 | | | 2 | |
| 25 | 1 | 2 | | | | |
| 30 | | | | | | |

Tabela B.2: Solução ótima para instância **I2**

| Relógio | q | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | |
| 15 | | 2 | | | 1 | |
| 20 | | 1 | 2 | | | |
| 25 | 1 | 2 | | | | |
| 30 | 4 | 3 | | | | |
| 35 | | 4 | 3 | | | |
| 40 | | 3 | | | 4 | |
| 45 | 3 | 4 | | | | |
| 50 | | | | | | |

Tabela B.3: Solução ótima para instância **I3**

| Relógio | q | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 0 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | | | | | | | |
| 15 | | 2 | 1 | | | | | | | | | |
| 20 | | | 2 | 1 | | | | | | | | |
| 25 | | | | 2 | | | | | 1 | | | |
| 30 | | | | 1 | 2 | | | | | | | |
| 35 | | | 1 | 2 | | | | | | | | |
| 40 | | 1 | 2 | | | | | | | | | |
| 45 | 1 | 2 | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | |

Tabela B.4: Solução ótima para instância **I4**

| Relógio | q | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | |
| 15 | | 2 | 1 | | | |
| 20 | | 1 | | | 2 | |
| 25 | 1 | 2 | | | | |
| 30 | | | | | | |

Tabela B.5: Solução ótima para instância **I5**

| Relógio | q | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | |
| 15 | | 2 | 1 | | | |
| 20 | | | 2 | 1 | | |
| 25 | | | 1 | | | 2 |
| 30 | | 1 | 2 | | | |
| 35 | 1 | 2 | | | | |
| 40 | | | | | | |

Tabela B.6: Solução ótima para instância I6

| Relógio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| 15 | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| 20 | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| 25 | | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| 30 | | | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| 35 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 3 | | | |
| 40 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | 2 | | | | 3 | | | |
| 45 | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | 2 | | | 3 | | | |
| 50 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | 3 | 2 | | |
| 55 | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | 3 | | 2 | |
| 60 | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | 3 | | | 2 |
| 65 | | | | | | | | | | | | | 3 | 2 | | | | | | 3 | | | |
| 70 | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | 3 | | | |
| 75 | | | | | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | 3 | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | 3 | | | |
| 85 | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | 3 | | | |

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1913223/CA

Tabela B.7: Solução ótima para instância I7

| Relógio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 15 | 2 | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 20 | 2 | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 25 | 2 | | 2 | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 30 | | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 35 | | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 40 | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 45 | | | | 1 | | | | | | | | | 4 | 5 | 6 | 2 | | | 3 | | | | |
| 50 | | | | | 1 | | | | | | | 4 | 5 | 6 | 2 | | | | 3 | | | | |
| 55 | | | | | 1 | | | | | | 4 | 5 | 6 | | | | | | 3 | | | | |
| 60 | | | | | | 1 | | | | 4 | 5 | 6 | | | | 1 | | | 3 | | 2 | | |
| 65 | | | | | | | | | | 4 | 6 | | | | | | 1 | | 3 | | | 2 | 5 |
| 70 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | | | | | | | 3 | 1 | | 1 | 2 |
| 75 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | 2 | | | | | | 3 | 3 | | | 2 |
| 80 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | 3 | 2 | | | | | 3 | 3 | | 1 | 1 |
| 85 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | | | | | | | 3 | | | | 1 |
| 90 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | 1 | 3 | 2 | | | | 3 | | | | |
| 95 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | 1 | 3 | 2 | | | | 3 | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | 1 | 3 | 2 | | | | 3 | | | | |
| 105 | | | | | | | | | | 4 | 6 | 5 | 1 | 3 | 2 | | | | 3 | | | | |
| 110 | 4 | 6 | | | | | | | | 1 | | | | | | 5 | | | 1 | | | | |
| 115 | | | | | | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | 5 | | | 1 | | | | |

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1913223/CA

Tabela B.9: Solução ótima para instância **I8** 2º Quadro

| Relógio | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 65 | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 70 | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 75 | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | 3 | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | 1 | | | | | | 2 |

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1913223/CA

Tabela B.14: Solução ótima para instância I11

| Relógio | q | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 10 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 15 | 2 | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 20 | 2 | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 25 | 2 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 30 | 2 | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | 3 | | | | |
| 35 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | 3 | | | | |
| 40 | | 2 | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | 3 | | | | |
| 45 | | | 2 | | | | | | | | | 4 | 5 | 6 | 7 | | | | 3 | | | | |
| 50 | | | | 2 | | | | | | | 4 | 5 | 6 | 7 | | | | | 3 | | | | |
| 55 | | | | | 2 | | | | | 4 | 5 | 6 | 7 | | | | | | 3 | | | | 4 |
| 60 | | | | | | 2 | | | | 6 | 7 | | | | | | | | 3 | | 5 | 4 | |
| 65 | | | | | | | 2 | | | 7 | | | | | | | | | 3 | | 5 | | |
| 70 | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | 1 | 3 | | 5 | | 6 |
| 75 | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | 4 | 1 | 3 | | 6 | 7 | |
| 80 | | | | | | | | | | 2 | | | | | | 4 | | 1 | | 3 | 6 | 7 | 5 |
| 85 | | | | | 4 | | | | | | 2 | | | | | 6 | | | 1 | 3 | 7 | | 5 |
| 90 | | | | 4 | 6 | | | | | | 2 | | | | | 7 | | | 1 | 3 | | | 5 |
| 95 | | | 4 | 6 | 7 | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | 1 | | | 5 |
| 100 | 4 | | 6 | 7 | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | | | | 5 |
| 105 | 4 | 6 | 7 | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | | | | 5 |
| 110 | | | | | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | 5 | | |

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1913223/CA

Tabela B.16: Solução ótima para instância I13

| Relógio | q | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 10 | 9 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 15 | 9 | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 20 | 9 | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | |
| 25 | 9 | | | | 2 | | | | | | | | | | | 1 | | | 3 | | | | |
| 30 | 9 | | | | | 2 | | | | | | | | | | 1 | | | 3 | | | | |
| 35 | 9 | | | | | | 2 | | | | | | | | | | 1 | | 3 | | | | |
| 40 | | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 3 | | | |
| 45 | | | 9 | | | | | | | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | 1 | | 3 | | | |
| 50 | | | | 9 | | | | | | | 5 | 6 | 7 | 8 | | | | 1 | | 3 | | | 4 |
| 55 | | | | | 9 | | | | | | 5 | 6 | 7 | 8 | | | | 1 | | 3 | | 4 | |
| 60 | | | | | | 2 | | | | | 7 | 8 | | | | | | 1 | | 3 | | 4 | 6 |
| 65 | | | | | | | 2 | | | | 8 | | | | | | | 1 | | 3 | | 4 | 7 |
| 70 | | | | | | | | 2 | | | 5 | 5 | | | | | | 9 | | 3 | | 6 | 7 |
| 75 | | | | | | | | | 2 | | 5 | | | | | | | 9 | | 3 | | 7 | 8 |
| 80 | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | 9 | | 3 | | 8 | |
| 85 | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | 9 | | 1 | | | 5 |
| 90 | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | 9 | | 1 | | | 5 |
| 95 | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | 9 | | 9 | | | 5 |
| 100 | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | 9 | | 9 | | | 5 |
| 105 | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | 9 | | 9 | | | 5 |

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1913223/CA

Tabela B.17: Solução ótima para instância I14

| Relógio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 10 | 9 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | 10 | 9 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | 10 | 9 | 2 | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | |
| 25 | | | | 10 | 9 | 2 | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| 30 | | | | | 10 | | 2 | | | | | | | | | 9 | 1 | | | | | | |
| 35 | | | | | 10 | | 2 | | | | | | | | | 9 | | | 1 | 3 | | | |
| 40 | | | | | 10 | | 2 | | | | | | | | | 9 | | | 1 | 3 | | | |
| 45 | | | | | 10 | | 2 | | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | 9 | | | 1 | 3 | | | |
| 50 | | | | | 10 | | 2 | | | 5 | 6 | 7 | 8 | | 9 | | | | 1 | 3 | | | |
| 55 | | | | | 10 | | | 2 | | 6 | 7 | 8 | | | 9 | | | | 1 | 3 | | | |
| 60 | | | | | 10 | | | | 2 | 7 | 8 | | | | 9 | | | | 1 | 3 | | | |
| 65 | | | | | 10 | | | | | 8 | | | | | | | | | 1 | 3 | | | |
| 70 | | | | | 10 | | | | | 2 | | | | | | | | | 1 | 3 | | | |
| 75 | | | | | 4 | 10 | | | | 3 | 2 | | | | | | | | 1 | 3 | | | |
| 80 | | | | 4 | 5 | | 10 | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | 1 | 3 | | | |
| 85 | | | | 4 | 6 | 5 | | 10 | | 9 | 1 | 3 | 2 | | | | | | 1 | 3 | | | |
| 90 | | | | 4 | 6 | 7 | 5 | | 10 | 9 | 1 | 3 | 2 | | | | | | 1 | 3 | | | |
| 95 | | | | 4 | 6 | 7 | 8 | | | 10 | 9 | 1 | 3 | 2 | | | | | 1 | 3 | | | |
| 100 | 4 | 6 | 7 | 8 | | 5 | | | | 10 | 9 | 1 | 3 | 2 | | | | | 1 | 3 | | | |
| 105 | | | | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | 9 | | | |

C

Inicialização da rota para cada instância

Neste Apêndice será apresentada a rota inicial determinada para cada uma das instâncias apresentadas no capítulo 5. As Tabelas a seguir indicam a definição das variáveis z_{qi}^j e f_i^j diferentes de 0 para inicialização da rota, todas baseadas em conhecimento tácito da operação ferroviária.

Tabela C.1: Inicialização de rota para instância **I1**

| $j = 1$ | $j = 2$ |
|----------------|----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ |
| $z_{51}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ |
| $z_{61}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{32}^5 = 1$ |
| $z_{11}^6 = 1$ | $z_{22}^6 = 1$ |
| $f_1^6 = 1$ | $f_2^6 = 1$ |

Tabela C.2: Inicialização de rota para instância **I2**

| $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ | $j = 4$ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ | $z_{23}^1 = 1$ | $z_{14}^1 = 1$ |
| $z_{51}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ | $z_{33}^2 = 1$ | $z_{24}^2 = 1$ |
| $z_{61}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ | $z_{43}^3 = 1$ | $z_{54}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ | $z_{33}^4 = 1$ | $z_{64}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{32}^5 = 1$ | $z_{23}^5 = 1$ | $z_{54}^5 = 1$ |
| $z_{11}^6 = 1$ | $z_{22}^6 = 1$ | $z_{13}^6 = 1$ | $z_{24}^6 = 1$ |
| $f_1^6 = 1$ | $f_2^6 = 1$ | $f_3^6 = 1$ | $f_4^6 = 1$ |

Tabela C.3: Inicialização de rota para instância **I3**

| $j = 1$ | $j = 2$ |
|-------------------|-------------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ |
| $z_{61}^5 = 1$ | $z_{92}^5 = 1$ |
| $z_{71}^6 = 1$ | $z_{102}^6 = 1$ |
| $z_{81}^7 = 1$ | $z_{112}^7 = 1$ |
| $z_{71}^8 = 1$ | $z_{102}^8 = 1$ |
| $z_{61}^9 = 1$ | $z_{92}^9 = 1$ |
| $z_{51}^{10} = 1$ | $z_{42}^{10} = 1$ |
| $z_{41}^{11} = 1$ | $z_{32}^{11} = 1$ |
| $z_{31}^{12} = 1$ | $z_{22}^{12} = 1$ |
| $z_{21}^{13} = 1$ | |
| $z_{11}^{14} = 1$ | |
| $f_1^{14} = 1$ | $f_2^{12} = 1$ |

Tabela C.4: Inicialização de rota para instância **I4**

| $j = 1$ | $j = 2$ |
|----------------|----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{52}^3 = 1$ |
| $z_{31}^4 = 1$ | $z_{62}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{52}^5 = 1$ |
| $z_{11}^6 = 1$ | $z_{22}^6 = 1$ |
| $f_1^6 = 1$ | $f_2^6 = 1$ |

Tabela C.5: Inicialização de rota para instância **I5**

| $j = 1$ | $j = 2$ |
|----------------|----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ |
| $z_{61}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ |
| $z_{61}^5 = 1$ | $z_{32}^5 = 1$ |
| $z_{31}^6 = 1$ | $z_{62}^6 = 1$ |
| $z_{21}^7 = 1$ | $z_{32}^7 = 1$ |
| $z_{11}^8 = 1$ | $z_{22}^8 = 1$ |
| $f_1^8 = 1$ | $f_2^8 = 1$ |

Tabela C.6: Inicialização de rota para instância **I6**

| $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
|--------------------|--------------------|-----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ | $z_{193}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ | $z_{203}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ | $z_{113}^3 = 1$ |
| $z_{31}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ | $z_{123}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{52}^5 = 1$ | $z_{133}^5 = 1$ |
| $z_{31}^6 = 1$ | $z_{62}^6 = 1$ | $z_{143}^6 = 1$ |
| $z_{41}^7 = 1$ | $z_{72}^7 = 1$ | |
| $z_{51}^8 = 1$ | $z_{82}^8 = 1$ | |
| $z_{161}^9 = 1$ | $z_{92}^9 = 1$ | |
| $z_{171}^{10} = 1$ | $z_{102}^{10} = 1$ | |
| $z_{211}^{11} = 1$ | $z_{112}^{11} = 1$ | |
| $z_{221}^{12} = 1$ | $z_{122}^{12} = 1$ | |
| $z_{231}^{13} = 1$ | $z_{112}^{13} = 1$ | |
| $z_{231}^{14} = 1$ | $z_{122}^{14} = 1$ | |
| $z_{111}^{15} = 1$ | $z_{112}^{15} = 1$ | |
| $z_{121}^{16} = 1$ | $z_{122}^{16} = 1$ | |
| $z_{131}^{17} = 1$ | $z_{112}^{17} = 1$ | |
| | $z_{122}^{18} = 1$ | |
| | $z_{132}^{19} = 1$ | |
| | $z_{142}^{20} = 1$ | |
| | $z_{152}^{21} = 1$ | |
| $f_1^{17} = 1$ | $f_2^{21} = 1$ | $f_3^6 = 1$ |

Tabela C.7: Inicialização de rota para instância **I7**

| $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ | $j = 4$ | $j = 5$ | $j =$ |
|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ | $z_{193}^1 = 1$ | $z_{134}^1 = 1$ | $z_{145}^1 = 1$ | $z_{156}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ | $z_{203}^2 = 1$ | $z_{124}^2 = 1$ | $z_{135}^2 = 1$ | $z_{146}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ | $z_{113}^3 = 1$ | $z_{114}^3 = 1$ | $z_{125}^3 = 1$ | $z_{136}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ | $z_{123}^4 = 1$ | $z_{104}^4 = 1$ | $z_{115}^4 = 1$ | $z_{126}^4 = 1$ |
| $z_{161}^5 = 1$ | $z_{52}^5 = 1$ | $z_{133}^5 = 1$ | $z_{94}^5 = 1$ | $z_{235}^5 = 1$ | $z_{116}^5 = 1$ |
| $z_{51}^6 = 1$ | $z_{162}^6 = 1$ | $z_{143}^6 = 1$ | $z_{84}^6 = 1$ | $z_{225}^6 = 1$ | $z_{106}^6 = 1$ |
| $z_{161}^7 = 1$ | $z_{172}^7 = 1$ | | $z_{74}^7 = 1$ | $z_{235}^7 = 1$ | $z_{96}^7 = 1$ |
| $z_{51}^8 = 1$ | $z_{212}^8 = 1$ | | $z_{64}^8 = 1$ | $z_{115}^8 = 1$ | $z_{86}^8 = 1$ |
| $z_{161}^9 = 1$ | $z_{222}^9 = 1$ | | $z_{54}^9 = 1$ | $z_{105}^9 = 1$ | $z_{76}^9 = 1$ |
| $z_{171}^{10} = 1$ | $z_{232}^{10} = 1$ | | $z_{44}^{10} = 1$ | $z_{95}^{10} = 1$ | $z_{66}^{10} = 1$ |
| $z_{181}^{11} = 1$ | $z_{112}^{11} = 1$ | | $z_{34}^{11} = 1$ | $z_{85}^{11} = 1$ | $z_{76}^{11} = 1$ |
| $z_{191}^{12} = 1$ | $z_{122}^{12} = 1$ | | $z_{24}^{12} = 1$ | $z_{75}^{12} = 1$ | $z_{66}^{12} = 1$ |
| $z_{201}^{13} = 1$ | $z_{132}^{13} = 1$ | | $z_{14}^{13} = 1$ | $z_{65}^{13} = 1$ | $z_{76}^{13} = 1$ |
| $z_{191}^{14} = 1$ | $z_{142}^{14} = 1$ | | | $z_{55}^{14} = 1$ | $z_{66}^{14} = 1$ |
| $z_{201}^{15} = 1$ | $z_{142}^{15} = 1$ | | | $z_{165}^{15} = 1$ | $z_{56}^{15} = 1$ |
| $z_{191}^{16} = 1$ | $z_{152}^{16} = 1$ | | | $z_{55}^{16} = 1$ | $z_{46}^{16} = 1$ |
| $z_{201}^{17} = 1$ | | | | $z_{45}^{17} = 1$ | $z_{36}^{17} = 1$ |
| $z_{111}^{18} = 1$ | | | | $z_{35}^{18} = 1$ | $z_{26}^{18} = 1$ |
| $z_{121}^{19} = 1$ | | | | $z_{45}^{19} = 1$ | |
| $z_{121}^{20} = 1$ | | | | $z_{55}^{20} = 1$ | |
| $z_{131}^{21} = 1$ | | | | $z_{45}^{21} = 1$ | |
| | | | | $z_{55}^{22} = 1$ | |
| | | | | $z_{65}^{23} = 1$ | |
| | | | | $z_{65}^{24} = 1$ | |
| | | | | $z_{65}^{25} = 1$ | |
| | | | | $z_{75}^{26} = 1$ | |
| | | | | $z_{85}^{27} = 1$ | |
| | | | | $z_{75}^{28} = 1$ | |
| | | | | $z_{75}^{29} = 1$ | |
| | | | | $z_{75}^{30} = 1$ | |
| $f_1^{21} = 1$ | $f_2^{16} = 1$ | $f_3^6 = 1$ | $f_4^{13} = 1$ | $f_5^{30} = 1$ | $f_6^{18} = 1$ |

Tabela C.8: Inicialização de rota para instância **I8**

| $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ | $z_{383}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ | $z_{393}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ | $z_{403}^3 = 1$ |
| $z_{51}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ | $z_{213}^4 = 1$ |
| $z_{61}^5 = 1$ | $z_{52}^5 = 1$ | $z_{223}^5 = 1$ |
| $z_{71}^6 = 1$ | $z_{62}^6 = 1$ | $z_{233}^6 = 1$ |
| $z_{61}^7 = 1$ | $z_{72}^7 = 1$ | $z_{243}^7 = 1$ |
| $z_{71}^8 = 1$ | $z_{82}^8 = 1$ | $z_{253}^8 = 1$ |
| $z_{61}^9 = 1$ | $z_{92}^9 = 1$ | $z_{263}^9 = 1$ |
| $z_{71}^{10} = 1$ | $z_{102}^{10} = 1$ | $z_{253}^{10} = 1$ |
| $z_{61}^{11} = 1$ | $z_{312}^{11} = 1$ | $z_{263}^{11} = 1$ |
| $z_{71}^{12} = 1$ | $z_{322}^{12} = 1$ | $z_{253}^{12} = 1$ |
| $z_{81}^{13} = 1$ | $z_{332}^{13} = 1$ | $z_{263}^{13} = 1$ |
| $z_{91}^{14} = 1$ | $z_{342}^{14} = 1$ | $z_{273}^{14} = 1$ |
| $z_{101}^{15} = 1$ | $z_{412}^{15} = 1$ | $z_{283}^{15} = 1$ |
| $z_{111}^{16} = 1$ | $z_{422}^{16} = 1$ | $z_{293}^{16} = 1$ |
| $z_{121}^{17} = 1$ | $z_{432}^{17} = 1$ | |
| $z_{131}^{18} = 1$ | $z_{442}^{18} = 1$ | |
| $z_{141}^{19} = 1$ | $z_{452}^{19} = 1$ | |
| $z_{151}^{20} = 1$ | $z_{462}^{20} = 1$ | |
| $z_{161}^{21} = 1$ | $z_{212}^{21} = 1$ | |
| $z_{171}^{22} = 1$ | $z_{222}^{22} = 1$ | |
| $z_{181}^{23} = 1$ | $z_{232}^{23} = 1$ | |
| $z_{191}^{24} = 1$ | $z_{242}^{24} = 1$ | |
| $z_{201}^{25} = 1$ | $z_{232}^{25} = 1$ | |
| $z_{211}^{26} = 1$ | $z_{242}^{26} = 1$ | |
| $z_{221}^{27} = 1$ | $z_{232}^{27} = 1$ | |
| $z_{231}^{28} = 1$ | $z_{242}^{28} = 1$ | |
| $z_{241}^{29} = 1$ | $z_{232}^{29} = 1$ | |
| $z_{251}^{30} = 1$ | $z_{242}^{30} = 1$ | |
| $z_{261}^{31} = 1$ | $z_{252}^{31} = 1$ | |
| $z_{271}^{32} = 1$ | $z_{262}^{32} = 1$ | |
| $z_{281}^{33} = 1$ | $z_{272}^{33} = 1$ | |
| | $z_{282}^{34} = 1$ | |
| | $z_{292}^{35} = 1$ | |
| | $z_{302}^{36} = 1$ | |
| $f_1^{33} = 1$ | $f_2^{36} = 1$ | $f_3^{16} = 1$ |

Tabela C.9: Inicialização de rota para instância **I9**

| $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
|--------------------|--------------------|-----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ | $z_{193}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ | $z_{203}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ | $z_{193}^3 = 1$ |
| $z_{31}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ | $z_{203}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{52}^5 = 1$ | $z_{113}^5 = 1$ |
| $z_{31}^6 = 1$ | $z_{162}^6 = 1$ | $z_{123}^6 = 1$ |
| $z_{41}^7 = 1$ | $z_{172}^7 = 1$ | $z_{133}^7 = 1$ |
| $z_{51}^8 = 1$ | $z_{212}^8 = 1$ | $z_{143}^8 = 1$ |
| $z_{61}^9 = 1$ | $z_{222}^9 = 1$ | |
| $z_{71}^{10} = 1$ | $z_{232}^{10} = 1$ | |
| $z_{81}^{11} = 1$ | $z_{112}^{11} = 1$ | |
| $z_{91}^{12} = 1$ | $z_{122}^{12} = 1$ | |
| $z_{101}^{13} = 1$ | $z_{112}^{13} = 1$ | |
| $z_{111}^{14} = 1$ | $z_{122}^{14} = 1$ | |
| $z_{121}^{15} = 1$ | $z_{112}^{15} = 1$ | |
| $z_{131}^{16} = 1$ | $z_{122}^{16} = 1$ | |
| | $z_{132}^{17} = 1$ | |
| | $z_{142}^{18} = 1$ | |
| | $z_{152}^{19} = 1$ | |
| $f_1^{16} = 1$ | $f_2^{19} = 1$ | $f_3^8 = 1$ |

Tabela C.10: Inicialização de rota para instância I10

| $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
|--------------------|--------------------|-----------------|
| $z_{21}^1 = 1$ | $z_{12}^1 = 1$ | $z_{193}^1 = 1$ |
| $z_{31}^2 = 1$ | $z_{22}^2 = 1$ | $z_{203}^2 = 1$ |
| $z_{41}^3 = 1$ | $z_{32}^3 = 1$ | $z_{113}^3 = 1$ |
| $z_{31}^4 = 1$ | $z_{42}^4 = 1$ | $z_{123}^4 = 1$ |
| $z_{21}^5 = 1$ | $z_{52}^5 = 1$ | $z_{133}^5 = 1$ |
| $z_{31}^6 = 1$ | $z_{62}^6 = 1$ | $z_{143}^6 = 1$ |
| $z_{41}^7 = 1$ | $z_{72}^7 = 1$ | |
| $z_{51}^8 = 1$ | $z_{82}^8 = 1$ | |
| $z_{161}^9 = 1$ | $z_{92}^9 = 1$ | |
| $z_{171}^{10} = 1$ | $z_{102}^{10} = 1$ | |
| $z_{181}^{11} = 1$ | $z_{112}^{11} = 1$ | |
| $z_{191}^{12} = 1$ | $z_{122}^{12} = 1$ | |
| $z_{191}^{13} = 1$ | $z_{112}^{13} = 1$ | |
| $z_{201}^{14} = 1$ | $z_{122}^{14} = 1$ | |
| $z_{111}^{15} = 1$ | $z_{112}^{15} = 1$ | |
| $z_{121}^{16} = 1$ | $z_{122}^{16} = 1$ | |
| $z_{131}^{17} = 1$ | $z_{112}^{17} = 1$ | |
| | $z_{122}^{18} = 1$ | |
| | $z_{132}^{19} = 1$ | |
| | $z_{142}^{20} = 1$ | |
| | $z_{152}^{21} = 1$ | |
| $f_1^{17} = 1$ | $f_2^{21} = 1$ | $f_3^6 = 1$ |

D

Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para cada instância

Neste Apêndice será apresentado o número máximo de movimentações por vagão definido para cada uma das instâncias apresentadas no capítulo 5. As Tabelas a seguir indicam a definição da variável f_i^j diferente de 0 para inicialização das instâncias, todas baseadas em método matemático do caminho mais curto multiplicado por um fator chave.

Tabela D.1: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instâncias **I1**, **I3**, **I4** e **I5**

| | | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-----|--|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| j | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| 1 | | $f_1^2 = 1$ | $f_1^3 = 1$ | $f_1^4 = 1$ | $f_1^5 = 1$ | $f_1^6 = 1$ | $f_1^7 = 1$ | $f_1^8 = 1$ | $f_1^9 = 1$ |
| 2 | | $f_2^2 = 1$ | $f_2^3 = 1$ | $f_2^4 = 1$ | $f_2^5 = 1$ | $f_2^6 = 1$ | $f_2^7 = 1$ | $f_2^8 = 1$ | $f_2^9 = 1$ |

Tabela D.2: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I2**

| | | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-----|--|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| j | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| 1 | | $f_1^2 = 1$ | $f_1^3 = 1$ | $f_1^4 = 1$ | $f_1^5 = 1$ | $f_1^6 = 1$ | $f_1^7 = 1$ | $f_1^8 = 1$ | $f_1^9 = 1$ |
| 2 | | $f_2^2 = 1$ | $f_2^3 = 1$ | $f_2^4 = 1$ | $f_2^5 = 1$ | $f_2^6 = 1$ | $f_2^7 = 1$ | $f_2^8 = 1$ | $f_2^9 = 1$ |
| 3 | | $f_3^2 = 1$ | $f_3^3 = 1$ | $f_3^4 = 1$ | $f_3^5 = 1$ | $f_3^6 = 1$ | $f_3^7 = 1$ | $f_3^8 = 1$ | $f_3^9 = 1$ |
| 4 | | $f_4^2 = 1$ | $f_4^3 = 1$ | $f_4^4 = 1$ | $f_4^5 = 1$ | $f_4^6 = 1$ | $f_4^7 = 1$ | $f_4^8 = 1$ | $f_4^9 = 1$ |

Tabela D.3: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instâncias **I6**, **I9** e **I10**

| | | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-----|--|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| j | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| 1 | | $f_1^{12} = 1$ | $f_1^{18} = 1$ | $f_1^{24} = 1$ | $f_1^{30} = 1$ | $f_1^{36} = 1$ | $f_1^{42} = 1$ | $f_1^{48} = 1$ | $f_1^{54} = 1$ |
| 2 | | $f_2^{15} = 1$ | $f_2^{23} = 1$ | $f_2^{30} = 1$ | $f_2^{38} = 1$ | $f_2^{45} = 1$ | $f_2^{53} = 1$ | $f_2^{60} = 1$ | $f_2^{68} = 1$ |
| 3 | | $f_3^6 = 1$ | $f_3^9 = 1$ | $f_3^{12} = 1$ | $f_3^{15} = 1$ | $f_3^{18} = 1$ | $f_3^{21} = 1$ | $f_3^{24} = 1$ | $f_3^{27} = 1$ |

Tabela D.4: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I7**

| | | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-----|--|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| j | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| 1 | | $f_1^{12} = 1$ | $f_1^{18} = 1$ | $f_1^{24} = 1$ | $f_1^{30} = 1$ | $f_1^{36} = 1$ | $f_1^{42} = 1$ | $f_1^{48} = 1$ | $f_1^{54} = 1$ |
| 2 | | $f_2^{15} = 1$ | $f_2^{23} = 1$ | $f_2^{30} = 1$ | $f_2^{38} = 1$ | $f_2^{45} = 1$ | $f_2^{53} = 1$ | $f_2^{60} = 1$ | $f_2^{68} = 1$ |
| 3 | | $f_3^6 = 1$ | $f_3^9 = 1$ | $f_3^{12} = 1$ | $f_3^{15} = 1$ | $f_3^{18} = 1$ | $f_3^{21} = 1$ | $f_3^{24} = 1$ | $f_3^{27} = 1$ |
| 4 | | $f_4^{13} = 1$ | $f_4^{20} = 1$ | $f_4^{26} = 1$ | $f_4^{33} = 1$ | $f_4^{39} = 1$ | $f_4^{46} = 1$ | $f_4^{52} = 1$ | $f_4^{59} = 1$ |
| 5 | | $f_5^1 = 1$ | $f_5^2 = 1$ | $f_5^2 = 1$ | $f_5^3 = 1$ | $f_5^3 = 1$ | $f_5^4 = 1$ | $f_5^4 = 1$ | $f_5^5 = 1$ |
| 6 | | $f_6^{14} = 1$ | $f_6^{21} = 1$ | $f_6^{28} = 1$ | $f_6^{35} = 1$ | $f_6^{42} = 1$ | $f_6^{49} = 1$ | $f_6^{56} = 1$ | $f_6^{63} = 1$ |

Tabela D.5: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I8**

| | | Fator chave de multiplicação | | | | | | | |
|-----|--|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| j | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| 1 | | $f_1^{27} = 1$ | $f_1^{41} = 1$ | $f_1^{54} = 1$ | $f_1^{68} = 1$ | $f_1^{81} = 1$ | $f_1^{95} = 1$ | $f_1^{108} = 1$ | $f_1^{122} = 1$ |
| 2 | | $f_2^{30} = 1$ | $f_2^{45} = 1$ | $f_2^{60} = 1$ | $f_2^{75} = 1$ | $f_2^{90} = 1$ | $f_2^{105} = 1$ | $f_2^{120} = 1$ | $f_2^{135} = 1$ |
| 3 | | $f_3^{13} = 1$ | $f_3^{20} = 1$ | $f_3^{26} = 1$ | $f_3^{33} = 1$ | $f_3^{39} = 1$ | $f_3^{46} = 1$ | $f_3^{52} = 1$ | $f_3^{59} = 1$ |

Tabela D.6: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I11**

| | | Fator chave de multiplicação |
|-----|--|------------------------------|
| j | | 1,0 |
| 1 | | $f_1^{12} = 1$ |
| 2 | | $f_2^{15} = 1$ |
| 3 | | $f_3^6 = 1$ |
| 4 | | $f_4^{12} = 1$ |
| 5 | | $f_5^1 = 1$ |
| 6 | | $f_6^{13} = 1$ |
| 7 | | $f_7^{13} = 1$ |

Tabela D.7: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I12**

| j | Fator chave de multiplicação 1,0 |
|-----|-------------------------------------|
| 1 | $f_1^{12} = 1$ |
| 2 | $f_2^{15} = 1$ |
| 3 | $f_3^6 = 1$ |
| 4 | $f_4^{11} = 1$ |
| 5 | $f_5^1 = 1$ |
| 6 | $f_6^{12} = 1$ |
| 7 | $f_7^{12} = 1$ |
| 8 | $f_8^{12} = 1$ |

Tabela D.8: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I13**

| j | Fator chave de multiplicação 1,0 |
|-----|-------------------------------------|
| 1 | $f_1^{11} = 1$ |
| 2 | $f_2^{14} = 1$ |
| 3 | $f_3^6 = 1$ |
| 4 | $f_4^{11} = 1$ |
| 5 | $f_5^1 = 1$ |
| 6 | $f_6^{12} = 1$ |
| 7 | $f_7^{12} = 1$ |
| 8 | $f_8^{12} = 1$ |
| 9 | $f_9^{12} = 1$ |

Tabela D.9: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I14**

| j | Fator chave de multiplicação $1, 0$ |
|-----|--|
| 1 | $f_1^{10} = 1$ |
| 2 | $f_2^{13} = 1$ |
| 3 | $f_3^6 = 1$ |
| 4 | $f_4^{11} = 1$ |
| 5 | $f_5^1 = 1$ |
| 6 | $f_6^{12} = 1$ |
| 7 | $f_7^{12} = 1$ |
| 8 | $f_8^{12} = 1$ |
| 9 | $f_9^{11} = 1$ |
| 10 | $f_{10}^{11} = 1$ |

Tabela D.10: Inicialização do número máximo de movimentações por vagão para instância **I15**

| j | Fator chave de multiplicação $1, 0$ |
|-----|--|
| 1 | $f_1^{10} = 1$ |
| 2 | $f_2^{13} = 1$ |
| 3 | $f_3^6 = 1$ |
| 4 | $f_4^{11} = 1$ |
| 5 | $f_5^1 = 1$ |
| 6 | $f_6^{12} = 1$ |
| 7 | $f_7^{12} = 1$ |
| 8 | $f_8^{12} = 1$ |
| 9 | $f_9^{11} = 1$ |
| 10 | $f_{10}^{11} = 1$ |
| 11 | $f_{11}^6 = 1$ |