



Douglas dos Reis Duarte

**Desenvolvimento de um modelo de otimização
para o Planejamento de Trens de Carga Geral**

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.

Orientador : Prof. Rafael Martinelli Pinto
Co-orientador: Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira

Rio de Janeiro
abril de de 2021



Douglas dos Reis Duarte

Desenvolvimento de um modelo de otimização para o Planejamento de Trens de Carga Geral

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. Rafael Martinelli Pinto

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira

Co-orientador

UFJF

Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Teobaldo Leite Bulhões Júnior

UFPB

Rio de Janeiro, 05 de abril de 2021

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

Douglas dos Reis Duarte

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora(UFJF) em 2011, com especialização em finanças pela mesma universidade. . Há 10 anos atua em uma empresa ferroviária de cargas onde, atualmente, desempenha a função de Especialista de Planejamento e Controle Operacional.

Ficha Catalográfica

Duarte, Douglas dos Reis

Desenvolvimento de um modelo de otimização para o Planejamento de Trens de Carga Geral / Douglas dos Reis Duarte; orientador: Rafael Martinelli Pinto; co-orientador: Fernando Marques de Almeida Nogueira. – 2021.

v., 49 f: il. color. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Planejamento de Trens. 3. Fluxo em Redes. 4. Programação Inteira. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Nogueira, Fernando Marques de Almeida. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 620.11

Dedico à minha mãe Marizete, minha madrinha Aldiléia e minha avó Lourdes. Três mulheres batalhadoras que sempre fizeram de tudo para me apoiar na continuidade dos estudos.

Agradecimentos

Aos meus pais Valdenir e Marizete, por sempre me incentivarem na busca pelo conhecimento me dando condições de estudar.

Ao meu orientador Prof. Rafael Martinelli e ao meu coorientador Prof. Fernando Nogueira por todo apoio e paciência ao longo da elaboração da dissertação.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Aos demais professores do curso pelo conhecimento transmitido durante os anos de mestrado.

À PUC-Rio e à UFJF pela oportunidade única de participação no programa de Mestrado Interinstitucional.

Agradeço à empresa que compreendeu os horários de estudo e me permitiu o investimento na minha formação.

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

Resumo

Duarte, Douglas dos Reis; Pinto, Rafael Martinelli; Nogueira, Fernando Marques de Almeida. **Desenvolvimento de um modelo de otimização para o Planejamento de Trens de Carga Geral**. Rio de Janeiro, 2021. 49p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Planejamento de Trens é de grande importância para o transporte de carga geral das ferrovias. O planejamento deve contemplar quais trens irão circular, suas frequências, quais as rotas atendidas e os vagões que irão compor cada trem. Na presente dissertação, é proposto um modelo de programação inteira mista para a otimização do Planejamento de Trens de Carga Geral, buscando minimizar os custos envolvidos na criação e operação dos trens. O modelo foi aplicado em uma ferrovia brasileira de transporte de cargas no planejamento de 12 períodos. O modelo foi rodado com tempo de processamento médio de 15 horas, tempo este considerado aceitável por se tratar de um problema tático que define os trens do próximo período de planejamento. Quando comparado com os dados reais, o modelo gerou uma redução média de 10,1% nos custos de operação dos trens. O planejamento proposto gerou uma melhor utilização das conexões dos vagões para evitar a criação de trens com baixa ocupação, reduzindo assim os custos. Os resultados também proporcionaram aos planejadores de trens da ferrovia uma maior velocidade nas análises, que hoje são realizadas manualmente, possibilitando uma melhor visão de quais trens deveriam ser criados para os perfis de demanda de cada período.

Palavras-chave

Planejamento de Trens; Fluxo em Redes; Programação Inteira;

Abstract

Duarte, Douglas dos Reis; Pinto, Rafael Martinelli (Advisor); Nogueira, Fernando Marques de Almeida (Co-Advisor). **Development of an optimization model for General Carload Train Planning**. Rio de Janeiro, 2021. 49p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Train Planning is of great importance for the transportation of general carload in railroad. The planning must contemplate which trains should run, their frequencies, which routes will be served and the cars that will compose each train. In this dissertation, a mixed integer programming model is proposed to optimize the planning of general carloads trains, seeking to minimize the costs involved in the creation and operation of the trains. The model was applied to a Brazilian freight railway in the planning of 12 periods. The model was run with an average processing time of 15 hours, a time considered acceptable because it deals with a tactical problem that defines the trains of the next planning period. When compared to the actual data, the model generated an average reduction of 10.1% in the costs of operating the trains. The proposed planning generated a better use of the wagon connections to avoid the creation of trains with low occupancy, thus reducing costs. The results also provided railroad train planners with greater speed in the analyzes, which today are carried out manually, allowing a better view of which trains should be created for the demand profiles of each period.

Keywords

Train Planning; Network Flow; Integer Programming;

Sumário

1	Introdução	11
2	Descrição do Problema	15
3	Revisão da Literatura	22
4	Modelo Matemático	28
5	Estudo de Caso	35
5.1	Descrição do Estudo de Caso	35
5.2	Análises e Resultados Experimentais	39
6	Conclusões	46

Lista de figuras

Figura 1.1	Comparação Matriz de Transporte. ANTF (2021)	11
Figura 1.2	Evolução Transporte Ferroviário. ANTT (2020)	12
Figura 2.1	Demandas para Transporte.	18
Figura 2.2	Trens possíveis.	19
Figura 5.1	Processo de Planejamento de Atendimento.	36
Figura 5.2	Operação nos Pátios de Atendimento.	37
Figura 5.3	Malha real utilizada.	38
Figura 5.4	Indicadores de Custos.	43
Figura 5.5	Planejamento de Trens Realizado para o período 12.	44
Figura 5.6	Planejamento de Trens Proposto para o período 12.	45

Lista de tabelas

Tabela 5.1	Resultados computacionais	40
Tabela 5.2	Resultados de custos do Modelo x Dados reais	41
Tabela 5.3	Representatividade dos custos	42
Tabela 5.4	Indicadores - Resultados do modelo x Dados reais	43

1

Introdução

O transporte de cargas é um serviço vital para a economia de qualquer país. Um sistema de transporte de cargas eficiente e confiável contribui significativamente para o crescimento e a sustentabilidade da economia das nações. O objetivo do transporte de carga é entregar as mercadorias, das origens aos destinos, pelo uso de diferentes modais de transporte como ferroviário, rodoviário, aéreo e marítimo (Crainic, 2003).

O transporte ferroviário está no centro de algumas questões para o avanço do setor de transporte, como aumento da produtividade, redução do congestionamento das estradas, aumento da segurança das cargas e redução na emissão de gases poluentes (Ireland et al., 2004).

A participação do modal ferroviário no Brasil ainda é baixo quando comparado com o modal rodoviário. Nos mais de 20 anos de concessão à iniciativa privada, as ferrovias ampliaram a participação na matriz de transporte do Brasil e respondem por cerca de 15% de participação. A Figura 1.1 mostra a comparação da matriz de transporte de cargas do Brasil com a de outros países de dimensões continentais.

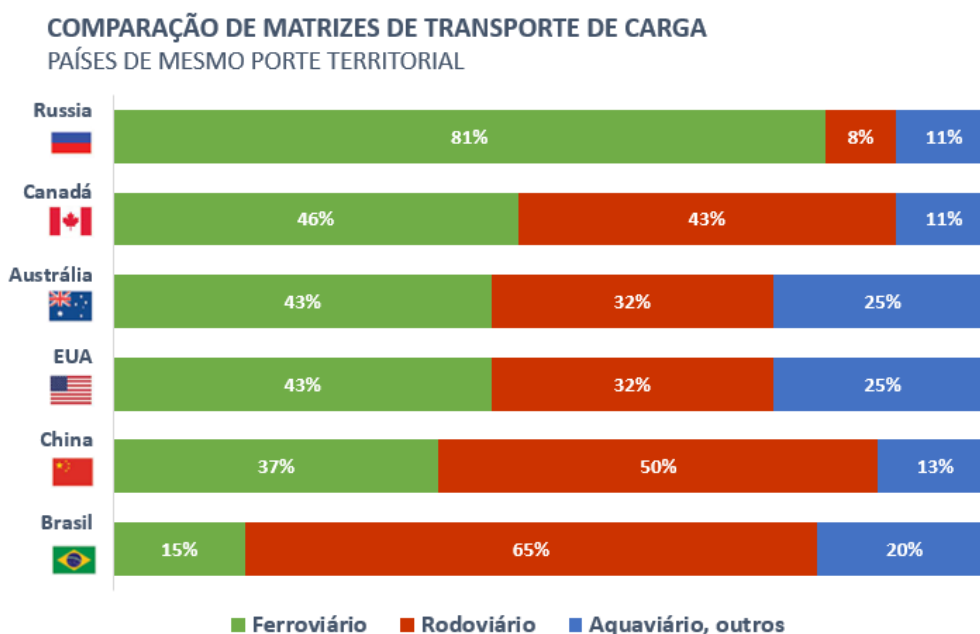


Figura 1.1: Comparação Matriz de Transporte. ANTF (2021)

Com a greve dos caminhoneiros que ocorreu no Brasil em 2018, tornou-se evidente dependência do modal rodoviário e a necessidade de incrementar o uso do modal ferroviário no Brasil, atualmente insuficiente para as necessidades do país e voltado quase que completamente para o transporte de commodities.

O Brasil possui 15 operadoras ferroviárias que operam mais de 29 mil km de malha ferroviária, mais de 100 mil vagões e aproximadamente 3 mil locomotivas (ANTT, 2020). Dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres mostram que em 2019, foram transportadas 494,5 milhões de toneladas úteis (TU) de carga na ferrovia. O gráfico da Figura 1.2 mostra a evolução do transporte ferroviário no Brasil em bilhões de toneladas de carga por quilômetro útil (TKU), que aumentou em 54% de 2006 a 2019.

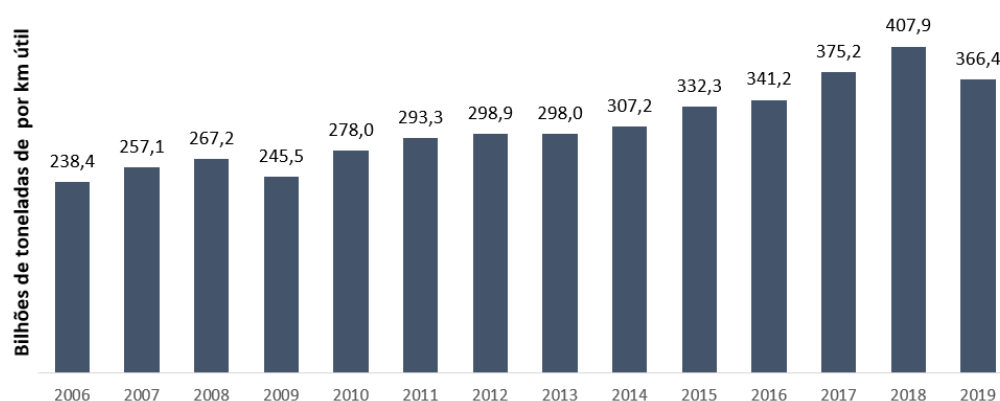


Figura 1.2: Evolução Transporte Ferroviário. ANTT (2020)

A operação ferroviária deve gerenciar e integrar um conjunto complexo de problemas e recursos eficientemente 7 dias por semana, 24 horas por dia. Devido a sua complexidade, a operação ferroviária apresenta oportunidades desafiadoras para a aplicação de ferramentas e metodologias de Pesquisa Operacional. A operação ferroviária envolve muitas decisões, normalmente inter-relacionadas (Ahuja et al., 2005).

Uma grande ferrovia deve coordenar um plano operacional para um elevado número de recursos. De maneira geral, podemos ver a operação ferroviária como uma sequência de decisões com o objetivo de sincronizar as demandas com uma alocação adequada de recursos e instalações disponíveis. O conjunto de recursos disponíveis para a ferrovia determina as rotas factíveis, os itinerários possíveis e as operações possíveis de acordo com as capacidades de pátios, vagões e locomotivas.

Da operação ferroviária surgem diversos tipos de problemas. Assad (1980) classifica os problemas ferroviários em estratégicos, táticos e operacionais, conforme descrito a seguir:

1) Problemas Estratégicos: Decisões que envolvem aquisição de recursos, com horizontes de longo prazo e envolvendo decisões de investimento de capital. Devido ao alto impacto das decisões estratégicas sobre o futuro dos sistemas, a alta administração geralmente está diretamente envolvida com sua resolução. Alguns exemplos são:

- Projetos de construção e expansão da malha ferroviária;
- Localização de pátios ferroviários;
- Duplicação das linhas de circulação;
- Aquisição de novos ativos (vagões e locomotivas);
- Investimentos em terminais de carga e descarga.

2) Problemas Táticos: Envolvem decisões com horizontes de médio prazo e focam na alocação efetivas dos recursos disponíveis. O nível de agregação e o horizonte de planejamento consideram grandes alterações nos parâmetros e dados do sistema, como sazonalidades, mas sem incorporar mudanças diárias. Alguns exemplos de problemas táticos são:

- Definição de quais trens devem circular e quais rotas serão atendidas;
- Definição de quais vagões devem compor os trens;
- Decisão do tamanho dos trens (longos x curtos);
- Cálculo da necessidade de ativos (vagões e locomotivas);
- Cálculo da necessidade de equipes para operação dos trens;
- Definição da Grade de Trens.

3) Problemas Operacionais: Decisões que lidam com um ambiente dinâmico e detalhado com atividades diárias como:

- Operações dos pátios;
- Despacho de trens;
- Programação da malha ferroviária;
- Programação de locomotivas e equipes;
- Distribuição de vagões vazios.

Um dos problemas enfrentados pelas ferrovias é o Problema do Planejamento de Trens que consiste em decidir, para ao atendimento de uma determinada demanda, quais os trens irão circular definindo as rotas que serão atendidas, a frequência dos trens, quais vagões vão circular em cada trem e onde estes vagões serão anexados ou retirados dos trens.

Este é um problema tático que decide quais os trens vão circular no próximo mês ou no próximo ano. A saída deste problema é o principal insumo para a construção da grade de trens operada por uma ferrovia, onde serão definidos os horários de partida e chegada dos trens em cada pátio.

A experiência do autor na resolução do Problema de Planejamento de Trens de forma manual em uma ferrovia brasileira de cargas, por vários anos, é a motivação principal desta dissertação.

O objetivo principal deste trabalho é propor um modelo matemático para o problema do Planejamento de Trens de Carga Geral. Para alcançar o objetivo principal exposto, serão considerados os objetivos específicos listados abaixo:

- Revisão da literatura dos modelos de Planejamento de Trens de Carga Geral já existentes;
- Formulação do modelo matemático por meio da programação inteira;
- Aplicação do modelo proposto em um caso real de uma ferrovia brasileira de cargas;
- Comparação do resultado gerado pelo modelo com informações reais do planejamento da ferrovia estudada.

Além do presente capítulo, de caráter introdutório, esta dissertação é composta de mais cinco capítulos. O Problema de Planejamento de Trens de Carga Geral é descrito no Capítulo 2. No Capítulo 3 é apresentada uma revisão da literatura sobre problemas semelhantes. O Capítulo 4 detalha a formulação matemática elaborada para problema. No Capítulo 5 são apresentados os dados do estudo de caso e contém as informações computacionais geradas e as análises dos resultados do modelo, comparando com informações reais do planejamento de uma ferrovia brasileira de cargas. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, bem como trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

2

Descrição do Problema

Para o atendimento das demandas no transporte ferroviário de cargas, de forma simplificada, existem dois modelos básicos de trens, os trens unitários e os trens de carga geral.

Os trens unitários são trens que circulam de sua origem até o seu destino, sem paradas intermediárias para inclusão ou retirada de vagões e que normalmente possuem um único produto para apenas um cliente em toda a composição.

Já os trens de carga geral são compostos por vagões de diferentes clientes, com diferentes tipos de cargas, sendo que uma composição possui diversos vagões com várias origens e destinos. Os trens podem realizar atividades programadas de anexação e retirada de vagões ao longo do percurso (em pátios intermediários).

Para um melhor entendimento do problema que será abordado e da formulação matemática criada para sua solução, se torna necessária a introdução das entidades presentes na operação ferroviária:

- Pátios (estações): são locais na malha onde os vagões serão anexados ou retirados de um trem, onde podem ficar estacionados e onde ocorrem as manobras.
- Trechos: é uma ligação entre um par de pátios onde um trem pode circular. Cada trecho possui uma série de características, como o perfil de via que vai definir a capacidade de tração, a capacidade de comprimento, que é o tamanho máximo, em metros, que um trem pode assumir no trecho, a distância entre os pátios, entre outras.
- Terminais: são locais na malha onde acontecem as operações de carga e descarga das mercadorias nos vagões. São acessados através dos pátios da ferrovia.
- Rotas: são conjuntos de trechos, definidas a partir de um par de pátios de origem e destino.
- Via Permanente: é a linha por onde o trem circula, sendo composta por diversos elementos, cada um com uma função específica. É composta

- pelos trilhos, dormentes, lastro, além das fixações e placas de apoio que unem os trilhos aos dormentes.
- Vagões: são utilizados no transporte das demandas. São divididos em tipos, onde cada tipo tem características como tara, capacidade, volume, comprimento, entre outras. São carregados e descarregados nos terminais.
 - Demandas: são os pedidos de transporte feitos por um cliente de uma operadora ferroviária de uma quantidade de certo produto entre dois pátios. A demanda tem como características o número de vagões a ser transportado, o comprimento destes vagões em metros e o peso dos vagões em toneladas brutas (TB). Entende-se por mix de demanda, as diferentes rotas e produtos que compõe a demanda de um determinado período.
 - Locomotivas: são as unidades motoras que promovem a tração dos trens. Podem ser divididas em modelos, onde cada modelo possui características relevantes como capacidade de tração por trecho e o comprimento da locomotiva.
 - Equipagens: consiste nas equipes de maquinistas, auxiliares de maquinistas e outras equipes responsáveis pela condução, formação, encerramento e manobra dos trens.
 - Trens: os trens são definidos pelo conjunto de locomotivas, equipagens e a rota associada. Um trem permite a movimentação dos vagões e pode possuir uma ou mais locomotivas de forma a gerar a tração necessária para rebocar os vagões existentes no trem, que se encontram carregados com o alguma demanda ou vazios. Trens são formados no pátio de origem e encerrados no pátio de destino.

Por sua característica mais pulverizada (maior variedade de clientes, lotes menores e com mais particularidades), o mercado de carga geral é mais desafiador para o modal ferroviário, exigindo maior flexibilidade, aumentando assim a complexidade das soluções. Com um alto número de embarques contendo um número pequeno de vagões para serem transportados de seus pontos de origem até seu destino, é economicamente e fisicamente impossível transportar individualmente cada um dos embarques. As ferrovias consolidam estes embarques e forma os trens de carga geral.

Sendo assim, os vagões podem viajar de suas origens até seus destinos por vários trens, com operações intermediárias para troca de trens. Dessa forma, no contexto dos atendimentos de carga geral, surge o problema de consolidação de vagões, uma vez que se tem por objetivo o transporte de pequenos lotes de vagões de diferentes clientes com origens e destinos diversos.

O Planejamento de Trens de Carga Geral para o atendimento das demandas consiste, portanto, nas definições de quais rotas serão atendidas pelos trens e seus itinerários, da frequência de cada trem, dos pátios que serão atendidos pelos trens onde serão realizadas paradas, de quais vagões circulam nos trens e quais deverão ser anexados e retirados em cada pátio.

O Problema do Planejamento de Trens de Carga Geral é um problema tático e normalmente define quais trens circularão no período de um mês. O objetivo consiste em transportar toda a demanda com o menor custo possível utilizando, consequentemente, ao máximo a capacidade dos trens a serem criados. A partir da definição dos trens que são calculadas as necessidades de locomotivas, vagões e equipes de operação de trem para o atendimento da demanda.

Para um período do planejamento são levantadas as demandas a serem atendidas. Esta informação deve ser agregada de acordo com a origem da carga, o destino da carga, o cliente e tipo de mercadoria. A informação normalmente é prospectada em toneladas úteis (TU) de produto a ser transportada em um mês, podendo ser facilmente convertida na quantidade vagões por mês, pois cada uma das demandas utiliza alguns tipos de vagões pré-definidos, com uma determinada capacidade de transporte.

Por se tratar de um planejamento tático estas demandas não estão distribuídas ao longo do tempo, ou seja, só há uma previsão para o número de carregamentos do período (no caso, carregamentos mensais), mas não há informação sobre como essa demanda está distribuída dia a dia.

Com isso, faz-se a estimativa do volume médio para o mês em quantidade de vagões de cada demanda a ser transportado por dia. Inicialmente calcula-se a demanda em vagões por dia carregados para cada um dos fluxos de transporte. Por exemplo, seja uma demanda de 60.000 TU de determinada mercadoria a ser transportada entre dois pátios da malha. Se cada vagão disponível tiver capacidade de transportar 100 toneladas, para um para um mês de 30 dias há uma estimativa de transporte de 20 vagões por dia desta demanda. Esta informação é utilizada para o Planejamento de Trens de Carga Geral.

O cálculo da quantidade diária de vagões carregados é realizado para todas as demandas que serão transportadas em trens de carga geral. Um ponto importante a ser considerado é o retorno dos vagões vazios que já foram descarregados nos clientes. Para fins de planejamento, podemos considerar que os vagões vazios retornarão para as origens de onde saíram os vagões carregados.

Tendo a quantidade de vagões de todas as demandas a serem transpor-

tadas entre cada origem e destino no período, em vagões por dia, inicia-se o cálculo da quantidade de trens necessária para realização do atendimento. Devido à incerteza de como o volume acontecerá dia a dia é considerada uma frequência diária para todos os trens.

As ferrovias possuem pátios onde os trens são formados e encerrados e onde pode ocorrer paradas para anexar e retirar vagões. O conjunto de pátios da ferrovia formam diversos trechos possíveis para a circulação dos trens.

Os trechos normalmente possuem capacidades, geradas por pátios com tamanhos limitados, restringindo o tamanho máximo dos trens que podem circular no mesmo. Sendo assim, cada trem no trecho tem uma capacidade específica. O conjunto de pátios e trechos da ferrovia formam grafo orientado, onde os pátios são os nós e os trechos são os arcos.

A partir das informações de demandas consolidadas é possível a construção de uma matriz Origem-Destino com a quantidade de vagões a ser transportada de um pátio para o outro. Cada uma das demandas possui origem e destino em um pátio e passa por alguns dos arcos da rede, consumindo capacidade da malha e tração do trem no trecho.

Para cada origem-destino na rede é especificada uma demanda em termos do número de vagões. Estes vagões terão características de tamanho e de peso. A partir destas informações serão calculadas as necessidades de trens. A Figura 2.1 ilustra uma malha ferroviária simplificada e linear com cinco pátios e algumas demandas a serem transportadas nestes pátios.

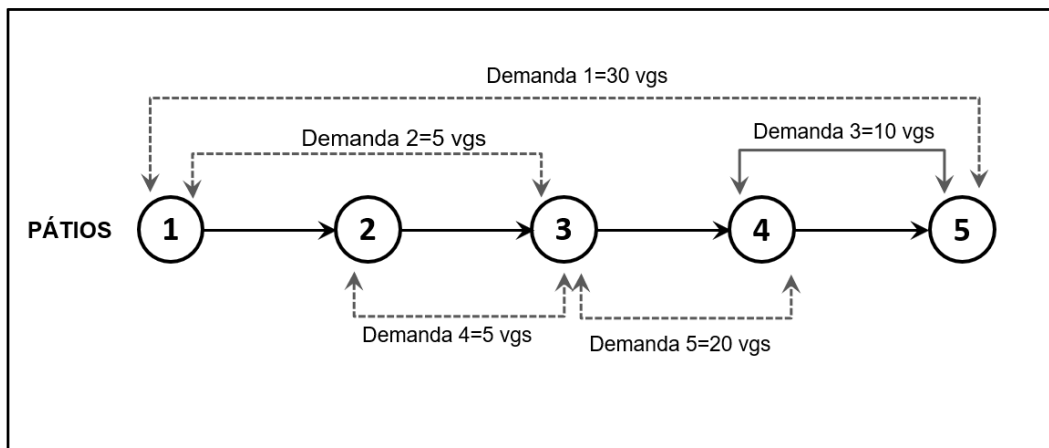


Figura 2.1: Demandas para Transporte.

Todas as demandas sinalizadas no exemplo não são suficientes para a formação de trens unitários, então é necessária a definição dos trens de carga geral que irão circular.

Baseado nas características de da malha ferroviária, os trens só podem ser formados e encerrados em pátios específicos. Os trens são caracterizados

por alguns atributos como o pátio de origem, o pátio de destino, os trechos de circulação e os pátios de passagem do trem. Para a malha ferroviária exemplificada anteriormente, a Figura 2.2 mostra os trens que podem ser formados.

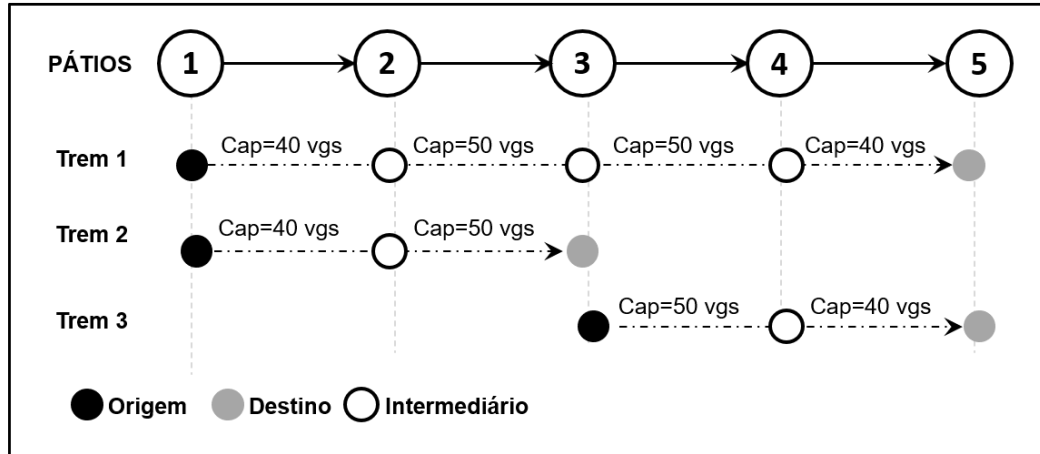


Figura 2.2: Trens possíveis.

No exemplo apresentado, para o transporte das demandas há a opção da formação do Trem 1, atendendo as demandas de todos os pátios, tendo que realizar paradas nestes pátios para anexação e retirada dos vagões ou de formar o Trem 2 e levar todos os vagões para o Pátio 3 para realizar uma conexão com o Trem 3.

No exemplo, cada trem possui uma capacidade específica, em número de vagões, que pode variar com os pátios e trechos de circulação. Estas capacidades podem ser definidas através de outras características mais gerais das demandas como o comprimento máximo que os trens podem assumir. Sendo assim, os trens devem obedecer às restrições de capacidade dos trechos.

Os trens precisam de locomotivas para tracionar as demandas. Cada trecho possui uma capacidade máxima de toneladas brutas (TB) que cada locomotiva pode tracionar. Além disso, cada trem possui uma quantidade máxima e mínima de locomotivas para circular, que depende da característica da malha. O Planejamento de Trens de Carga Geral deve informar quantas locomotivas serão alocadas para cada trem formado para o atendimento das demandas.

Todas as demandas devem ser atendidas, com a garantia de que os vagões vão sair de suas origens e chegar nos seus destinos utilizando os trens criados. Para isso, os vagões podem seguir por toda rota em um único trem ou realizar conexões em pátios intermediários para a troca de trens. Deve ser decidido quais vagões vão circular em cada trem em cada um dos trechos e em quais pátios os vagões serão retirados e anexados para conexão em outros trens.

Para que as conexões sejam realizadas os trens devem realizar paradas em pátios intermediários. Os trens não podem realizar paradas em qualquer pátio da malha ferroviária. Os pátios em que as paradas são permitidas variam de acordo com as características e recursos disponíveis da malha. Apenas para os pátios cuja parada para troca de vagões é permitida que as paradas devem ser decididas e os outros pátios serão apenas de passagem do trem.

Alguns pátios possuem capacidade limitada para o processamento dos trens. Esta capacidade pode ser dada pela quantidade de vagões que podem ser processadas nos pátios ou pela quantidade máxima de trens que podem realizar paradas nos pátios.

Dadas as demandas, as opções de trens e características da malha ferroviária, o Planejamento de Trens de Carga Geral consiste nas definições de quais rotas serão atendidas pelos trens e seus itinerários, da frequência de cada trem, dos pátios que serão atendidos pelos trens onde serão realizadas paradas, de quais vagões circulam nos trens e quais deverão ser anexados e retirados em cada pátio.

Para a formação dos trens, existem diversos custos associados à operação. Há um custo fixo de operar um trem, que é independente do número de vagões associados ao mesmo. O custo fixo se refere às equipes necessárias para a operação e ao custo de formação e encerramento do trem no pátio de origem e no pátio de destino, respectivamente.

Para o transporte dos vagões nos trens, há um custo de combustível que depende do peso das composições e do perfil dos trechos em que os trens circulam. Por exemplo, trechos com rampa mais acentuada necessitam de maior consumo de combustível. A passagem destes vagões nos trechos gera um desgaste da via permanente e também gera um custo de manutenção da mesma.

A adição de locomotivas ao trem, para geração de maior capacidade para tracionar os vagões também possui um custo. Este custo está associado à manutenção das locomotivas e ao combustível que a locomotiva precisa gastar para transportar seu próprio peso.

Os trens podem realizar paradas em pátios intermediários para anexação e retirada de vagões. Para que estas paradas sejam realizadas, devem ter equipes de manobra disponíveis nos pátios para realização das operações. Além disso, para possibilitar a parada dos trens, os pátios podem necessitar de infraestruturas específicas que também geram custos adicionais para as operadoras ferroviárias.

O objetivo do Problema do Planejamento de Trens de Carga Geral é realizar o atendimento da demanda solicitada com o menor custo possível, tor-

nando a operação mais rentável. O planejamento eficiente dos trens apresenta forte relação com o custeio operacional e é fator crítico para a competitividade do modal através das tarifas ofertadas.

As saídas do modelo devem ser a quantidade de trens a ser formada em cada uma das rotas, quais as paradas que devem ser realizadas pelos trens, a composição dos trens com o número de locomotivas necessárias para tração e quais as demandas que circulam nos trens em cada trecho, além das conexões dos vagões informando quantos vagões de uma demanda serão anexados e retirados dos trens e em quais pátios.

3

Revisão da Literatura

A resolução de problemas da operação ferroviária ganha destaque na literatura. No contexto operacional, Fukasawa et al. (2002) resolvem o Problema de Fluxo de Vagões carregados e vazios para uma ferrovia brasileira. O problema consiste em determinar a distribuição de vagões carregados e vazios na malha ferroviária, definido as movimentações de cada vagão da frota em um intervalo de tempo. O objetivo é escolher como e quanto atender de cada demanda de modo a maximizar o retorno (lucro ou receita) no horizonte planejado.

Mais recentemente, Foletto et al. (2016) elaboram uma nova estratégia para a distribuição de vagões vazios, usando a capacidade ociosa dos trens que circulam com vagões carregados.

Vaidyanathan et al. (2008) desenvolveram um modelo de otimização para a programação de locomotivas. Dada uma programação de trens, o objetivo do problema de planejamento ou programação de locomotivas é determinar a alocação de custo mínimo dos tipos de locomotivas aos trens que satisfaça uma série de restrições comerciais e operacionais. Este problema é de nível operacional e consiste em determinar o melhor plano de viagens de cada locomotiva da frota para um pequeno horizonte de planejamento (dois dias, por exemplo). Baseada na situação atual da frota e na necessidade de tração de cada trem, determina-se qual locomotiva atenderá cada trem.

Hamacher et al. (2005) propõem um modelo de programação inteira para o Problema de Alocação Ótima de Vagões e Locomotivas no Curto Prazo, para determinar a movimentação dos ativos buscando maximizar o retorno obtido pela demanda atendida no período considerado.

Caprara et al. (1997) apresentaram o problema de equipagem para a circulação dos trens e algumas formulações e métodos de resolução. O problema trata da alocação dos maquinistas aos trens. Em alguns trechos podem ser necessários a alocação de dois maquinistas para a condução do trem por questões de segurança. Além disso, nem todos os maquinistas são habilitados em todos os trechos da malha e uma série de questões legais devem ser levadas em conta, gerando um grande número de restrições.

Por fim, ainda no contexto operacional, Corman et al. (2010) apresentam

um método de solução para o problema de despacho de trens, enfrentado diariamente pelos controladores de tráfego, para detecção e resolução de conflitos de trens para se adaptar a atrasos e outros imprevistos acontecendo em tempo real na operação ferroviária.

Com relação aos problemas táticos, Martinelli et al. (2008) apresentam modelos para o Problema de Planejamento de Atendimento, onde o objetivo é definir as diretrizes de atendimento que irão servir como base para todo o planejamento da operação mensal. São escolhidas, de forma ótima, as demandas a serem atendidas e o percentual de cada atendimento em relação à quantidade total demandada.

Outro problema tático é o Problema da Elaboração da Grade de Trens que determina o itinerário e os horários de cada trem na malha de modo a maximizar o atendimento das demandas. Na grade constam todos os trens com os dias da semana que irão circular e com os horários de partida e chegada em cada pátio do itinerário. Em Caprara et al. (2002) é desenvolvido um modelo para definição da grade em uma única rota ligando dois pátios, com algumas paradas intermediárias.

Os problemas relacionados ao Planejamento de Trens de Carga Geral com a definição dos trens que irão circular, suas rotas, bem como a consolidação de vagões são amplamente discutidos na literatura. Cordeau et al. (1998) traz as definições dos conceitos de *Blocking Policy*, *Train Routing* e *Train Makeup*.

Blocking policy consiste na definição de quais vagões que chegam nos pátios deverão ser agrupados em blocos que viajam juntos da origem até o destino sem sofrer classificação em pátios intermediários. Considera apenas o fluxo de vagões e as atividades relacionadas à classificação de vagões nos pátios onde os blocos serão formados e desmontados. Os blocos formados serão posteriormente alocados aos trens.

Train Routing é a determinação de quais trens devem circular, quais as rotas serão atendidas e qual a frequência requerida de cada trem para acomodar a demanda. Já a definição da composição do trem, ou seja, de em qual trem será alocado cada bloco de vagões formado é chamada de *Train Makeup*. Segundo Crainic et al. (1984), a *Blocking Policy* pode ser um insumo para os problemas de *Train Routing* e *Train Makeup*, ou determinada durante a resolução dos problemas.

Com relação à *Blocking Policy*, Ahuja et al. (2007) resolvem o *Railroad Blocking Problem* que define quais vagões deverão ser agrupados em blocos que viajam juntos da origem até o destino sem sofrer classificação em pátios intermediários. O problema é formulado como um modelo de *Multicommodity Flow Network Design* e considera apenas o fluxo dos vagões.

Em um dos primeiros trabalhos buscando integrar os múltiplos componentes do roteamento dos trens, Assad (1980) propõe um modelo para resolução dos problemas de *Train Routing* e *Train Makeup* para trens que circulam diretamente de suas origens até os destinos sem considerar paradas intermediárias para retirar e anexar vagões.

As conexões de vagões são realizada apenas nos pátios de origem e destino dos trens. A resolução do problema é realizada a partir da perspectiva e *Multicommodity Network Flow* e otimização combinatória, incorporando interações entre o roteamento e atividade de pátios.

O modelo minimiza a soma dos custos de atender uma rota e de atividades de pátio em uma rede que inclui todas as rotas viáveis entre pares de pátios. A função de custo sugerida por Assad (1980) é composta por um custo unitário de fornecer uma unidade motora nas rotas multiplicado pelo número de unidades motoras atribuídas a essas rotas e um custo de transporte unitário de um vagão que é multiplicado pelo número total de vagões.

O problema busca minimizar os custos e está sujeita à conservação do fluxo e às restrições de capacidade de tração. As variáveis de decisão neste modelo são o número de vagões viajando em cada rota, classificados por suas origens e destinos, e o número de unidades motoras fornecidas em cada rota.

O modelo tem como informação de entrada uma matriz origem-destino de demandas e as saídas incluem o número de vagões e unidades motoras atribuídos em cada rota, que pode ser traduzido na frequência e composição de trens, no tamanho dos trens e na carga de trabalho de cada pátio.

Crainic et al. (1984) apresentam um modelo para o planejamento de trens que resolve simultaneamente os problemas de *blocking*, *routing* e *makeup*. É desenvolvido um modelo de programação inteira mista (MIP) formulado como um problema de *Multicommodity Network Flow*. As demandas são divididas em classes e cada uma corresponde a um tipo de produto, uma origem e um destino. As rotas viáveis onde os trens podem circular são chamadas de serviços. Os serviços estão associados à uma origem, um destino, uma sequência de trechos da ferrovia, uma série de paradas em pátios intermediários e uma especificação em termos de prioridade e velocidade.

O modelo tem como base a utilização de itinerários. Para cada classe de demanda são previamente definidos itinerários viáveis, sendo que um itinerário é definido como quais os serviços que uma classe de demanda usa para ir de sua origem até seu destino e as conexões que serão realizadas em pátios intermediários.

Com a seleção dos melhores itinerários para cada classe de demandas, são resolvidos os problemas de *blocking* e *makeup* e as variáveis associadas

à definição dos serviços é a solução do *train routing*. O modelo minimiza os custos de operação e atrasos. Para resolução do modelo é desenvolvido um algoritmo baseado nos princípios de decomposição e geração de colunas.

Haghani (1989) propõe uma formulação e resolve, através de uma heurística, os problemas de *Train Routing* e *Train Makeup* combinados com o problema de distribuição de vagões vazios. As variáveis de decisão utilizadas dizem respeito aos fluxos de vagões carregados, vagões vazios e unidades motoras fornecidas nas diferentes rotas.

Martinelli e Teng (1996) abordam o Problema de Planejamento de Trens de Carga Geral como *Train Formation Problem* (TFP) e usam redes neurais para sua solução. Cada demanda é associada a um itinerário em um conjunto pré-definido. A função objetivo busca minimizar o tempo dos vagões no sistema, ou seja, os seus tempos de trânsito. Segundo Cordeau et al. (1998), o TFP é uma subclasse dos problemas de roteamento em redes e também pode ser chamado de *Routing and Makeup Problem*.

Jin et al. (2013) apresentam um modelo e resolvem, através de uma técnica de geração de colunas, o que chamam de *Train Network Design Optimization* que envolve a integração de três problemas inter-relacionados: o *Train Routing*, o *Train Makeup*, referenciado como *Block-to-train*, além de incluir o problema de alocação de equipes aos trens.

Yaghini et al. (2014) apresentam um modelo e resolvem o *Train Formation Plan* (TFP) utilizando um algoritmo *simulated annealing*. Segundo os autores, o TFP é uma das mais importantes áreas de pesquisa no planejamento do transporte ferroviário e refere-se à determinação de quais trens devem ser montados para atender à demanda em um período especificado, envolvendo à definição das frequências, tamanhos e as tarefas a serem desenvolvidas pelo trem de acordo com o objetivo definido e as condições físicas e restrições operacionais da rede ferroviária.

Yaghini et al. (2014) afirmam que os modelos de TFP geralmente são formulados como um *Service Network Design Problem* (NDP) e a solução ótima normalmente é difícil de ser encontrada.

Os trabalhos citados são relacionados à consolidação de vagões, quais trens devem circular, qual sua composição e têm por objetivo resolver uma parte ou todo o *Problema de Planejamento de Trens de Carga Geral* que é o foco desta dissertação. O que há em comum nas formulações apresentadas nos trabalhos é a utilização da abordagem de fluxos em rede para múltiplos produtos.

Crainic (2000) traz uma visão geral do *Service Network Design* no transporte de cargas. Em seu trabalho apresenta uma formulação geral para o

problema e diversas extensões que são utilizadas no planejamento do transporte de cargas em geral, indicando também as principais abordagens para a solução do problema. O modelo geral para o *Multicommodity Capacitated Network Design (MCND)* é apresentado a seguir.

Considere o grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ onde \mathcal{N} é um conjunto de vértices e \mathcal{A} um conjunto de links. \mathcal{P} representa o conjunto de commodities a ser transportada na rede. A origem de uma demanda $p \in \mathcal{P}$ é dado por $o(p) \in \mathcal{N}$ e o destino por $d(p) \in \mathcal{N}$. A formulação do MCND tem a seguinte forma:

$$\min \sum_{(ij) \in \mathcal{A}} f_{ij} y_{ij} + \sum_{(ij) \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}} c_{ij}^p x_{ij}^p \quad (3-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ij}^p - \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ji}^p = \begin{cases} w^p & \text{se } i = o(p) \\ -w^p & \text{se } i = d(p) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \forall i \in \mathcal{N}, p \in \mathcal{P} \quad (3-2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ij}^p \leq u_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (3-3)$$

$$(y, x) \in \mathcal{S} \quad (3-4)$$

$$y \in \mathcal{Y} \quad (3-5)$$

$$x_{ij}^p \geq 0 \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A}, p \in \mathcal{P} \quad (3-6)$$

Onde y_{ij} são variáveis inteiras modelando as decisões de criação dos links. Quando $\mathcal{Y} = \{0, 1\}^{|\mathcal{A}|}$, o link entre (i, j) é aberto se $y_{ij} = 1$ e fechado se $y_{ij} = 0$. Quando $\mathcal{Y} = \mathbb{N}_+^{|\mathcal{A}|}$ as variáveis indicam a quantidade de instalações que serão criadas para um determinado link, ou seja, o nível de serviço oferecido. As variáveis x_{ij}^p são contínuas e indicam a quantidade de fluxo da commodity $p \in \mathcal{P}$ usando o link $(i, j) \in \mathcal{A}$.

O parâmetro f_{ij} é o custo fixo de abrir o link entre i e j e c_{ij}^p é o custo do fluxo de transporte por unidade de uma commodity no link. u_{ij} é a capacidade do link e w^p é o total de demanda da commodity $p \in \mathcal{P}$.

A função objetivo (3-1) mede o custo total do sistema. A restrição (3-2) expressa a conservação de fluxo e o atendimento das demandas. A restrição (3-3) garante que se um link for criado, a capacidade do mesmo não será excedida. Já a restrição (3-4) diz respeito a restrições adicionais relacionadas ao MCND e relações entre as variáveis. Um exemplo de restrição adicional ao problema é a existência de um orçamento limitado.

O modelo geral de *Multicommodity Capacitated Network Design* apresentado no trabalho de Crainic (2000) e o trabalho de Yaghini et al. (2014) serão

a base para o modelo matemático formulado para o Planejamento de Trens de Carga Geral que será apresentado no próximo capítulo.

O Problema de Planejamento de Trens de Carga Geral pode ser modelado como um problema de Programação Inteira Mista (MIP). A formulação criada foi baseada no modelo de *Multicommodity Capacitated Network Design*, utilizada nos trabalhos de Crainic (2000) e de Yaghini et al. (2014) com a adição de várias restrições para atingir uma maior proximidade com a realidade encontrada na prática, a partir da experiência do autor.

Seja $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ o grafo orientado que representa a malha ferroviária, onde \mathcal{N} representa o conjunto de pátios da malha onde ocorrerão as operações dos trens e \mathcal{A} o conjunto de trechos que ligam estes pátios.

O conjunto de trechos em \mathcal{A} que possuem o pátio $n \in \mathcal{N}$ como origem é representado por $\delta^+(n)$ e o conjunto de trechos em \mathcal{A} que possuem o pátio $n \in \mathcal{N}$ como destino é representado por $\delta^-(n)$.

O conjunto \mathcal{P} representa as demandas a serem transportadas de um pátio de origem $o(p) \in \mathcal{N}$ para um pátio de destino $d(p) \in \mathcal{N}$. Cada demanda possui uma quantidade de vagões v_p que tem como característica um tamanho $Comp_p$ em metros por vagão e um peso $Peso_p$ em TB por vagão.

O conjunto \mathcal{T} representa os trens possíveis de serem formados. Os trens são caracterizados por sua rota, ou seja, por um pátio de origem, um pátio de destino e por seu itinerário que é representado pelo conjunto de trechos em \mathcal{A} e pelo conjunto de pátios em \mathcal{N} em que o trem passa.

Os trens possíveis de serem formados são definidos pela característica da malha ferroviária. Alguns pátios são para formação e encerramento dos trens e outros pátios são apenas de passagem ou para manobras intermediárias. O conjunto $A_t \in \mathcal{A}$ indica todos os trechos em que passam um trem $t \in \mathcal{T}$.

Para o Planejamento de Trens de Carga Geral, considere a variável f_a^{pt} que indica a quantidade de uma demanda $p \in \mathcal{P}$ circulando em um trem $t \in \mathcal{T}$ no trecho $a \in \mathcal{A}$, em número de vagões. Estas variáveis determinam o fluxo dos vagões nos trens e nos trechos.

Para a definição da criação dos trens é inserida a variável y_t , que representa se um trem $t \in \mathcal{T}$ será formado ou não. As variáveis de criação dos trens podem ser relacionadas às variáveis ativação de links no modelo de *MCND* apresentado no Capítulo 3.

Como os trens podem realizar paradas intermediárias é interessante que dois trens que possuam uma mesma rota sejam considerados trens diferentes, pois podem diferir no número de locomotivas necessárias para tração e nas paradas realizadas em pátios intermediários para anexação e retirada de vagões. Com isso, no modelo a variável y_t será considerada binária.

Se esta variável não fosse binária, os trens operando em uma mesma rota teriam exatamente as mesmas características em termos de vagões circulando, número de locomotivas e em paradas intermediárias, o que na prática pode não ser bom para o sistema.

Devido às características físicas de cada trecho, cada trem que circula em um trecho tem uma capacidade máxima. Como os vagões que são utilizados para o transporte das demandas podem variar de tamanho, na formulação apresentada a capacidade do trecho será considerada em termos do tamanho máximo que um trem pode assumir no trecho, em metros, dado por $CapM_a$. Com isso, são criadas as primeiras restrições para o problema.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} Comp_p f_a^{pt} \leq CapM_a y_t \quad \forall t \in \mathcal{T}, a \in A_t \quad (4-1)$$

Cada demanda $p \in \mathcal{P}$ utiliza um determinado tipo de vagão que possui um tamanho dado por $Comp_p$. A restrição garante que os vagões circularão em um trem somente se este for criado e que o comprimento total do trem é menor ou igual a capacidade do trem no trecho, em metros.

Cada trem $t \in \mathcal{T}$ formado precisa de uma quantidade de locomotivas para tracionar as demandas. Com isso, inserimos no modelo a variável l_t , que indica a quantidade de locomotivas alocadas em um trem.

Devido às características dos trechos, cada trem $t \in \mathcal{T}$ deve ter um número mínimo de locomotivas dado por $LMIN_t$ e um número máximo dado por $LMAX_t$, gerando uma nova restrição.

$$LMIN_t y_t \leq l_t \leq LMAX_t y_t \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (4-2)$$

A capacidade de tração das locomotivas alocadas aos trens para tracionar os vagões podem variar de acordo com os trechos. Esta capacidade é dada em TB e representada pelo parâmetro $CapT_a$. Com isso, as restrições de capacidade de tração dos trens nos trechos podem ser criadas.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} Peso_p f_a^{pt} \leq CapT_a l_t \quad \forall t \in \mathcal{T}, a \in A_t \quad (4-3)$$

Cada demanda $p \in \mathcal{P}$ possui um peso, em TB, dado por $Peso_p$. A restrição

garante que os vagões circularão em um trem somente se forem alocadas locomotivas ao mesmo e que o peso do trem é menor ou igual a capacidade das locomotivas alocadas ao trem, em TB.

Para garantir de que todos os vagões vão sair de suas origens e chegar aos seus destinos utilizando os trens criados, devem ser adicionadas ao modelo as restrições de fluxo dos vagões.

Em um dado pátio $n \in \mathcal{N}$ da malha, caso este não seja a origem e nem o destino de uma demanda $p \in \mathcal{P}$, a quantidade de vagões que chegam neste pátio deve ser igual a quantidade de vagões que saem deste pátio, ou seja, deve ocorrer a conservação do fluxo da demanda, que só é alterada quando o pátio é origem ou destino de uma demanda. Assim, criamos as restrições de fluxo.

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{a \in \delta^+(n)} f_a^{pt} - \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{a \in \delta^-(n)} f_a^{pt} = d_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}, p \in \mathcal{P} \quad (4-4)$$

Seja v_p a quantidade de total de vagões em uma demanda $p \in \mathcal{P}$, então o parâmetro d_n^p na restrição de fluxo indica a demanda de vagões em cada um dos pátios e é definido como:

$$d_n^p = \begin{cases} v_p & \text{se } n = o(p) \\ -v_p & \text{se } n = d(p) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4-5)$$

A restrição (4-4) garante a conservação do fluxo para todas as demandas em todos os pátios da malha ferroviária. O lado esquerdo da restrição representa a diferença entre os fluxos que saem $\delta^+(p)$ e os fluxos que chegam $\delta^-(p)$ no pátio. Quando um pátio for origem de uma demanda ($n=o(p)$), esta quantidade será igual a quantidade de vagões da demanda $p \in \mathcal{P}$.

Quando o pátio for destino de alguma demanda ($n=d(p)$) esta diferença será igual a quantidade de vagões da demanda, porém com valor negativo. Quando nenhum dos casos ocorrer, ou seja, quando temos um pátio intermediário, esta diferença entre os fluxos será igual a zero.

As origens e destinos de algumas demandas não serão iguais as origens e destinos dos trens. Com isso, os vagões de carga geral podem circular em diversos trens de suas origens até seus destinos.

Sendo assim, os trens podem fazer conexões de vagões ao longo do trecho, anexando ou retirando vagões em pátios intermediários. Para que esta operação seja possível, introduzimos novas variáveis no modelo. A quantidade de vagões de uma demanda $p \in \mathcal{P}$ anexada em um trem $t \in \mathcal{T}$ no pátio $n \in \mathcal{N}$ é dada

por h_{pnt}^+ e quantidade de vagões de uma demanda $p \in \mathcal{P}$ retirada de um trem $t \in \mathcal{T}$ em um pátio $n \in \mathcal{N}$ é dada por h_{pnt}^- . Criamos uma nova restrição para realizar o cálculo das novas variáveis.

$$\sum_{a \in \delta^+(n)} f_a^{pt} - \sum_{t \in \delta^-(p)} f_a^{pt} = (h_{pnt}^+ - h_{pnt}^-) \quad \forall n \in \mathcal{N}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (4-6)$$

A quantidade de vagões retirada ou anexadas de uma demanda $p \in \mathcal{P}$, de um trem $t \in \mathcal{T}$ em um pátio $n \in \mathcal{N}$ é dada pela diferença entre a quantidade de vagões da demanda que chegaram no trem e a quantidade que partiram no trem.

O lado esquerdo da restrição (4-6) vai assumir valores negativos caso aconteça uma retirada, valores positivos caso aconteça uma anexação e valor zero caso os vagões continuem no trem. Um custo é associado à estas operações de anexação e retirada dos vagões. Para associação deste custo na Função Objetivo do modelo, é necessário que os valores de h_{pnt}^+ e h_{pnt}^- sejam positivos.

Para que o trem possa fazer anexações e retiradas nos pátios ele precisa realizar uma parada nestes pátios. Com isso, é necessário introduzir no modelo a variável binária s_{tn} que indica se um trem $t \in \mathcal{T}$ realiza ou não uma parada em um pátio $n \in \mathcal{N}$.

Os trens só podem realizar paradas em pátios específicos da malha ferroviária. O conjunto $NDS_t \in \mathcal{N}$ indica todos os pátios $n \in \mathcal{N}$ em que um trem $t \in \mathcal{T}$ pode realizar uma parada e onde esta deverá ser decidida. Para o cálculo da variável de parada dos trens, introduzimos uma nova restrição no modelo.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} (h_{pnt}^+ + h_{pnt}^-) \leq s_{tn} \sum_{p \in \mathcal{P}} v_p \quad \forall t \in \mathcal{T}, n \in NDS_t \quad (4-7)$$

Considerando as variáveis h_{pnt}^+ e h_{pnt}^- positivas, a restrição garante que quando o valor da variável for s_{tn} for igual a zero, a quantidade de vagões anexados ou retirados dos trens no pátio também será igual a zero.

Para que seja possível a conexão de vagões nos pátios a variável terá que assumir o valor 1, indicando que o trem tem parada no pátio especificado, mas a quantidade de vagões anexados ou retirados deve ser limitada no número de vagões das demandas.

O conjunto $NNS_t \in \mathcal{N}$ indica todos os pátios $n \in \mathcal{N}$ em que um trem $t \in \mathcal{T}$ não pode realizar uma parada. Sendo assim, introduzimos uma nova

restrição no modelo.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} (h_{pnt}^+ + h_{pnt}^-) = 0 \quad \forall t \in \mathcal{T}, n \in \mathcal{N} \quad (4-8)$$

A restrição garante que o fluxo das demandas nos trens deve se manter em pátios em que o trem não pode realizar uma parada.

Alguns pátios possuem capacidade limitada para o processamento dos trens. Esta capacidade pode ser dado pelo parâmetro $CapN_t$, que indica a quantidade máxima de trens que podem realizar paradas nos pátios. Com isso, uma restrição de capacidade de pátios é introduzida no problema.

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} s_{tn} \leq CapN_n \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4-9)$$

Com todas as restrições definidas, a Função Objetivo para a formulação do Planejamento de Trens de Carga Geral precisa apenas da definição dos custos para ser criada. Diversos custos estão envolvidos na operação dos trens de carga geral.

O custo de transportar uma TB em um dado trecho $a \in \mathcal{A}$ é dado por $Custo1_a$, que engloba principalmente o consumo de combustível que varia com de acordo com os pesos das composições e o custo de manutenção da via permanente.

O custo de criar um trem $t \in \mathcal{T}$ é dado por $Custo2_t$ em R\$/trem que é independente do número de vagões associados ao mesmo e refere-se às equipes necessárias para a operação, ao custo de formação do trem no pátio de origem e de encerramento do trem no pátio de destino.

Já custo de alocar uma locomotiva para a operação de um trem $t \in \mathcal{T}$ é dado pelo $Custo3_t$, e está associado à manutenção das locomotivas e ao combustível que a locomotiva precisa gastar para transportar seu próprio peso.

Um trem pode retirar ou anexar vagões nos pátios ao longo do itinerário. Esta operação possui um custo em R\$/vagão representado pelo $Custo4_n$ que é composto principalmente pelo custos das equipes de manobra disponíveis nos pátios e pelo consumo de combustível na realização da operação.

O custo de um trem $t \in \mathcal{T}$ realizar uma parada em um pátio $n \in \mathcal{N}$ é dado pelo $Custo5_{tn}$ que engloba os custos de infra-estruturas específicas para possibilitar a parada nos pátios e pelo consumo adicional de combustível.

Apresentados todos os custos envolvidos na operação, temos a função objetivo do problema.

$$\begin{aligned}
\min \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \text{Peso}_p \text{Custo1}_a f_a^{pt} + \sum_{t \in \mathcal{T}} \text{Custo2}_t y_t + \sum_{t \in \mathcal{T}} \text{Custo3}_t l_t \\
+ \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \text{Custo4}_n (h_{pnt}^+ + h_{pnt}^-) + \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \text{Custo5}_{tn} s_{tn}
\end{aligned} \quad (4-10)$$

A função objetivo definida minimiza o somatório dos custos envolvidos no Planejamento de Trens de Carga Geral. O Custo1_a , que é definido em R\$/TB dever ser multiplicado pela quantidades de vagões circulando no trecho e por seu peso. Todos os os outros custos são multiplicados diretamente pelas variáveis as quais são relacionados.

Dessa forma, obtêm-se a formulação completa do problema, conforme detalhado a seguir.

$$\begin{aligned}
\min \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \text{Peso}_p \text{Custo1}_a f_a^{pt} + \sum_{t \in \mathcal{T}} \text{Custo2}_t y_t + \sum_{t \in \mathcal{T}} \text{Custo3}_t l_t \\
+ \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \text{Custo4}_n (h_{pnt}^+ + h_{pnt}^-) + \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \text{Custo5}_{tn} s_{tn}
\end{aligned} \quad (4-11)$$

sujeito a:

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \text{Comp}_p f_a^{pt} \leq \text{CapM}_a y_t \quad \forall t \in \mathcal{T}, a \in A_t \quad (4-12)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \text{Peso}_p f_a^{pt} \leq \text{CapT}_a l_t \quad \forall t \in \mathcal{T}, a \in A_t \quad (4-13)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{a \in \delta^+(n)} f_a^{pt} - \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{a \in \delta^-(n)} f_a^{pt} = d_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}, p \in \mathcal{P} \quad (4-14)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(n)} f_a^{pt} - \sum_{a \in \delta^-(n)} f_a^{pt} = (h_{pnt}^+ - h_{pnt}^-) \quad \forall n \in \mathcal{N}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (4-15)$$

$$\text{LMIN}_t y_t \leq l_t \leq \text{LMAX}_t y_t \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (4-16)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} (h_{pnt}^+ + h_{pnt}^-) \leq s_{tn} \sum_{p \in \mathcal{P}} v_p \quad \forall t \in \mathcal{T}, n \in \text{NDS}_t \quad (4-17)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} (h_{pnt}^+ + h_{pnt}^-) = 0 \quad \forall t \in \mathcal{T}, n \in \text{NNS}_t \quad (4-18)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} s_{tn} \leq \text{CapN}_n \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4-19)$$

$$f_a^{pt} \geq 0 \quad \forall a \in \mathcal{A}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (4-20)$$

$$y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (4-21)$$

$$l_t \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (4-22)$$

$$h_{pnt}^+, h_{pnt}^- \geq 0 \quad \forall p \in \mathcal{P}, n \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T} \quad (4-23)$$

$$s_{tn} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in \mathcal{T}, n \in \mathcal{N} \quad (4-24)$$

Além das restrições apresentadas, as restrições (4-20) até (4-24) definem os domínios das variáveis. O modelo não garante que as variáveis f_a^{pt} , que representam o fluxo dos vagões, serão inteiras. Para fins de planejamento tático, estas variáveis podem assumir valores fracionados. Por exemplo, um valor de 0,5 vagões de uma demanda quer dizer que em um dia o trem terá 1 vagão da demanda e no outro não terá nenhum vagão.

O modelo apresentado fornece todas as saídas necessárias ao Planejamento de Trens de Carga Geral. A variável y_t indica a quantidade de trens a ser formada em cada uma das rotas e a variável s_{tn} quais as paradas que serão realizadas pelos trens.

As variáveis l_t e f_a^{pt} indicam a composição dos trens com o número de locomotivas necessárias para tração e quais as demandas que circulam nos trens em cada trecho. Já as atividades de manobras nos pátios são representadas pelas variáveis h_{pnt}^+ e h_{pnt}^- indicando os vagões serão anexados e retirados em cada pátio, respectivamente.

No próximo capítulo, será apresentado um estudo de caso com a aplicação do modelo desenvolvido no Planejamento de Trens de Carga Geral de uma ferrovia brasileira.

5

Estudo de Caso

5.1

Descrição do Estudo de Caso

A empresa operadora ferroviária onde o estudo de caso foi realizado administra uma malha ferroviária de 1.643 km nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, região que concentra cerca da metade do PIB brasileiro.

A empresa recebe mensalmente as demandas para o planejamento do atendimento possuindo aproximadamente 200 pares de origem/destino de cargas a serem transportadas.

A operadora ferroviária atende basicamente dois tipos de transportes, o atendimento de carga pesada e o atendimento de carga geral. No que tange a composição dos trens, no transporte carga pesada dominam extensos trens unitários.

Já o segmento de carga geral, apesar de possuir algumas demandas atendidas por trens unitários, é atendido em sua maioria por uma gama de trens de carga geral pré-estabelecidos, com itinerários e horários definidos para movimentação da carga de diversos clientes. As quantidades de carga a serem transportadas por estes clientes normalmente não são suficientes para a operação de um trem unitário.

Uma das etapas do planejamento de atendimentos às demandas é o Planejamento de Trens de Carga Geral com a definição dos trens que deverão ser formados, as rotas que serão atendidas e com qual frequência.

No período do planejamento são levantadas pela área comercial da empresa ferroviária as demandas a serem atendidas. Esta informação é agregada de acordo com a origem da carga, o destino da carga, o cliente a ser atendido e tipo de mercadoria. Como exemplo de mercadorias transportadas nos trens de carga geral tem-se areia, cimento, produtos siderúrgicos acabados, escória de alto forno, celulose, ferro gusa, contêineres entre outras.

A informação é prospectada em toneladas úteis (TU) por mês, podendo ser facilmente convertida para vagões por mês, pois cada uma das demandas utiliza um tipo de vagão pré-definido, com uma determinada capacidade de

transporte. A figura 5.1 mostra o processo de planejamento de do atendimentos às demandas da empresa e onde está inserido o Planejamento de Trens de Carga Geral.

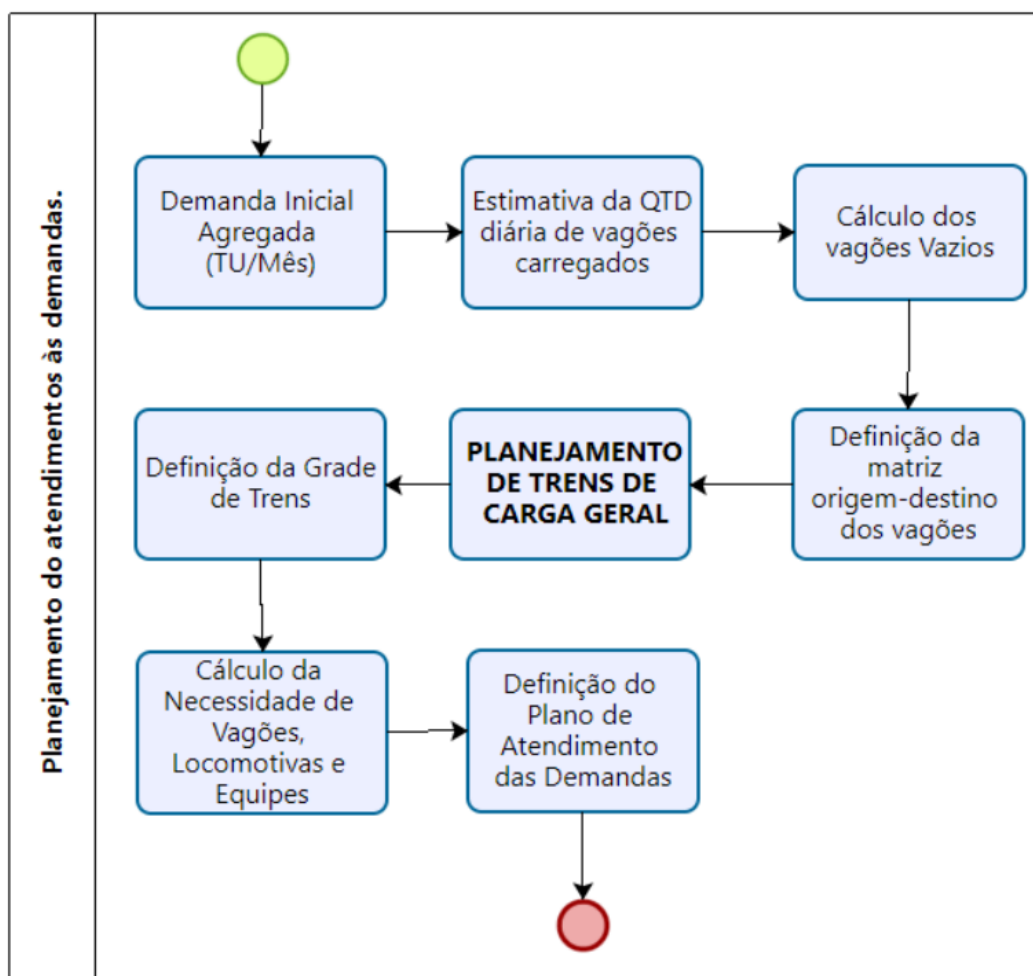


Figura 5.1: Processo de Planejamento de Atendimento.

O Planejamento de Trens de Carga Geral está no centro do Planejamento do atendimento às demandas, sendo um dos insumos principais para a confecção da grade de trens para para a definição do ciclo dos vagões, ciclo das locomotivas, necessidade de equipes de operação dos trens e utilização da malha ferroviária.

A malha da concessionária possui operação ativa em 253 pátios ferroviários. Porém, para o transporte de carga geral, são importantes apenas os pátios onde são realizadas as atividades necessárias à operação dos trens e terminais de carga geral.

Dos pátios importantes para o transporte de carga geral, existem 59 pátios em que se situam os terminais onde as demandas são carregadas ou descarregadas. Sendo assim, as demandas dos clientes são sempre informadas com origem e destino para um destes pátios.

Porém, a operação de entrega dos vagões em alguns dos terminais situados nestes pátios é realizada por pátios de atendimento, através da operação de trens locais. Os pátios de atendimento atendem diversos terminais e funcionam como concentradores para a formação de trens. São nos pátios de atendimento que os trens de carga geral são formados ou encerrados e onde ocorrem as paradas para anexação e retirada dos vagões. A Figura 5.2 ilustra o conceito dos pátios de atendimento.

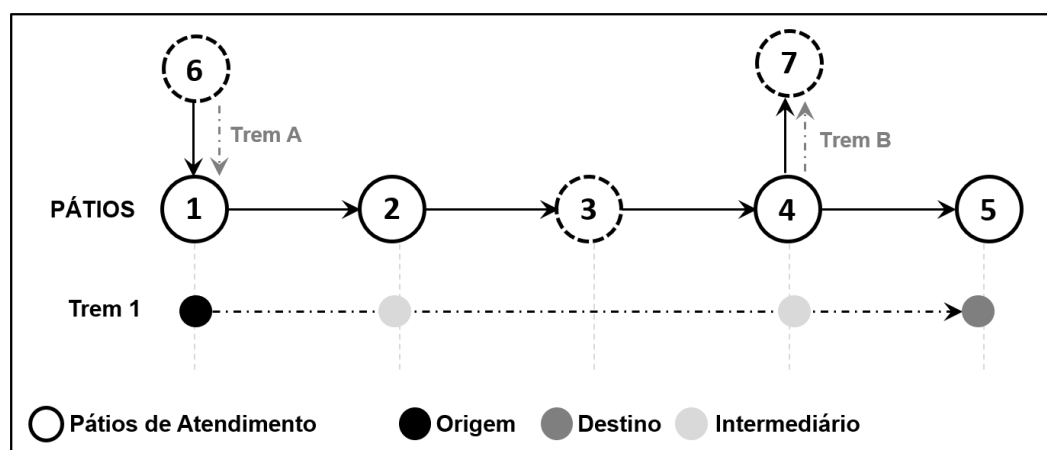


Figura 5.2: Operação nos Pátios de Atendimento.

Na figura é apresentada uma malha ferroviária composta por 7 pátios. Os pátios 1, 2, 4 e 5 são pátios de atendimento e neles que os trens de carga geral realizam suas operações. Considere uma demanda que será carregada em um terminal situado no pátio 6 e descarregada em um terminal no Pátio 7. Os vagões partem do pátio 6 em um trem local até o pátio 1 e entram no Trem de carga Geral 1 que leva os vagões até o pátio 4. Os vagões são então levados do pátio 4 até o seu destino no trem local B.

Importante avaliar também o itinerário do Trem 1. O trem faz o caminho 1-2-3-4-5, mas o pátio 3 não é um pátio de atendimento, sendo apenas um pátio de passagem para o trem onde este não poderá realizar paradas.

Considerando então apenas os pátios de atendimento, os trens de carga geral são operados em 25 pátios ferroviários. Este fato reduz um pouco a complexidade da rede formada pelos pátios que podem ser origem e destino dos trens e onde os trens podem realizar paradas, pois um pátio pode atender diversos terminais. A Figura 5.3 representa a malha real da ferroviária da empresa estudada, indicando o conjunto de pátios de atendimento e o conjunto de trechos formados pelos pátios.

Os 25 pátios de atendimento formam um grafo orientado com 41 trechos possíveis para a circulação dos trens. Por exemplo, os trechos 24-25, 8-9 e 10-11. Cada um desses trechos possui pátios com tamanhos limitados, restringindo

Devido às restrições de capacidade da malha, foram considerados 3 trens possíveis de formação para cada uma das 34 rotas factíveis. Sendo assim, o conjunto \mathcal{T} , de trens possíveis, tem 102 elementos.

Por exemplo, os trens 1, 2 e 3 atendem a rota com origem no pátio 6 e destino no pátio 11. É importante que os trens que atendem uma mesma rota sejam considerados trens diferentes, pois a composição de vagões e as operações em pátios intermediários podem diferir.

O número de demandas (\mathcal{P}) variou de acordo com os períodos de análise. Os resultados do modelo foram comparados com os dados reais do planejamento dos períodos estudados, no que diz respeito aos custos envolvidos no atendimento.

5.2

Análises e Resultados Experimentais

O modelo elaborado foi implementado para os 12 períodos estudados utilizando a linguagem de programação Julia versão 1.5.3, especificamente a biblioteca JuMP versão 0.21.5 e o solver Gurobi 9.1.1. As otimizações foram rodadas em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @1.80GHz com memória RAM de 16 GB, sob plataforma Windows 10.

O software gerou um modelo de Programação Inteira Mista (MIP). Por conta do tamanho do problema, não foram obtidas soluções ótimas para os casos analisados, sendo a duração da otimização o principal critério de parada para as rodadas de otimização realizadas.

Foram realizadas rodadas de 15 horas para todos os períodos. O tempo de 15 horas foi definido pensando-se no tempo de intervalo entre duas jornadas dos planejadores da ferrovia, para que a otimização comece a ser rodada no fim de uma jornada e esteja finalizada no retorno dos planejadores ao trabalho.

Por ser tratar de um problema tático o tempo de 15 horas é considerado aceitável pois o modelo será implementado apenas uma vez por ciclo de planejamento, no período anterior ao período a ser planejado.

Testes com durações mais longas não apresentaram melhoras significativas. O GAP de otimalidade atingido variou de acordo com as características do problema. Os resultados referentes ao GAP, quantidade de demandas avaliadas e quantidade de variáveis, restrições e não-zeros por período são apresentados na Tabela 5.1.

Para os períodos testados foi obtido um GAP médio de 3,15%, sendo que para todos os períodos o GAP ficou abaixo dos 5%. A qualidade das soluções obtidas para cada período será medida através da comparação dos custos reais envolvidos no planejamento de trens com os custos obtidos pelo modelo.

Per.	Qtd. (P)	Var.	Var. Int.	Rest.	Não- zeros	GAP
1	170	1.002.920	770	1.309.462	3.477.590	2,66%
2	185	1.091.345	770	1.424.587	3.784.160	2,98%
3	178	1.050.080	770	1.370.862	3.641.094	2,99%
4	167	985.235	770	1.286.437	3.416.276	3,33%
5	184	1.085.450	770	1.416.912	3.763.722	4,21%
6	171	1.008.815	770	1.317.137	3.498.028	2,67%
7	205	1.209.245	770	1.578.087	4.192.920	2,82%
8	206	1.215.140	770	1.585.762	4.213.358	4,23%
9	207	1.221.035	770	1.593.437	4.233.796	2,36%
10	185	1.424.587	770	1.091.345	3.784.160	2,49%
11	222	1.309.460	770	1.708.562	4.540.366	3,21%
12	202	1.191.560	770	1.555.062	4.131.606	3,82%
Média	190	1.121.803	770	1.464.241	3.889.756	3,15%

Tabela 5.1: Resultados computacionais

Será avaliada a variação em cada um dos custos. O $Custo1_a$ é custo de transportar uma TB em um dado trecho $a \in A$. O $Custo2_t$ em R\$/trem é o custo de criar um trem $t \in T$. O $Custo3_t$ é o custo de alocar uma locomotiva para a operação de um trem $t \in T$. O $Custo4_n$ é o custo em R\$/vagão de um trem retirar ou anexar vagões nos pátios ao longo do itinerário. Por fim, o $Custo5_{tn}$ é o custo de um trem $t \in T$ realizar uma parada em um pátio $n \in N$.

Após as rodadas de otimização, a Tabela 5.2 apresenta, para cada período avaliado, qual foi a variação em cada um dos custos descritos anteriormente, comparando os resultados obtidos pelo modelo de otimização com os custos reais dos períodos.

Na coluna $\Delta Custo1(\%)$ é apresentada, para cada período, a variação percentual do custo total de transportar as demandas nos trens. O Modelo gerou uma variação de 0,3% nestes custos.

Uma vez que todas as demandas do período são alocadas aos trens e partem de suas origens e chegam até o seus destinos e que o $Custo1_a$ varia principalmente com o trecho em que as demandas passam, há pouca variação nestes custos quando comparamos as saídas do modelo com dados reais. Em alguns casos foi vantajoso para uma demanda realizar um caminho mais longo para chegar até seu destino com a finalidade de evitar a criação de algum trem ou alocação de mais locomotivas aos trens. Porém, este fato não gerou variações significativas no custo.

A coluna $\Delta Custo2(\%)$ indica, para os períodos estudados, que o modelo

Período	ΔCusto1	ΔCusto2	ΔCusto3	ΔCusto4	ΔCusto5	ΔTotal
1	0,0%	-3,8%	-21,7%	20,3%	-25,5%	-2,4%
2	0,2%	-3,0%	-12,7%	9,4%	-14,5%	-1,3%
3	0,3%	-2,0%	-11,3%	14,5%	-22,4%	-0,9%
4	0,1%	-13,3%	-19,9%	12,5%	-30,2%	-3,9%
5	0,0%	0,1%	-27,7%	5,0%	-8,7%	-3,6%
6	0,4%	-13,0%	-22,3%	15,6%	-28,0%	-3,3%
7	0,0%	-9,9%	-17,2%	7,3%	-27,8%	-3,1%
8	0,6%	-12,5%	-18,1%	11,9%	-25,2%	-3,1%
9	0,4%	-10,8%	-20,7%	11,2%	-30,8%	-3,3%
10	0,2%	-0,6%	-10,2%	16,8%	-28,3%	-0,7%
11	0,7%	-7,3%	-20,8%	12,4%	-30,1%	-2,7%
12	0,3%	-7,6%	-25,4%	16,4%	-35,9%	-3,8%
Média	0,3%	-7,0%	-19,0%	12,8%	-25,6%	-2,7%

Tabela 5.2: Resultados de custos do Modelo x Dados reais

gerou uma redução média de 7,0% nestes custos reduzindo o número de trens circulando, quando comparado ao planejamento realizado.

A coluna $\Delta\text{Custo3}(\%)$ mostra uma redução média de 19,0% nestes custos. Em alguns casos, trens deixaram de ser formados o que reduz o custos de locomotivas e em outros casos foram formados trens com uma quantidade menor de locomotivas.

A coluna $\Delta\text{Custo4}(\%)$ indica que para os períodos estudados o modelo gerou um aumento de 12,8% nestes custo, mostrando um aumento no número de conexões realizadas pelos vagões no planejamento proposto pelo modelo quando comparado ao planejamento realizado.

A coluna $\Delta\text{Custo5}(\%)$ indica uma redução média de 25,6% nestes custos. Como o modelo gerou menos trens para acomodar as demandas, aconteceu uma redução no número de paradas e as paradas já existentes foram melhor aproveitadas para realização de conexões, o que fica evidenciado pelo aumento do Custo4_n .

Quando avaliamos o Custo Total de atendimento dos trens de carga geral, o modelo gerou uma redução média de 2,7% nos custos, trazendo ganhos em todos os períodos avaliados.

Para uma melhor análises dos resultados, é importante saber o quanto cada um dos custos descritos representam no Custo Total. A Tabela 5.3 apresenta, para os custos reais do planejamento de cada um dos períodos, a representatividade de cada um dos custos no Custo Total, que é a função objetivo do problema.

O Custo1_a é o Custo de Fluxo dos vagões nos trens para que as

Período	Custo1	Custo2	Custo3	Custo4	Custo5	Total
1	73,1%	9,1%	11,8%	4,4%	1,5%	100,0%
2	73,4%	8,8%	11,4%	4,9%	1,5%	100,0%
3	73,7%	8,6%	11,2%	5,0%	1,5%	100,0%
4	70,2%	10,4%	13,0%	4,5%	2,0%	100,0%
5	70,6%	9,7%	13,4%	4,6%	1,6%	100,0%
6	72,5%	9,1%	11,8%	4,7%	1,9%	100,0%
7	72,7%	9,0%	11,7%	4,7%	1,8%	100,0%
8	70,7%	10,1%	12,6%	4,8%	1,9%	100,0%
9	72,2%	9,3%	11,7%	4,8%	2,0%	100,0%
10	74,1%	8,4%	10,9%	4,8%	1,7%	100,0%
11	71,9%	9,0%	12,5%	4,9%	1,7%	100,0%
12	70,4%	10,1%	12,9%	4,6%	2,0%	100,0%
Média	72,1%	9,3%	12,1%	4,7%	1,8%	100,0%

Tabela 5.3: Representatividade dos custos

demandas sejam transportadas das origens até os destinos e este possui a maior representatividade, apresentando uma média de 72,1% do Custo Total nos períodos considerados. Dada a alta representatividade no Custo Total e a baixa variação no mesmo quando comparados os dados reais com os resultados do modelo, um indicador importante para avaliação dos ganhos do modelo é o Custo Total do Atendimento retirando estes custos.

Uma vez que chamamos o $Custo1_a$ de Custo de Fluxo dos Vagões, vamos chamar o somatório dos custos de 2 até 5 de Custo de Operação dos Trens. Para uma melhor análise dos resultados do modelo, vamos separar o Custo de Operação dos Trens em dois indicadores que mostram o Custo de Criação de trens e o Custo de Conexões de vagões.

O somatório do $Custo2_t$ e do $Custo3_t$ indica o Custo de Criação de trens, pois se referem aos custos dos recursos necessários para os trens circularem. Já o somatório do $Custo4_n$ com o $Custo5_{tn}$ indica o Custo de Conexões de vagões, pois são relativos às paradas e as trocas de vagões de trens. A Figura 5.4 resume os indicadores de custos apresentados.

A Tabela 5.4 apresenta, para cada período avaliado, qual foi a variação em cada um dos indicadores apresentados para análise dos resultados, comparando os resultados obtidos pelo modelo de otimização com os custos reais dos períodos.

Para os períodos estudados, o modelo gerou uma redução média de 13,8% nos custos de criação dos trens e um aumento médio de 2,2% nos custos de conexão dos vagões.

Quando analisamos os Custos Totais, o modelo gerou uma redução de 2,7% nos custos. Quando olhamos a variação dos custos excluindo o Custo1

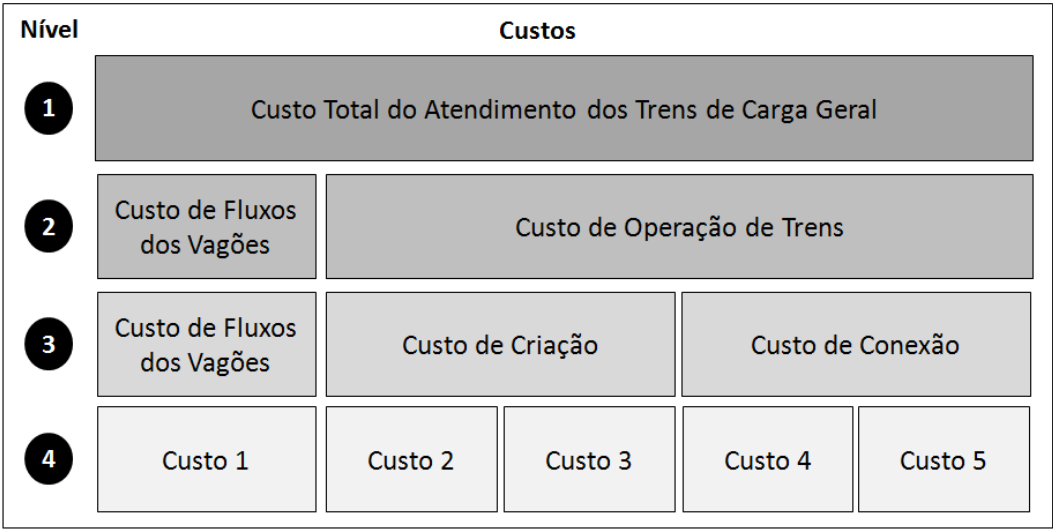


Figura 5.4: Indicadores de Custos.

Período	Δ Custo Fluxo	Δ Custo Criação	Δ Custo Conexão	Δ Custo Total	Δ Custo Trens
1	0,0%	-13,9%	8,4%	-2,4%	-9,0%
2	0,2%	-8,4%	3,7%	-1,3%	-5,5%
3	0,3%	-7,2%	5,9%	-0,9%	-4,0%
4	0,1%	-16,9%	-0,6%	-3,9%	-13,4%
5	0,0%	-16,0%	1,4%	-3,6%	-12,3%
6	0,4%	-18,2%	2,8%	-3,3%	-13,2%
7	0,0%	-14,1%	-2,6%	-3,1%	-11,3%
8	0,6%	-15,6%	1,2%	-3,1%	-11,7%
9	0,4%	-16,4%	-1,3%	-3,3%	-12,6%
10	0,2%	-6,0%	5,0%	-0,7%	-3,2%
11	0,7%	-15,1%	1,3%	-2,7%	11,3%
12	0,3%	-17,6%	0,7%	-3,8%	-13,5%
Média	0,3%	-13,8%	2,2%	-2,7%	-10,1%

Tabela 5.4: Indicadores - Resultados do modelo x Dados reais

temos uma redução média de 10,1% no somatório dos custos de criação e conexão dos trens. Dada a alta representatividade e baixa variação no Custo1, a coluna $\Delta\text{CustoTrens}$ mostra melhor os benefícios do modelo.

Podemos notar um aumento no custo médio de conexão, mas uma redução significativa no custo médio de criação dos trens. Na maioria dos períodos o modelo gerou novas conexões de vagões para que fosse possível o transporte das demandas sem a necessidade de adicionar mais trens no sistema.

Para o perfil de demanda de cada um dos períodos, o modelo indicou a criação de trens diferentes dos que foram planejados, indicando principalmente as melhores conexões dos vagões nos trens, gerando uma menor necessidade de trens e melhores taxas de ocupação.

Para ilustração das soluções encontradas pelo modelo, será detalhado o Planejamento de Trens realizado para o período 12, que foi o período com maior redução no Custo de Operação de Trens. A 5.5 ilustra os trens planejados para o atendimento das demandas do período e a 5.6 ilustra os trens propostos pelo modelo de otimização. Nas figuras não estão representados todos os pátios da malha, mas apenas os pátios relevantes para a exemplificação das melhorias geradas pelo modelo para o período 12.

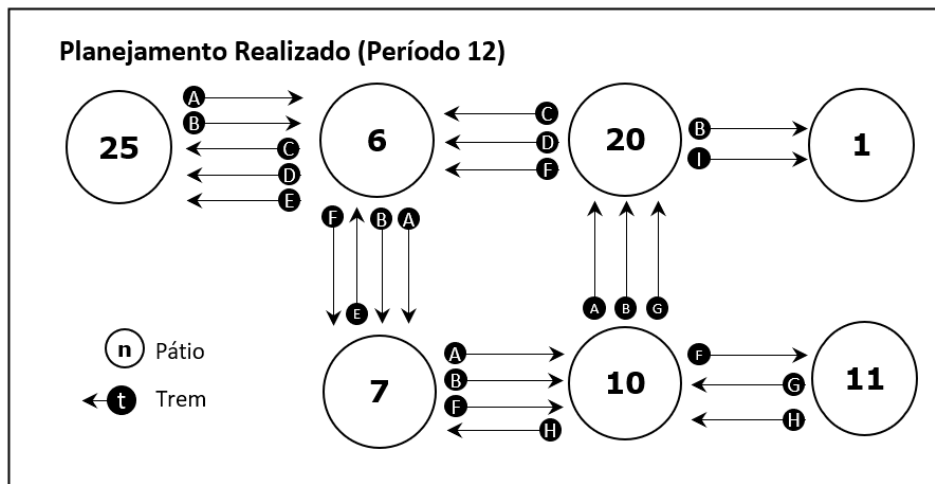


Figura 5.5: Planejamento de Trens Realizado para o período 12.

No planejamento proposto pelo modelo, o trem D deixou de ser criado. Em vez de criar um segundo trem com origem no pátio 20 e destino no pátio 25, o modelo aproveitou a capacidade ociosa do trem F, fazendo com que os vagões que circulariam no trem D realizassem uma conexão com o trem E no pátio 6 para ainda assim chegarem ao pátio 25.

Além disso, em vez de criar o trem G do pátio 11 para o pátio 20, o modelo aproveitou a capacidade ociosa do trem H para levar os vagões que circulariam no trem G para o pátio 10 e realizar uma conexão com o trem A.

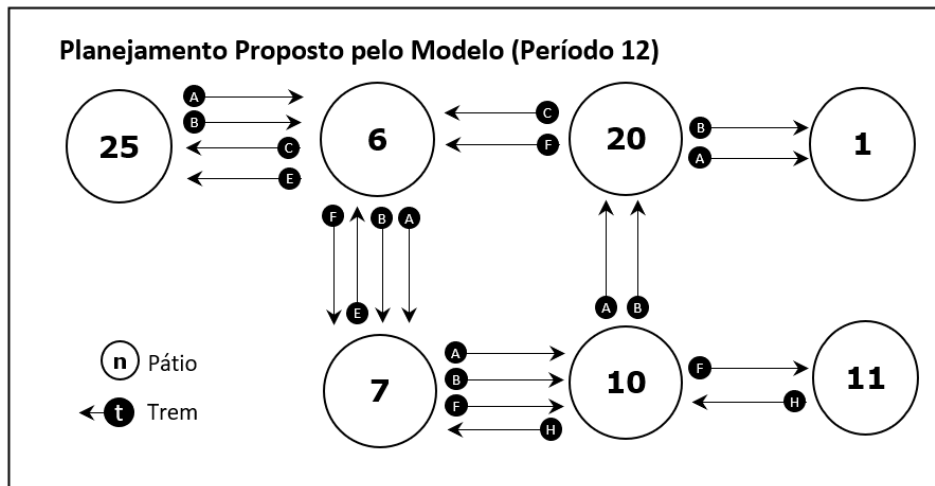


Figura 5.6: Planejamento de Trens Proposto para o período 12.

Outra saída do modelo foi em vez de fazer o trem A com destino no pátio 20 e depois criar o trem I do pátio 20 para o pátio 1, mudou o destino do trem A para o pátio 1, gerando um fluxo mais contínuo dos vagões, sem a necessidade de conexão no pátio 20.

Na operadora ferroviária, o Planejamento de Trens hoje é realizado manualmente, através de planilhas eletrônicas, sem nenhum tipo de otimização. A variação do mix de rotas das demandas é muito significativa de um período para o outro, e por ser realizado manualmente, normalmente não há tempo hábil para buscar soluções que gerem um melhor planejamento dos trens. Este fato faz com que sejam gerados planos com um maior custo e com baixa ocupação dos trens.

O modelo de otimização proposto permite, além da otimização da criação dos trens, gerar uma melhor solução operacional para o transporte das demandas e uma maior velocidade nas análises.

O Planejamento de Trens é de grande importância para o transporte de Carga Geral das ferrovias. O planejamento deve contemplar quais trens irão circular, quais as rotas atendidas, suas frequências e os vagões que irão compor cada trem. No presente trabalho, foi proposto um modelo de otimização para o Planejamento de Trens de carga geral buscando minimizar os custos envolvidos na criação e operação dos trens e foi realizado um estudo de caso em uma ferrovia brasileira para avaliação do modelo.

O modelo foi desenvolvido tomando como base os modelos apresentados nos trabalhos de Crainic (2000) e de Yaghini et al. (2014) com a adição de várias restrições para atingir uma maior proximidade com a realidade.

As otimizações foram realizadas para doze períodos de planejamento utilizando a linguagem de programação Julia versão 1.5.3, especificamente a biblioteca JuMP versão 0.21.5 e o solver Gurobi 9.1.1. As otimizações foram rodadas em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @1.80GHz com memória RAM de 16 GB, sob plataforma Windows 10.

Por conta do tamanho do problema, não foi obtida solução ótima para os casos analisados, sendo a duração da otimização o principal critério de parada para as rodadas de otimização realizadas. Foram realizadas rodadas de 15 horas para todos os períodos. O tempo de 15 horas foi definido pensando-se no tempo de intervalo entre duas jornadas dos planejadores da ferrovia, para que a otimização comece a ser rodada no fim de uma jornada e esteja finalizada no retorno dos planejadores ao trabalho.

Por ser tratar de um problema tático o tempo de 15 horas é considerado aceitável pois o modelo será implementado apenas uma vez por ciclo de planejamento, no período anterior ao período a ser planejado.

Para os 12 períodos estudados, o modelo gerou uma redução média de 2,7% no Custo Total do Atendimento dos Trens de Carga Geral, com uma redução de 10,1% nos Custos de Operação de Trens, trazendo ganhos em todos os períodos avaliados.

Os resultados do modelo permitiram aos planejadores de trens da operadora ferroviária ter uma melhor visão de quais trens deveriam ser criados para os perfis de demanda de cada período, uma vez que o mix de rotas varia muito

de um período para o outro.

Na ferrovia onde o estudo de caso foi realizado, o Planejamento de Trens de Carga Geral hoje é realizado manualmente, através de planilhas eletrônicas, sem nenhum tipo de otimização e com pouco tempo disponível para análises muito detalhadas. Este fato faz com que sejam gerados planos com um maior custo de operação e com baixa ocupação dos trens. O modelo de otimização proposto permite uma melhor solução operacional para o transporte das demandas, com menores custos de operação e uma maior velocidade nas análises.

Para trabalhos futuros, deve ser avaliada a possibilidade dos trens anexarem e retirarem locomotivas em pátio intermediários, para redução do custo de locomotivas para a operação, uma vez que no modelo uma vez alocada uma locomotiva a um trem, ela permanece no trem em todo seu itinerário.

Além disso, os trabalhos futuros poderão ser na busca e adaptação de heurísticas ou outros métodos de solução para a resolução do modelo, buscando melhorar os tempos de processamento e a qualidade das soluções.

Referências Bibliográficas

- Ahuja, R. K., Cunha, C. B., e Şahin, G. (2005). Network models in railroad planning and scheduling. In *Emerging theory, methods, and applications*, pages 54–101. INFORMS.
- Ahuja, R. K., Jha, K. C., e Liu, J. (2007). Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 37(5):404–419.
- ANTF (2021). Informações gerais - antf. <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acessado: 2021-01-12.
- ANTT (2020). Anuário do setor ferroviário – 2020. http://antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario_Estatistico.html. Acessado: 2020-05-28.
- Assad, A. A. (1980). Modelling of rail networks: Toward a routing/makeup model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1-2):101–114.
- Caprara, A., Fischetti, M., e Toth, P. (2002). Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations research*, 50(5):851–861.
- Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D., e Guida, P. L. (1997). Algorithms for railway crew management. *Mathematical programming*, 79(1):125–141.
- Cordeau, J.-F., Toth, P., e Vigo, D. (1998). A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation science*, 32(4):380–404.
- Corman, F., D'Ariano, A., Pacciarelli, D., e Pranzo, M. (2010). A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(1):175–192.
- Crainic, T., Ferland, J.-A., e Rousseau, J.-M. (1984). A tactical planning model for rail freight transportation. *Transportation science*, 18(2):165–184.
- Crainic, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European journal of operational research*, 122(2):272–288.
- Crainic, T. G. (2003). Long-haul freight transportation. In *Handbook of transportation science*, pages 451–516. Springer.

- Foletto, M. B., Rosa, R. A., Louzada, P. C., e de Barros Pimenta, L. (2016). Modelo matemático para uma nova estratégia de planejamento de distribuição de vagões vazios. In *Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pages 1495–1506, Vitória, Espírito Santo. SOBRAPO.
- Fukasawa, R., de Aragão, M. V. P., Porto, O., e Uchoa, E. (2002). Solving the freight car flow problem to optimality. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 66(6):42–52.
- Haghani, A. E. (1989). Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(6):433–452.
- Hamacher, F., Porto, O., Uchoa, E., e Poggi, M. (2005). Logística ferroviária: Resolução do problema de alocação ótima de vagões e locomotivas no curto prazo. In *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pages 943–954, Gramado. SOBRAPO.
- Ireland, P., Case, R., Fallis, J., Dyke, C. V., Kuehn, J., e Meketon, M. (2004). The canadian pacific railway transforms operations by using models to develop its operating plans. *Interfaces*, 34(1):5–14.
- Jin, J. G., Zhao, J., e Lee, D.-H. (2013). A column generation based approach for the train network design optimization problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 50:1–17.
- Martinelli, D. R. e Teng, H. (1996). Optimization of railway operations using neural networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(1):33–49.
- Martinelli, R., de Aragão, M. P., e Reis, M. (2008). Modelos para o planejamento tático para ferrovias. In *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pages 744–755, João Pessoa. SOBRAPO.
- Vaidyanathan, B., Ahuja, R. K., e Orlin, J. B. (2008). The locomotive routing problem. *Transportation Science*, 42(4):492–507.
- Yaghini, M., Momeni, M., e Sarmadi, M. (2014). Solving train formation problem using simulated annealing algorithm in a simplex framework. *Journal of Advanced Transportation*, 48(5):402–416.