



Hugo Costa Campbel

**Otimização Logística de Manutenção baseada
no Planejamento de Distribuição de Materiais
em uma Malha Ferroviária**

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
Coorientador: Prof. Eduardo Pestana de Aguiar

Rio de Janeiro
Março de 2021



Hugo Costa Campbel

**Otimização Logística de Manutenção baseada
no Planejamento de Distribuição de Materiais
em uma Malha Ferroviária**

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. Eduardo Pestana de Aguiar

Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. Artur Alves Pessoa

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. André Luis Marques Marcato

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Rio de Janeiro, 03 Março 2021

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

Hugo Costa Campbel

Graduou-se em Engenharia de Produção na UFJF. Durante sua graduação, foi bolsista CAPES de Iniciação Científica no tema "Métodos estatísticos aplicados à Análise de Recursos em Gestão de Projetos pela UFJF e experiência de intercâmbio internacional pelo Ciência sem Fronteiras na University of New South Wales (UNSW) em Sydney, Austrália. Durante o Mestrado desenvolveu um trabalho aplicado em logística ferroviária de manutenção. Atualmente trabalha desenvolvendo soluções em logística e planejamento de manutenção ferroviária utilizando técnicas de otimização.

Ficha Catalográfica

Campbel, Hugo Costa

Otimização Logística de Manutenção baseada no Planejamento de Distribuição de Materiais em uma Malha Ferroviária / Hugo Costa Campbel; orientador: Rafael Martinelli Pinto; coorientador: Eduardo Pestana de Aguiar. – 2021.

47 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. Logística Ferroviária. 3. Planejamento da Manutenção. 4. Programação Inteira-Mista. I. Martinelli, Rafael. II. Aguiar, Eduardo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais, pelo apoio
e incentivo.

Agradecimentos

"Porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele a glória por toda a eternidade!" (Rm, 11:36).

Nenhum dos desafios enfrentados, nenhuma das conquistas e nada do que foi construído tem importância se não pelas pessoas que dão sentido à minha vida, que significam muito a mim.

Agradeço primeiramente a Deus, por colocar todas essas pessoas em minha vida e por estar sempre ao meu lado me dando forças, oportunidades e me mostrando o caminho a ser seguido.

Agradeço imensamente à minha mãe Maura, meu pai Carlos e minha vó Wanda pelo apoio em todos os momentos da minha vida, me ajudando nas dificuldades, nos momentos de indecisão e me ensinando que ter amor por aquilo que se faz é o primeiro passo para o sucesso.

Ao meu orientador Rafael Martinelli e ao co-orientador Eduardo Aguiar, que sempre foram atenciosos, dedicados e acessíveis.

Aos professores e mestres que contribuíram para minha formação nesta etapa, em especial ao professor Itamar Souza que sempre me incentivou.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e Universidade Federal de Juiz de Fora, por terem oferecido a base necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos que sempre me incentivaram e ajudaram!

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

Resumo

Campbel, Hugo Costa; Martinelli, Rafael; Aguiar, Eduardo. **Otimização Logística de Manutenção baseada no Planejamento de Distribuição de Materiais em uma Malha Ferroviária**. Rio de Janeiro, 2021. 47p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de ferramentas de otimização destaca-se como um relevante diferencial para as empresas no que tange a otimização de processos e melhoria de sistemas e performances. Neste contexto, a busca por modelos de programação simples e eficazes para a resolução dos problemas contribuem para adaptação de modelos existentes a fim de atender a esta crescente demanda. Atualmente, o setor de transporte ferroviário busca otimização de seus processos com o objetivo de aumentar sua competitividade e eficiência frente ao transporte realizado por rodovia. Este estudo, focado na melhoria de processos do setor ferroviário, tem como objetivo realizar o planejamento da distribuição de materiais de manutenção em uma malha ferroviária com o menor custo operacional viável. Para isto, o problema é modelado como um problema de programação inteira mista e busca tornar o processo mais eficiente, com redução de desperdícios e otimização dos recursos. Os resultados obtidos foram comparados ao processo atual de distribuição a fim de medir os ganhos em processo e em redução de custos e recursos. O modelo se mostrou eficiente em tempo e qualidade de solução quando comparado com o atual, apresentando uma redução de 20% a 26% nos custos totais de distribuição, variando de acordo com o almoxarifado analisado. Além disso, o estudo também mostrou uma redução no custo de distribuição para todas as localidades testadas, sendo que, quanto menor a distância destes locais ao almoxarifado, maior a redução dos custos logísticos relacionados.

Palavras-chave

Logística Ferroviária; Planejamento da Manutenção; Programação Inteira-Mista.

Abstract

Campbel, Hugo Costa; Martinelli, Rafael (Advisor); Aguiar, Eduardo (Co-Advisor). **Maintenance Logistics Optimization based on Materials Distribution Planning in a Railway**. Rio de Janeiro, 2021. 47p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of optimization tools highlights a relevant differential to companies in terms of improving processes, systems and performance. In this context, the search for simple and effective programming models for problem solving contributes to the adaptation of existing models to attend this increasing demand. Currently, the railway transport seeks to optimize its processes in order to increase its competitiveness and efficiency when compared to road transport. This study, focused on improving processes in the railway, aims to realize the distribution planning of maintenance materials in a railway network with the lowest feasible operating cost. For this, the problem is modeled as a mixed-integer programming problem and it aims to make the process more efficient, with waste reduction and resource optimization. The obtained results were compared to the current distribution process in order to measure gains in process and in reducing costs and resources. The model proved to be efficient in both time and solution quality when compared to the current one, presenting a reduction of 20% to 26% in the distribution costs, depending on the analyzed warehouses. In addition, the study has also indicated a reduction in the distribution costs in all tested locations and the distance among those locations and their warehouses leads to a greater reduction in the logistic costs.

Keywords

Railway Logistics; Maintenance Planning; Mixed-Integer Programming.

Sumário

1	Introdução	12
2	Revisão da Literatura	14
2.1	Classificação dos Problemas Ferroviários	14
2.2	Problema de Roteamento de Veículos	15
2.3	Problemas de Scheduling	17
2.4	Exemplos de Problemas Ferroviários	18
3	Descrição do Problema	20
3.1	A empresa	20
3.2	O processo de manutenção	21
3.3	Processo atual de distribuição de materiais	23
3.4	Processo proposto de distribuição de materiais	26
4	Formulação Matemática	28
5	Resultados Experimentais	33
5.1	Definição de Parâmetros	33
5.2	Características do modelo matemático	34
5.3	Análise do indicador: Quantidade de trens	35
5.4	Análise do indicador: Custo de Distribuição por coordenação	36
5.5	Análise do indicador: Custo Total de Distribuição	36
5.6	Resultados qualitativos e a visão estratégica do processo	38
5.7	Implementação do modelo	39
6	Conclusão	41
	Referências bibliográficas	44

Lista de figuras

Figura 3.1	Modelo Esquemático Atual da Distribuição de Materiais	24
Figura 3.2	Mapa Esquemático Atual da Distribuição das Coordenações ao longo da malha ferroviária	25
Figura 3.3	Mapa Esquemático Proposto da Distribuição das Coordenações ao longo da malha ferroviária	26
Figura 3.4	Modelo Esquemático Proposto da Distribuição de Materiais	27
Figura 5.1	Redução dos custos de distribuição para as coordenações do almoxarifado MG	37
Figura 5.2	Redução dos custos de distribuição para as coordenações do almoxarifado RJ	37
Figura 5.3	Redução dos custos de distribuição para as coordenações do almoxarifado SP	38
Figura 5.4	Redução dos custos totais de distribuição por almoxarifado	38

Lista de tabelas

Tabela 5.1	Resultados experimentais dos testes	35
Tabela 5.2	Custo do transporte por tonelada de material transportado	35

Lista de Abreviaturas

AMV – Aparelho de Mudança de Via

MIP – Mixed-Integer Programming ou Programação Inteira-Mista

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

PCO – Planejamento e Controle de Operações

PIB – Produto Interno Bruto

PNL – Plano Nacional de Logística

PRV – Problema de Roteamento de Veículos

1

Introdução

No ambiente corporativo atual em que sistemas estão cada vez mais robustos e complexos, a competitividade empresarial demanda a busca por otimização dos processos. O principal objetivo é simplificar sistemas e garantir a sustentabilidade do negócio e, por este motivo, as ferramentas de otimização são essenciais para aumentar a eficiência na utilização dos recursos existentes e agilizar a tomada de decisões.

Dentre as diversas áreas que estão se aperfeiçoando, a logística ferroviária se tornou um objeto de estudo e a aplicação de ferramentas de otimização está ganhando cada vez mais destaque. Embora os processos ferroviários estejam ligados a um conjunto de problemas complexos, muitas vezes relacionados com sua característica de operação ininterrupta, a aplicação de ferramentas e metodologias de Pesquisa Operacional tem sido difundidas neste meio. É notório que a aplicação de métodos de otimização em ferrovias tem crescido nos últimos anos em diversos países [1], entretanto, sua utilização ainda é rara e/ou superficial nas ferrovias brasileiras [2]. Dessa forma, para se tornarem competitivas no mercado mundial, estas empresas têm investido na otimização de seus processos de forma a se tornarem mais eficientes.

Outro fator que indica a necessidade de ferrovias brasileiras otimizar seus processos é a sua baixa representatividade no transporte de cargas do país [3]. Segundo o Plano Nacional de Logística Integrada [4], em 2015, 65% da carga transportada pelo Brasil foi movimentada por rodovias, enquanto apenas 15% passaram por ferrovias. Os gastos elevados do transporte de cargas por rodovias no Brasil está associado ao aumento constante no preço dos combustíveis, às péssimas condições das rodovias nacionais e à cobrança de pedágios. Dados do Plano Nacional de Logística Integrada [4] também revelam que 72% das rodovias brasileiras se encontram em situação regular, ruim ou péssima. Este fator contribui para o aumento nos custos com manutenção dos veículos e uma queda na qualidade do transporte dos produtos. De modo geral, os fatores apresentados contribuem significativamente para o custo total de transporte e os consumidores finais chegam a pagar entre 10% e 15% do valor do produto com o transporte do mesmo. No Brasil, o gasto com transporte de cargas corresponde cerca de 10,8% do PIB [5].

Neste contexto, o transporte ferroviário surge como uma alternativa eficiente para atendimento logístico no Brasil. É importante também ressaltar que, em 2015, enquanto o transporte rodoviário foi responsável por 86% das emissões de CO₂, o transporte de cargas realizados por ferrovias foi responsável por apenas 7% [4]. Ou seja, o transporte ferroviário reduz as emissões de CO₂ em 64,7%, se comparado ao rodoviário. Aliado à expectativa de crescimento de demanda por transporte de cargas e à sobrecarga do sistema rodoviário brasileiro, o modal ferroviário é uma alternativa eficiente e segura frente ao caos apresentado nas rodovias nacionais, contribuindo para uma redução nos custos de frete. Nesta perspectiva, um estudo da Ilos [6] mostra ainda que o frete ferroviário é seis vezes menor, se comparado com o rodoviário. Porém, como investimentos na construção de novas linhas férreas demandam tempo e são extremamente caros, é preciso que os recursos ferroviários sejam melhor aproveitados, aumentando a eficiência e desempenho deste sistema de transporte [7].

Este trabalho tem como objetivo analisar o modelo atual de distribuição de material para manutenção em uma malha ferroviária e sugerir um novo modelo baseado na entrega por veículos ferroviários. Para contribuir com a análise, os modelos serão comparados levando em consideração os custos logísticos envolvidos, utilização de recursos necessários para a distribuição e eficiência do processo. Dessa forma será possível analisar a viabilidade técnica e financeira do modelo proposto, considerando a abordagem em nível tático.

A estrutura desta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura com os principais problemas relacionados à abordagem deste estudo. O Capítulo 3 compreende a descrição do processo atual, suas características e peculiaridades da distribuição de material para manutenção em uma ferrovia. O modelo matemático utilizado na construção da proposta para distribuição de materiais é encontrado no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos a partir do modelo matemático desenvolvido, bem como a análise de indicadores que comparam o modelo proposto com o modelo atual de distribuição. Por fim, o Capítulo 6 resume quais foram as principais conclusões acerca dos resultados alcançados e também sugere caminhos para a continuidade do trabalho em situações futuras.

2

Revisão da Literatura

Este capítulo tem como objetivo analisar os trabalhos científicos encontrados na literatura que são correlatos ao tema da presente dissertação. As referências utilizadas contribuem para a compreensão do problema e conhecimento das estratégias de solução abordadas. Além disso, foi possível verificar que o trabalho demonstra ter importância no cenário atual de diversas ferrovias brasileiras uma vez que não existem na literatura muitos trabalhos relacionados ao problema apresentado neste estudo.

O setor de transportes possui diversos problemas que podem ser modelados e resolvidos por meio da utilização de técnicas de otimização matemática. Entretanto, o crescimento observado na literatura acerca do tema é lento e grande parte das contribuições referem-se a modelos simplificados ou pequenas instâncias, que não possibilitam incluir características da aplicação prática dos problemas [8].

Nos últimos anos, com o crescimento da competição entre as ferrovias, impulsionado pela privatização de ferrovias nacionais, estas operadoras logísticas têm investido cada vez mais em otimização aliada à evolução dos computadores, que contribuem para resolução de problemas de otimização complexos em um período de tempo relativamente pequeno.

2.1

Classificação dos Problemas Ferroviários

A classificação dos problemas ferroviários pode ocorrer de diversas maneiras mas, tipicamente, são classificados em problemas locais, que englobam pontos focais de operação como pátios ou um trecho definido, ou problemas globais, cuja abrangência possui maior representatividade envolvendo diversos recursos da malha ferroviária em estudo [8]. Outra maneira de classificação é de acordo com o horizonte de planejamento considerado, sendo divididos em estratégicos, táticos e operacionais. [8].

- **Problemas Estratégicos:** Os problemas de nível estratégico estão preocupados em construir recursos duráveis que poderão ser usados por um longo período de tempo. Na grande maioria das vezes estão relacionados a decisões que envolvem aquisição de recursos e necessidade

de investimento de capital. Alguns exemplos encontrados na literatura são os projetos de construção de uma malha ferroviária, duplicação de linhas, aquisição de novos ativos (locomotivas e vagões) e investimentos em terminais de cargas;

- **Problemas Táticos:** Os problemas de nível tático, por sua vez, estão relacionados a problemas de médio prazo e levam em consideração algumas políticas ou regulações de operação ferroviária que são atualizadas num curto período de tempo. Como estes problemas possuem uma visão de tempo menor, se comparado ao nível estratégico, eles consideram alterações de parâmetros e sazonalidades, mas sem incorporar mudanças diárias. Os planos de manutenção, decisão dos tamanhos dos trens e o cálculo da necessidade de recursos necessários para o transporte de cargas mensal são exemplos de problemas táticos;
- **Problemas Operacionais:** Os problemas de nível operacional estão relacionados a problemas diários e levam em consideração detalhes específicos de operação para o período determinado. Estes problemas lidam com o detalhamento das atividades diárias envolvendo o ambiente dinâmico em que estão inseridos, como por exemplo, despacho de trens, programação de maquinistas para atendimento das frotas e programação de equipes para execução das atividades diárias de manutenção.

A seguir serão apresentados dois problemas clássicos na literatura de otimização ferroviária e que serviram como base para a construção do problema apresentado nesta dissertação: Problema de Roteamento de Veículos e Problema de Scheduling.

2.2

Problema de Roteamento de Veículos

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) tem sido objeto de estudo nos últimos anos devido à necessidade de diminuição dos gastos globais do processo, da produção até a venda e é atualmente um dos problemas mais estudados em otimização combinatória [9]. Sob esta perspectiva, um dos principais objetivos deste tipo de problema é reduzir o percentual de gastos com transporte, possibilitando redução no custo final do produto. De maneira geral, o Problema de Roteamento de Veículos consiste no atendimento de um conjunto de consumidores (destinos) através de uma frota de veículos, com origem definida (geralmente depósitos) a fim de minimizar a distância percorrida, ou seja, o custo total de roteamento. É importante destacar que cada rota é composta por um conjunto de clientes, cada cliente é visitado uma

única vez pelo veículo, a demanda de cada cliente é conhecida e sua soma não pode exceder a capacidade do veículo definido para realizar a rota e cada rota deve ser percorrida respeitando a restrição de tempo [9].

As técnicas de resolução de PRV podem ser divididas em métodos exatos e heurísticas, conforme número de pontos de demanda e complexidade do problema [10]. Os métodos exatos são utilizados para resolução de problemas com um pequeno número de pontos de demanda e para situações que simplificam os problemas práticos. Entretanto, os métodos heurísticos são mais utilizados uma vez que a maioria dos problemas reais apresentam grande número de pontos de demanda e o custo-benefício para obtenção da solução é satisfatório [11]. Segundo Cordeau et. al [9] existem quatro atributos de uma boa heurística para o PRV, são elas: Flexibilidade, necessária para acomodar as restrições de situação prática; Velocidade computacional; Simplicidade da codificação; Acurácia e Consistência, que mede a precisão da solução fornecida pela heurística comparada à solução ótima.

No setor ferroviário, o planejamento da operação deve criar uma grade de trens considerando o tempo de partida e de chegada específicos. O objetivo é identificar a maneira mais eficiente de realizar o transporte logístico, seja de cargas ou pessoas, satisfazendo às necessidades operacionais dos trens e limitando à sua capacidade. Outro aspecto importante do planejamento da operação é que, embora a atualização do plano ocorra mensalmente, ajustes devem ser realizados diariamente a fim de adaptar o planejamento à variabilidade de demanda [8]. Grande parte dos modelos de otimização para ferrovias são definidos por rede, com origens e destinos. Os arcos, que ligam as origens aos destinos, representam uma conexão possível entre estes dois pontos.

Abaixo serão apresentadas algumas das variações do Problema de Roteamento de Veículos:

- **PRV Capacitados:** são problemas que consideram uma frota de veículos uniforme que realize o transporte total ou parcial de um conjunto de pedidos a um custo mínimo, com capacidade limitada e sem limitação de tempo na entrega [12];
- **PRV com Janela de Tempo:** é uma generalização do problema anterior incluindo uma janela de tempo como intervalo obrigatório para iniciar o atendimento do cliente [13];
- **PRV com Coleta e Entrega:** consiste na escolha de rota para os veículos a fim de transportar encomendas, cada encomenda sendo coletada em uma localidade e entregue em outra [14];

- **PRV com Múltiplos Depósitos:** consiste na saída de veículos de vários depósitos para atender às demandas dos clientes, podendo ser dividida em diferentes rotas e depósitos. Seu objetivo é determinar um conjunto de rotas de forma que o custo total seja minimizado, que cada cliente seja atendido por apenas um veículo, que o total de demanda para o veículo não exceda sua capacidade e que as rotas tenham início e fim nos depósitos [15];
- **PRV com Entrega Fracionada:** neste tipo de problema, os clientes podem ser atendidos por mais de um veículo [16].

2.3

Problemas de Scheduling

Outro problema amplamente discutido na logística ferroviária é o Problema de Scheduling. Este problema pode ser definido como um processo de tomada de decisão que envolve a alocação de recursos a tarefas em períodos de tempo determinados, com o objetivo de otimizar um ou mais critérios [17]. De um modo geral, nos problemas de Scheduling existe uma necessidade de executar uma quantidade de processos (tarefas), que são sequenciados com uma ordem especificada e utiliza, para isto, um determinado número de máquinas. É possível obter, então, o tempo de início e fim de cada item nas máquinas em que o item é processado [17].

Os principais problemas clássicos de Scheduling são:

- **Job Shop:** ocorre quando cada tarefa é processada nas máquinas, seguindo um roteiro e não há paradas de tarefas para execução de outras [18];
- **Flow Shop:** um caso particular do Job Shop em que as tarefas seguem o mesmo roteiro de processamento nas máquinas [19];
- **Open Shop:** uma variação do Job Shop que permite definir também o roteiro de cada tarefa de acordo com a conveniência [20].

O Scheduling tem um importante papel na maioria das indústrias e sistemas de produção como um processo de tomada de decisão, mas também na indústria de transporte e logística, de distribuição e de serviços. No caso do transporte ferroviário, enquanto os modelos de Roteamento de Veículos estão preocupados com a eficiência no percurso dos trens, os modelos de Scheduling abordam a dimensão temporal das operações ferroviárias [21]. Isto ocorre devido a necessidade de sincronizar o uso dos recursos disponíveis, uma vez que a linha férrea é compartilhada por um número significativo de veículos,

além de depender da disponibilidade de diversos recursos (locomotivas, vagões, maquinistas, entre outros).

Os primeiros problemas de scheduling ferroviário consideravam um conjunto de estações conectadas por uma linha singela como, por exemplo, problema de criação de grade para trens de passageiros nas estações [22] e redução do número de veículos necessários no sistema ferroviário ao convergirem em uma estação central [23]. Posteriormente, os problemas que ganharam destaque na literatura estavam relacionados a gerar uma grade de trens que reduzisse o tempo total de espera dos passageiros nas estações [24, 25].

2.4

Exemplos de Problemas Ferroviários

Alguns problemas ferroviários mais comuns estão descritos abaixo:

- **Problema de Fluxo de Locomotivas:** tem como objetivo maximizar o atendimento da demanda operacional com o menor custo possível no que tange a composição das locomotivas em cada trem formado. Geralmente estes problemas possuem um pequeno horizonte de planejamento (nível tático) [26, 27];
- **Problema de Fluxo de Vagões:** tem como objetivo determinar o atendimento da demanda maximizando o lucro por meio da distribuição de vagões ao longo da malha ferroviária, definindo as movimentações de cada vagão e a alocação na formação de trens. Este tipo de problema pode ser de nível estratégico, quando avalia cenários considerando diferentes dimensões de frotas; tático, quando analisa os cenários de atendimento de demanda com diferentes composições de trens; ou operacional, ao definir sua rota e como será a anexação e movimentação dos vagões em cada parada prevista para o trem [2];
- **Problema de Elaboração da Grade de Trens:** seu objetivo é determinar o itinerário e os horários de cada composição ao longo da malha ferroviária a fim de maximizar o atendimento da demanda. Trata-se de um problema de nível tático, onde a grade de trens traz informações como horários de chegada e saída por pátio e dias que cada trem é considerado para circulação [28];
- **Problema da Alocação Ótima de Vagões e Locomotivas no Curto Prazo:** o objetivo deste problema é determinar a movimentação dos ativos ferroviários (locomotivas e vagões) a fim de maximizar o retorno obtido pela demanda atendida em determinado período [29];

- **Problema de Equipagem:** este problema tem como objetivo reduzir os custos de contratação através da alocação ótima de maquinistas aos trens, respeitando as regras da legislação trabalhista para o setor e as especificidades da operação ferroviária, de acordo com a posição de cada locomotiva no trem e/ou equipamentos disponíveis [30];
- **Problema de Planejamento no Atendimento:** seu objetivo é definir o atendimento da demanda para um determinado período, considerando aspectos relevantes como a extensão da malha ferroviária, tamanho das frotas, tipos de vagões existentes e disponibilidade de material rodante [2, 31].
- **Problema de Fluxo de Multiproduto:** é tradicionalmente um problema de fluxo em redes de diversos produtos compartilhando um mesmo arco, que podem estabelecer relação de dependência [32, 33].

A utilização de ferramentas de otimização vem se tornando cada vez mais difundida nas ferrovias e alguns problemas possuem ampla abordagem e discussão na literatura, conforme mencionado acima. Entretanto, o mesmo não pode ser observado no âmbito de manutenção da malha, no qual pouco se discute sobre a otimização dos processos e ganhos em eficiência. Os estudos existentes estão focados em priorização da manutenção através de mecanismos de detecção de falhas [34] ou no ganho de produtividade com sequenciamento das atividades [35]. Não há, portanto, nenhum estudo que aborde a logística e distribuição de materiais utilizados para manutenção da via permanente.

3

Descrição do Problema

Neste capítulo será descrito o modelo atual de distribuição de material de uma operadora logística, suas características e os problemas enfrentados neste processo. Além disso, também será apresentada uma sugestão de ajustes no modelo de distribuição a fim de melhorar o fluxo com foco em redução de custos e otimização de recursos.

3.1

A empresa

A empresa objeto de estudo é uma operadora logística que controla grande parte da malha ferroviária da região sudeste do Brasil. A companhia está entre as maiores ferrovias de carga do mundo, com uma produção diversificada em contêineres, siderúrgicos, cimento, bauxita, agrícolas, carvão e minério de ferro. Um grande desafio para as empresas do setor é a gestão eficaz do nível de interferência mútua entre os trens e as comunidades, e a segurança de suas operações.

A empresa divide suas operações em dois níveis de atendimento: carga pesada e carga geral. O primeiro corresponde aos trens de minério, padronizados e extensos. O segundo está relacionado ao atendimento fracionado de uma gama de clientes, com itinerários e horários definidos para movimentação de carga.

O transporte das cargas pode ocorrer com trens unitários ou trens de carga geral. Os trens unitários circulam da origem até o seu destino final sem paradas intermediárias para inclusão ou retirada de mercadorias e são compostos, geralmente, por um único produto de um mesmo cliente. Estes trens circulam sempre carregados até os terminais de descarga e, posteriormente, retornam vazios para os terminais de carga, garantindo o ciclo de atendimento. Já os trens de carga geral são formados por um mix de vagões ou produtos, com diferentes tipos de cargas de diferentes clientes. Devido a esta característica, os trens de carga geral possuem diferentes origens com vários destinos, sendo necessário programar atividades intermediárias, como anexação e retirada de vagões ao longo do percurso.

Atualmente a empresa é composta por seis diretorias: Diretoria de Ope-

rações, Engenharia e Manutenção, Comercial, Financeira, Recursos Humanos e Relações Institucionais. Um dos pilares da empresa é a segurança operacional da malha ferroviária e, para garantir a confiabilidade de seus ativos, a companhia possui uma robusta área de manutenção estratégica composta por: Engenharia, PCM e Execução. A Engenharia é a área responsável por definir normas e técnicas de manutenção que devem ser adotadas pela área de execução na priorização das atividades; ela também é responsável por realizar o controle de confiabilidade dos ativos, estabelecendo os valores de referência necessários para execução da manutenção. A área de PCM (Planejamento e Controle de Manutenção) dimensiona as atividades de manutenção com base na capacidade dos recursos de cada local; para isto, o PCM utiliza como base a priorização das atividades, sequenciamento e demanda fornecidas pela Engenharia. Por fim, a Execução é a área responsável pela realização das atividades de manutenção, seguindo o plano de manutenção construído pelo PCM e realizando as atividades conforme os procedimentos de Engenharia.

3.2

O processo de manutenção

As diretrizes para manutenção são construídas anualmente no orçamento da malha ferroviária com participação das três áreas mencionadas anteriormente além das demais áreas que possuem interface ou são fornecedoras do setor de manutenção. O orçamento é um documento que determina o volume de manutenção por ano considerada para cada local e quais atividades serão realizadas. Seu objetivo é garantir a segurança da linha para que a operação de trens seja realizada de forma segura, sem restrições ou impactos. Este documento é ajustado e desmembrado no Plano Trimestral de Manutenção da Via Permanente, que possui um horizonte de tempo menor que o orçamento e, conseqüentemente, possibilita a maior assertividade dos locais com necessidade de manutenção e o tipo de manutenção a ser realizada. O plano trimestral, também chamado de cronograma de planejamento, determina o escopo diário de manutenção definindo qual a atividade será realizada em cada local. Conforme destacado anteriormente, a priorização da demanda é realizada pela área de Engenharia e Confiabilidade, levando em consideração critérios técnicos e parâmetros de inspeção de equipamentos, que diagnosticam a confiabilidade e geometria da linha.

Para um melhor entendimento do processo de manutenção, é necessário detalhar alguns conceitos presentes na malha ferroviária:

- **Ferrovias:** sistema de transporte baseado em trens correndo sobre os trilhos e podem transportar cargas e/ou passageiros;

- **Malha Ferroviária:** É o conjunto de itens que compõem a via férrea;
- **Pátios:** são locais ao longo da malha ferroviária com duas ou mais linhas cujo objetivo é desviar trens, realizar manobras, realizar carga ou descarga de material;
- **Entre-pátio:** é uma ligação entre dois pátios;
- **Trecho:** é qualquer ligação entre dois pontos da malha, com origem e destino definidos, que podem contemplar pátios e entre-pátios;
- **Locomotivas:** são veículos ferroviários que fornecem a energia necessária para movimentação de um trem;
- **Vagões:** também são veículos ferroviários com o propósito de transporte de cargas, objetos, animais ou pessoas;
- **Trem:** é definido pelo conjunto de locomotivas e vagões associados com uma rota definida. Durante a formação de um trem, ele é associado a uma rota e, conseqüentemente, fica restrito a este trajeto, não sendo possível circular por rotas alternativas;
- **Dormentes:** são peças colocadas transversalmente aos trilhos férreos com o objetivo de garantir a bitola da via (distância entre os trilhos), transmitindo os esforços do trilho para o lastro. Os dormentes geralmente são compostos por madeira, mas também podem ser de aço, concreto ou polímero;
- **Aparelho de Mudança de Via:** Os aparelhos de mudanças de via (AMV) são responsáveis por permitir que um trem circule de uma linha para outra. Eles são compostos basicamente por Meia Chaves, Jacarés e Contra-trilhos;
- **Contra-trilho:** É um pedaço de trilho colocado lateralmente ao trilho interno da via principal. Sua função é servir de guia para as rodas do trem, assegurando a passagem correta das rodas opostas pelo jacaré;
- **Jacaré:** Parte principal do AMV, o jacaré permite às rodas dos veículos ferroviários passar de uma via para os trilhos da outra. Esta peça desgastam-se muito mais do que qualquer outro componente da ferrovia e sua composição é de aço de alto carbono;
- **Meia Chave:** É um dos componentes do AMV, cuja função é variar a direção dos veículos. Composta por agulha, trilho de encosto de agulha, escoras laterais, placas de apoio bitoladora e de deslizamento, barra de conjugação e aparelho de manobra. É comum a subdivisão em meia chave direita e meia chave esquerda;

- **Vigotas:** As vigotas são dormentes com dimensões maiores (variando entre 3,0 e 5,4 metros), aplicadas em região de AMV's;
- **Demanda:** É a necessidade de manutenção definida para ser realizada trimestralmente pelas equipes de manutenção da via permanente;
- **PCM:** Área responsável pelo Planejamento e Controle da Manutenção, desdobrada nos seguintes setores: Malha Ferroviária, Material Rodante, Produtividade e Inovação e Materiais. O setor de PCM Malha é responsável pela construção do Plano de Manutenção;
- **Coordenação de Via:** Corresponde a divisões da malha ferroviária em trechos menores para facilitar o controle das equipes de manutenção e garantir a confiabilidade dos ativos. Ao todo a empresa possui 20 coordenações distribuídas em 3 estados;
- **Estaleiro de Soldas:** É o local responsável por realizar a soldagem de trilhos longos (240 metros) e meia chaves, com o objetivo de garantir que os itens estejam dentro das especificações para aplicação na ferrovia. Este local também prepara os trilhos utilizados na fabricação de meia chaves, contra-trilhos e jacarés para envio ao fornecedor;
- **Almoxarifado:** Local para armazenamento dos materiais de manutenção até a necessidade de uso. A empresa estudada possui três almoxarifados, sendo um por cada estado, devido a características específicas de tributação.

3.3

Processo atual de distribuição de materiais

Para que a manutenção seja realizada conforme o planejamento, é necessário que os materiais de manutenção sejam entregues no local de destino dentro do prazo estipulado. O processo logístico para a distribuição de materiais é um tema que vem sendo amplamente discutido pela empresa, que busca otimizar seus processos para potencializar suas atividades com foco em eficiência. É importante que este processo esteja alinhado para que não haja falha no planejamento, programando uma equipe para execução da atividade sem que todos os materiais necessários já estejam posicionados no local.

Atualmente, na empresa analisada, a logística de distribuição dos materiais acontece de forma híbrida, utilizando tanto o transporte rodoviário quanto o ferroviário. O transporte ferroviário ainda apresenta uma parcela bem pequena do processo de distribuição, uma vez que é utilizado apenas para transportar os materiais do pátio de cada coordenação de via até os locais de manutenção; este processo é chamado de posicionamento e fica a cargo da própria coordenação.

Todas as etapas anteriores ao posicionamento, com início no fornecedor até a entrega do material no pátio, são realizadas por rodovia. A logística da distribuição de materiais possui especificidades que variam de acordo com o tipo de material transportado, conforme apresentado na Figura 3.1. Para distribuição de dormentes, por exemplo, o fornecedor entrega os materiais nas coordenadas de via. No caso da distribuição de vigotas, o fornecedor transporta os materiais até os almoxarifados, e para peças de AMV, o fornecedor realiza a logística até o Estaleiro de Soldas. A necessidade de todas as peças de AMV passarem pelo Estaleiro é uma questão tributária, necessária no processo de distribuição de materiais. Dessa forma, tanto no caso da distribuição de vigotas quanto a de peças de AMV, fica sob responsabilidade da própria empresa a logística para a entrega dos materiais. Embora realizada pela empresa, esta etapa do processo ocorre por rodovia e tem como objetivo transportar os itens de manutenção dos almoxarifados ou do Estaleiro de Soldas até às coordenadas de via.

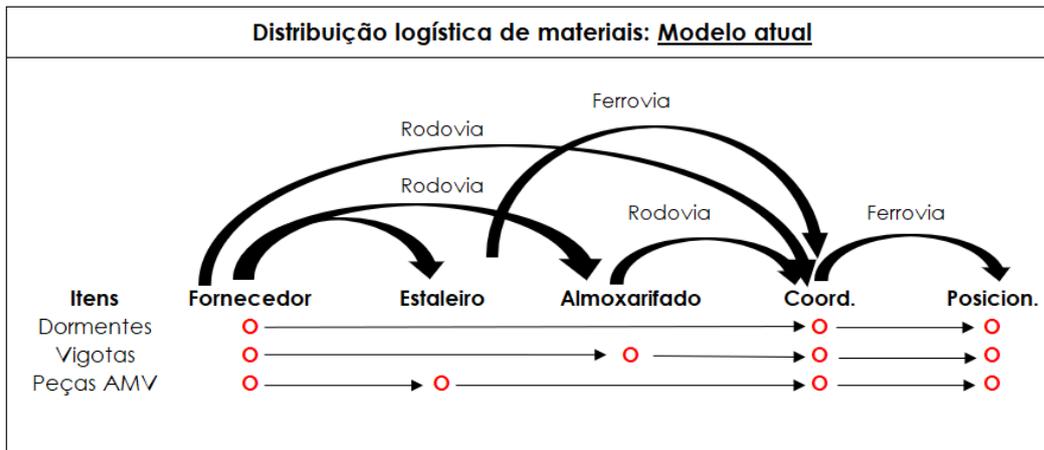


Figura 3.1: Modelo Esquemático Atual da Distribuição de Materiais

Conforme mencionado anteriormente, o modo utilizado para distribuição dos materiais ainda é muito dependente do transporte rodoviário. Isto incrementa os custos de manutenção e, muitas vezes, está regido pelas limitações e características das rodovias. Em resumo, o processo atual acontece de maneira fragmentada, sem padrão no planejamento demandado e envolve alto volume de recursos necessários (equipagem, locomotivas e vagões).

Outro fator que merece destaque no processo é a restrição de capacidade de transporte das carretas. Isto aumenta o número de viagens necessárias para atendimento dado o volume significativo de material transportado e a grande quantidade de destinos. A Figura 3.2 ilustra a distribuição da malha ferroviária, que possui 20 coordenadas de via, 3 almoxarifados (em vermelho) e uma extensão superior a 1.600 km. A restrição de capacidade engessa o modelo

de manutenção, pois algumas atividades críticas emergenciais não podem ser realizadas devido à falta do material na coordenação.

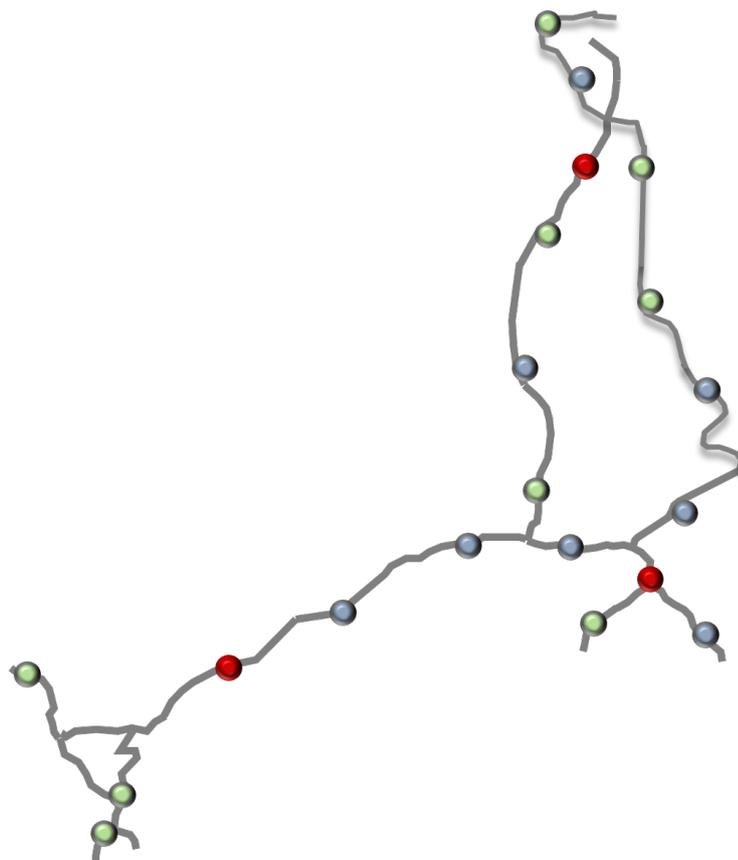


Figura 3.2: Mapa Esquemático Atual da Distribuição das Coordenações ao longo da malha ferroviária

No que tange a etapa do processo realizada por ferrovia, a logística descentralizada requer um trem (formado por uma locomotiva e três vagões) para cada uma das vinte coordenações, ou seja, são necessárias 20 locomotivas e 60 vagões para compor a frota de posicionamento de materiais nas coordenações. Este alto dimensionamento de recursos, muitas vezes, não está alinhado de forma estratégica, e atividades de rotina da coordenação acarretam em atrasos no posicionamento e, conseqüentemente, na postergação de manutenção em determinados locais.

Todas essas características e particularidades apresentadas dificultam o planejamento de manutenção, o sequenciamento das atividades e, conseqüentemente, elevam os custos de manutenção. Como uma alternativa para reduzir e/ou eliminar os problemas encontrados no processo, a proposta de um novo modelo de distribuição é baseada no transporte ferroviário. Este novo modelo propõe que a distribuição dos materiais seja realizada de uma forma otimizada, com redução de recursos e ganho de produtividade além de melhorar a efici-

ência logística, auxiliando na redução dos custos operacionais de distribuição e posicionamento de materiais para a manutenção da via.

3.4

Processo proposto de distribuição de materiais

O novo modelo proposto sugere que a logística de material dos fornecedores seja feita até os almoxarifados, e não mais até as coordenações. Assim, o transporte dos itens de manutenção a partir dos almoxarifados passa a ser responsabilidade da própria empresa. Dessa forma, o atendimento da demanda poderá ser sequenciado por meio da geração de trens, que sairão carregados dos almoxarifados (origem) e serão descarregados nos pontos de manutenção (destinos) ao longo da malha ferroviária. Após a descarga completa, o trem retorna ao almoxarifado para dar sequência ao ciclo de distribuição, priorizando os locais, conforme modelo de otimização, conforme Figura 3.3. Esta alteração reduz expressivamente a demanda por locomotivas e vagões, passando de 20 locomotivas e 60 vagões necessários no processo atual para 6 locomotivas e 18 vagões no modelo sugerido, ou seja, será necessário um trem por almoxarifado e não mais um trem por coordenação.

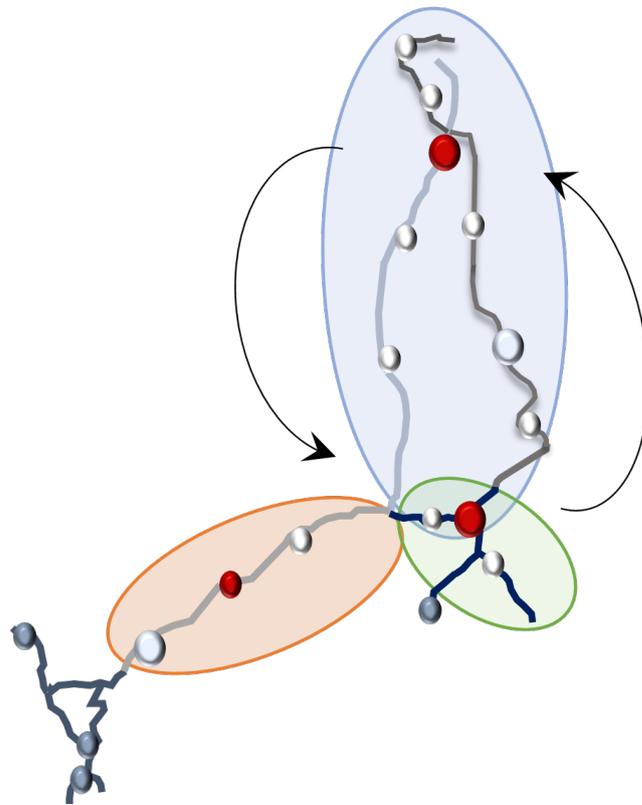


Figura 3.3: Mapa Esquemático Proposto da Distribuição das Coordenações ao longo da malha ferroviária

Este modelo de priorização e sequenciamento está alinhado com o cronograma de entrega dos materiais, respeitando a data de entrega dos itens em um prazo de, no mínimo, 15 dias de antecedência à data de aplicação. Esta é uma importante premissa do modelo devido a necessidade de aplicação do item de manutenção na data especificada pela área técnica.

É possível observar que o novo modelo proposto, apresentado na Figura 3.4, reduz significativamente os agentes intermediários do processo, uma vez que concentra a entrega dos fornecedores direto nos almoxarifados e, a partir de então é desenhada a melhor rota logística para a entrega dos materiais sob gestão da própria empresa. Dessa forma, espera-se que este modelo permita a redução dos custos totais do processo por meio da otimização dos recursos utilizados ao longo de toda a cadeia.

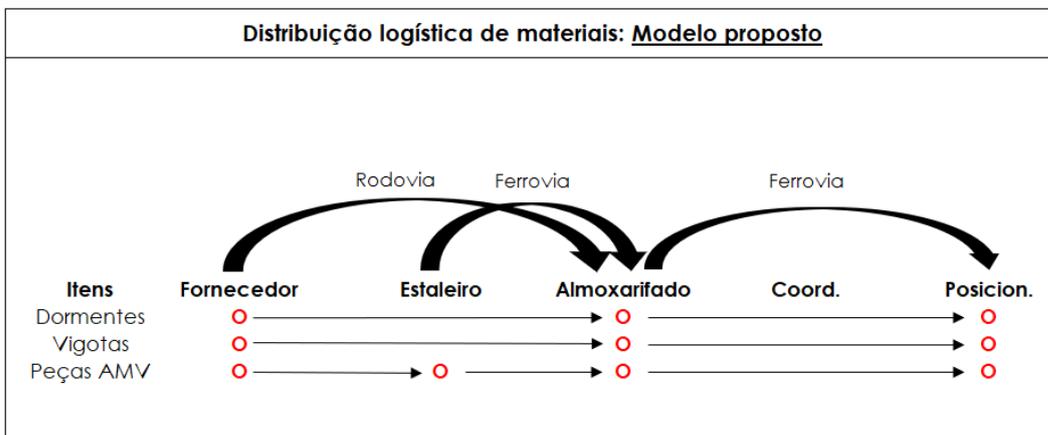


Figura 3.4: Modelo Esquemático Proposto da Distribuição de Materiais

4

Formulação Matemática

Com base nos problemas apresentados no capítulo anterior, no que tange ao processo de distribuição de materiais para manutenção ferroviária, este capítulo irá detalhar a construção da formulação matemática, cuja finalidade é de analisar a viabilidade do modelo proposto e realizar o comparativo com o modelo atual.

O problema a ser formulado tem por objetivo minimizar o custo logístico no transporte de material por meio do atendimento da demanda através da ferrovia. Este problema leva em consideração os custos de trens carregados assim como o custo da tara dos trens vazios, a distância percorrida pelos trens e a quantidade de carga transportada em determinado trecho.

O desafio da formulação está em apresentar um modelo que atenda a demanda de cada item para um determinado local, por meio de trens de serviço que otimizem as paradas dentro de uma rota logística pré-definida pelo fluxo operacional da malha ferroviária. Dessa forma, o objetivo do modelo é minimizar o custo total de transporte através do sequenciamento da demanda para cada local.

Inicialmente, para a construção do modelo, alguns parâmetros foram determinados como, por exemplo, a capacidade máxima de transporte de um trem (Q). Na construção do modelo foi definido um tamanho padrão para os trens de distribuição, compostos por 2 locomotivas e 6 vagões. Isto garante que a capacidade máxima de transporte de cada trem é a mesma, ou seja, possui um valor fixo determinado.

Uma das decisões do modelo é sobre quantos trens serão utilizados para realizar a entrega dos materiais em sua totalidade. Entretanto, na modelagem do problema, optou-se por utilizar o mesmo trem realizando diversas entregas. Isto se faz possível uma vez que a entrega dos materiais é realizada com antecedência, respeitando o cronograma e sem assumir atrasos na aplicação dos materiais. Por se tratar de um problema de nível tático, considera-se que os trens realizam as entregas dentro do prazo mínimo estipulado pelo processo, ou seja, 15 dias antes da aplicação, e que todas as entregas são realizadas dentro de suas respectivas demandas de manutenção.

O problema é modelado como um problema de Programação Inteira-

Mista (MIP) com base em um modelo de fluxo com múltiplos produtos. Para isso, foram adicionadas algumas restrições visando garantir a conservação do fluxo de demanda e do fluxo de trens e atingir uma maior proximidade com o problema real encontrado pela empresa.

Seja I o conjunto de itens a serem atendidos, P o conjunto de pontos da malha e T o conjunto de trechos, arcos orientados de um grafo que ligam estes pontos (formando origem e destino). Baseando-se no modelo de fluxo com múltiplos produtos, as primeiras variáveis criadas são os fluxos de demanda f_{ti} , que indicam a quantidade de cada item i que passa no trecho t da malha. As primeiras restrições, compostas por estas variáveis, determinam que, dado um ponto p da malha ferroviária que não representa nem uma origem e nem um destino da demanda, a quantidade do item que entra naquele ponto deve ser igual a quantidade do item que sai pelo mesmo ponto. Esta característica indica a conservação do fluxo de demanda, ou seja, só haverá alteração caso o ponto p em questão seja um ponto de destino. Sabe-se também que a diferença existente entre a quantidade de fluxo que entra no ponto $\delta^+(p)$ e a quantidade de fluxo que sai do mesmo ponto $\delta^-(p)$ é a quantidade de demandada q_{pi} do item i em um determinado ponto p . É importante destacar que estas restrições de fluxo não são aplicadas para o almoxarifado, representado no modelo como o ponto $p = 0$. Com isto, surgem as primeiras restrições do problema:

$$\sum_{t \in \delta^+(p)} f_{ti} - \sum_{t \in \delta^-(p)} f_{ti} = q_{pi} \quad \forall p \in P \setminus \{0\}, i \in I \quad (4-1)$$

Como um desdobramento do primeiro conjunto de restrições, é necessário definir novas restrições que limitem o volume do fluxo de demanda que sai do almoxarifado ($p = 0$) a quantidade demandada para todos os pontos de atendimento p ao longo da malha. Isto garante que não seja atendida uma quantidade maior de um determinado item do que a necessidade para aquele ponto p .

$$\sum_{t \in \delta^-(0)} f_{ti} = \sum_{p \in P} q_{pi} \quad \forall i \in I \quad (4-2)$$

Embora as restrições apresentadas até o momento garantam a conservação de fluxo de demanda, elas não garantem os fluxos dos trens, sejam eles carregados ou vazios. Dessa forma, faz-se necessária a criação de outras restrições para garantir este fluxo. Com base neste problema, as variáveis x_t são criadas, representando a quantidade de trens que passam pelo trecho t . Além

disso, estas variáveis, que possuem valores positivos ou iguais a zero, não diferenciam se os trens estão carregados ou vazios, podendo representar ambos. É importante destacar que os trens devem sempre ficar em trânsito, ou seja, se um trem entra em determinado trecho, ele também deve sair deste trecho. Logo, a diferença de trens para um mesmo ponto p pertencente ao trecho t sempre deve ser nula, indicando a circulação operacional dos trens nos respectivos trechos.

$$\sum_{t \in \delta^+(p)} x_t - \sum_{t \in \delta^-(p)} x_t = 0 \quad \forall p \in P \quad (4-3)$$

Todas as restrições descritas acima servem apenas para definir as características dos fluxos, seja de demanda ou de trens, presentes no modelo. Entretanto, elas não limitam a capacidade de um trem. Cada trem possui uma capacidade máxima, em toneladas, que indica o peso total máximo permitido de carga para este trem (Q). Sendo assim, o volume do fluxo de demanda dos itens no trecho t deve ser limitado a esta capacidade máxima. Vale lembrar que se o trecho não é um trecho viável para este trem, seu valor de demanda será nulo.

$$\sum_{i \in I} f_{ti} \leq Qx_t \quad \forall t \in T \quad (4-4)$$

Com todas as restrições definidas, a formulação da função objetivo necessita apenas da definição dos custos para ser criada. Os custos existentes estão relacionados com o custo de transporte (c) por quantidade (em toneladas) e distância (em quilômetros), que varia conforme o consumo do diesel pelas locomotivas de tração de um trem, e com o custo de tara (γ) do mesmo trem por quilômetro percorrido, isto é, o custo de transporte de um trem vazio, considerando os custos de maquinista, operador e o próprio peso do trem. A função objetivo minimiza o custo total composto pelo custo do transporte dos itens mais o custo de tara de um trem. Dessa forma, obtém-se a formulação completa do problema, conforme detalhado abaixo:

Conjuntos:

- I : conjunto de itens.
- P : conjunto de pontos.
- T : conjunto de trechos.

Parâmetros:

- d_t : distância (km) do trecho t .
- c : custo de transporte por unidade (ton) e distância (km) de um trem.
- γ : custo de tara (vazio) por distância (km) de um trem.
- Q : capacidade máxima de transporte (ton).
- q_{pi} : quantidade (ton) demandada do item i no ponto p .

Variáveis:

- $f_{ti} \geq 0$: quantidade do item i passando no trecho t .
- $x_t \geq 0$: quantidade de trens que passam no trecho t .

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} c d_t f_{ti} + \sum_{t \in T} \gamma d_t x_t \quad (4-5)$$

sujeito a:

$$\sum_{t \in \delta^+(p)} f_{ti} - \sum_{t \in \delta^-(p)} f_{ti} = q_{pi} \quad \forall p \in P \setminus \{0\}, i \in I \quad (4-6)$$

$$\sum_{t \in \delta^-(0)} f_{ti} = \sum_{p \in P} q_{pi} \quad \forall i \in I \quad (4-7)$$

$$\sum_{t \in \delta^+(p)} x_t - \sum_{t \in \delta^-(p)} x_t = 0 \quad \forall p \in P \quad (4-8)$$

$$\sum_{i \in I} f_{ti} \leq Q x_t \quad \forall t \in T \quad (4-9)$$

$$f_{ti} \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in I \quad (4-10)$$

$$x_t \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall t \in T \quad (4-11)$$

Por fim, as restrições (4-10) e (4-11) são os domínios das variáveis f_{ti} e x_t .

Inicialmente, o modelo desenvolvido contava com o conjunto K , que representava o conjunto de trens, e os testes foram realizados para um dos almoxarifados existentes. Entretanto, devido ao parâmetro de capacidade dos trens serem iguais, o modelo apresentou uma simetria, ficando em execução por várias horas sem obter a solução ótima. Foi necessário, então, incluir um temporizador no modelo, limitando o tempo de execução do teste. Os resultados apresentados, mesmo com o temporizador, se mostraram satisfatórios, com um *gap* de baixa significância. Porém, como o modelo prevê a padronização do tamanho dos trens, não há necessidade da inclusão do conjunto K .

Com a remoção do índice k na formulação, não é mais possível determinar a quantidade de cada item que será levada por um determinado trem.

Entretanto, entende-se que isto não será um problema, visto que a análise abordada neste estudo é baseada no nível tático e não no operacional. Além disso, como mencionado anteriormente, as entregas são realizadas com antecedência, respeitando o cronograma de aplicação dos itens e, portanto, parte-se do princípio de que todo o atendimento da demanda para cada ponto p será realizado com até 15 dias de antecedência à data de aplicação.

É relevante destacar também que, para os casos em que o dimensionamento dos trens não é padronizado, ou seja, casos em que os trens possuem diferentes capacidades, ainda sim é recomendável que o índice K seja criado para cada tipo de trem e não para cada trem individual, novamente para evitar a simetria. Isto ocorre pois, nestes casos, importa a ordem de escolha de qual trem entrará em rota de entrega primeiro.

5 Resultados Experimentais

Neste capítulo serão abordados os resultados computacionais utilizando o modelo matemático definido no capítulo anterior. Com base nessas informações, serão analisados alguns indicadores que possibilitarão o comparativo entre o modelo atual e o modelo proposto.

5.1 Definição de Parâmetros

Para a realização dos testes experimentais de implementação do modelo, foi utilizada a base de dados do Plano Trimestral de Via. Esta base fornece diversos parâmetros para a execução das atividades como, por exemplo, os locais de manutenção e sua quilometragem, qual atividade será realizada em cada local, a quantidade de itens substituídos ou aplicados naquele determinado local (em unidades), a data de realização de cada atividade e a coordenação responsável pela execução.

Através das informações presentes na base de dados do Plano Trimestral, foi possível definir os parâmetros utilizados no modelo: a quantidade (em toneladas) de demanda para determinado local, a distância entre os diversos locais de manutenção mapeados para o trimestre e qual almoxarifado é responsável por atender os itens de manutenção em cada local. Isto possibilita segregar os dados conforme atendimento e avaliar individualmente cada almoxarifado, visto que a estratégia de manutenção para distribuição dos materiais ocorrem de maneira independente, ou seja, cada almoxarifado possui uma região de atendimento que não pode ser alterada. Os parâmetros de custos foram gerados pela média do último ano e a capacidade máxima de transporte foi calculada com base na composição sugerida de cada trem de distribuição de materiais; como cada trem possui 6 vagões, sua capacidade máxima de transporte é de 90 toneladas.

Atualmente a empresa possui três almoxarifados, cada um localizado em um estado de atuação (Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo). Os almoxarifados são locais destinados para alocação e conservação dos itens de manutenção até que exista a necessidade de utilização. Os testes foram realizados nos três almoxarifados existentes e em quatro períodos, que correspondem a

cada um dos trimestres de 2020, totalizando assim 12 experimentos. A divisão por almoxarifados e períodos contribuem para as análises do modelo e interpretação dos resultados, pois consideram as particularidades de cada local.

O almoxarifado que possui maior representatividade de demanda é o de Minas Gerais. Ele atende a 7 coordenações de via, que correspondem a 45% de todo o volume de material demandado para a manutenção da malha. Os almoxarifados do Rio e São Paulo correspondem a 33% e 22% do volume transportado, respectivamente, sendo que o primeiro atende a 7 coordenações e o segundo a 6.

Outro fator que merece destaque é a sazonalidade do modelo de manutenção ao longo do ano. Devido ao volume de produção ser menor em períodos chuvosos, a área de operação concede à manutenção mais dias de intervalos para realização das atividades. Dessa forma, o volume de manutenção planejado para o 1º Trimestre corresponde a 30% do volume anual, enquanto que os demais trimestres representam 25%, 25% e 20%, respectivamente. Esta proporção influencia diretamente no volume de material transportado e, conseqüentemente, nos custos logísticos para a realização desta atividade.

5.2

Características do modelo matemático

O modelo matemático foi implementado utilizando a linguagem de programação Julia, rodando o *solver* da biblioteca Gurobi com licença acadêmica, utilizando as configurações padrões. O computador utilizado possui um processador Intel Core i5 1,80GHz e 8GB de memória RAM, com um sistema operacional Windows 10 de 64 bits. O software Julia gerou um modelo de Programação Inteira Mista (MIP) com soluções ótimas para cada período analisado em cada um dos três almoxarifados.

Os resultados foram obtidos com menos de 0,05 segundos para os 12 períodos analisados (4 trimestres de 2020 para cada um dos 3 almoxarifados) provando a otimalidade da solução. Os resultados referentes à quantidade de variáveis e restrições por período estão compreendidos na Tabela 5.1. Após a obtenção dos resultados, é interessante observar que houve uma redução significativa dos tempos de processamento obtidos pelo modelo atual, se comparado ao modelo anterior que possuía o conjunto K . A eliminação deste conjunto resultou também na resolução do problema de simetria da solução, obtendo a solução ótima em um tempo muito pequeno.

Os períodos analisados possuem algumas características distintas, seja pelo almoxarifado de atendimento, o trimestre analisado ou a dispersão dos pontos de demanda. De forma a permitir que os resultados sejam comparáveis,

Período	Variáveis	V. Inteiras	Restrições
1	344	199	51.426
2	320	183	58.796
3	413	239	84.124
4	384	223	73.020
5	400	266	72.620
6	352	234	59.282
7	391	260	69.422
8	340	226	52.660
9	223	148	22.942
10	259	172	32.932
11	223	148	22.942
12	208	138	20.012

Tabela 5.1: Resultados experimentais dos testes

foi criado o indicador de custo por volume transportado. Este indicador permite analisar quanto custa, em determinado período, transportar uma tonelada de material. O almoxarifado com o menor custo de transporte é o de São Paulo, em média 24% mais barato que o almoxarifado de Minas Gerais. Um dos fatores que justifica a redução dos custos em São Paulo é devido à característica de circulação do trecho, que não possui fluxo único como no almoxarifado de Minas Gerais. Além disso, a quantidade de pontos de descarga nas coordenções de São Paulo é 67% menor em relação ao almoxarifado do Rio de Janeiro e 50% menor em relação ao de Minas Gerais, ou seja, serão realizadas menos paradas para descarregar material. Por motivos de confiabilidade dos dados, a tabela 5.2 apresenta os valores de distribuição por trimestre e por almoxarifado, considerando um coeficiente de normalização, que representa a unidade padrão de reais por tonelada transportada. Isto significa, por exemplo, que o custo de transporte por tonelada em 2020 no almoxarifado do Rio de Janeiro foi 7% maior se comparado com o almoxarifado de São Paulo.

Almoxarifado	1º Trim.	2º Trim.	3º Trim.	4º Trim.	2020
Minas Gerais	22	33	47	23	124
Rio de Janeiro	37	35	22	13	107
São Paulo	22	39	22	17	100

Tabela 5.2: Custo do transporte por tonelada de material transportado

5.3

Análise do indicador: Quantidade de trens

O próximo indicador a ser observado é a quantidade de trens necessários para fazer o transporte de material em cada almoxarifado. O número de trens é diretamente proporcional ao volume de material transportado, mas também é

a variável que mais influencia nos custos com a operação do processo logístico, pois quanto mais trens utilizados, mais recursos são demandados. Por ser o almoxarifado com o menor volume de demanda, São Paulo é também o almoxarifado com o menor número de trens, com média de 12,75 trens por trimestre. O almoxarifado do Rio de Janeiro é o segundo menor, com média de 15,75 trens, enquanto que o almoxarifado de Minas Gerais possui média quase duas vezes maior, com 28,5 trens.

No que tange ao comparativo dos resultados obtidos no modelo com o processo atual de distribuição de material, foram utilizados outros dois indicadores: custo de distribuição por coordenação e custo total de distribuição. A análise dos resultados foi realizada para cada almoxarifado a fim de considerar suas particularidades e características de circulação e demanda.

5.4

Análise do indicador: Custo de Distribuição por coordenação

O primeiro indicador analisa quanto custa, em média, distribuir o material nos locais de demanda de uma determinada coordenação de via. Em geral, este indicador é diretamente proporcional à distância percorrida, ou seja, quanto mais próxima uma coordenação está do almoxarifado, menores seus custos de distribuição. Desta forma, este indicador precisa ser analisado trimestralmente com base na demanda referente àquele período, uma vez que a demanda varia por período conforme necessidade de manutenção de cada local. Outro fator que interfere no indicador é como a demanda está disposta ao longo do trecho de sua respectiva coordenação: quanto mais concentrada for a demanda, serão realizadas menos paradas e, conseqüentemente, os respectivos custos serão minimizados. O modelo mostra que houve redução dos custos, em todas as 20 coordenações analisadas, variando conforme os gráficos 5.1, 5.2 e 5.3.

5.5

Análise do indicador: Custo Total de Distribuição

Outro indicador analisado é o Custo Total de Distribuição. Ele mede o valor total gasto para realizar a distribuição de todo o material. Por meio deste indicador é possível calcular o percentual de redução do modelo proposto em relação ao modelo atual, através da comparação de todos os custos envolvidos no processo logístico de distribuição de material. O primeiro fator que contribui para a redução de custos é a nova configuração do dimensionamento de trens. No modelo atual, cada uma das 20 coordenações de via possui um trem para posicionamento de material composto por 1 locomotiva e 3 vagões, enquanto

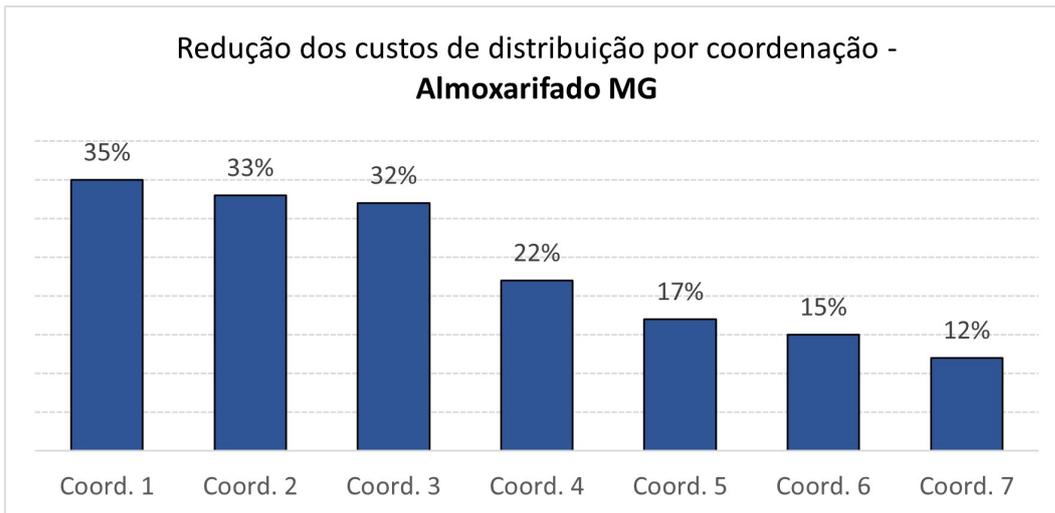


Figura 5.1: Redução dos custos de distribuição para as coordenações do almoxarifado MG

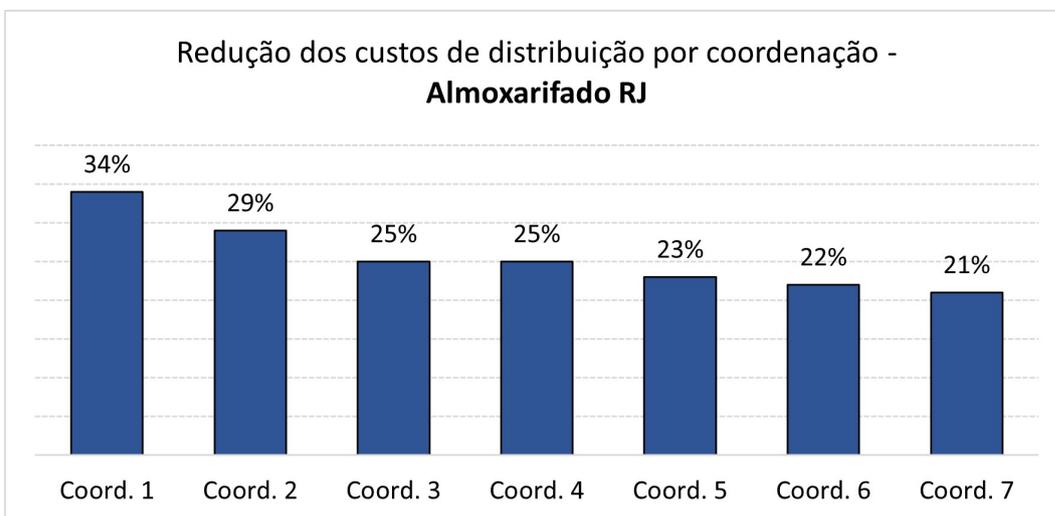


Figura 5.2: Redução dos custos de distribuição para as coordenações do almoxarifado RJ

que, no modelo proposto, haverá apenas um trem por almoxarifado formado por 2 locomotivas e 6 vagões; a utilização destes ativos reduziu em 71% nos almoxarifados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro e 67% em São Paulo. Outro fator que também contribuiu para a redução dos custos no modelo atual foi a eliminação do transporte rodoviário dos almoxarifados até às coordenações de via. Conforme mencionado anteriormente, atualmente, parte do processo é terceirizada e a entrega é realizada por rodovia. Esta etapa do processo representa uma parcela significativa nos custos totais e foi eliminada por meio da utilização de trens de distribuição que realizam o transporte desde o almoxarifado até o local exato da descarga do material. O gráfico 5.4 ilustra a redução por custos em cada almoxarifado e o cálculo da média de redução

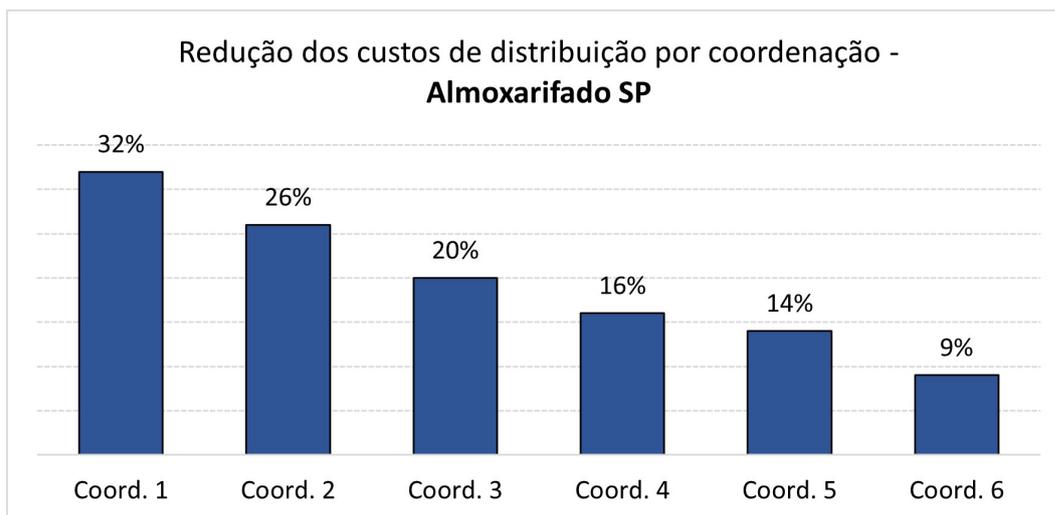


Figura 5.3: Redução dos custos de distribuição para as coordenações do almojarifado SP

para o processo na empresa.

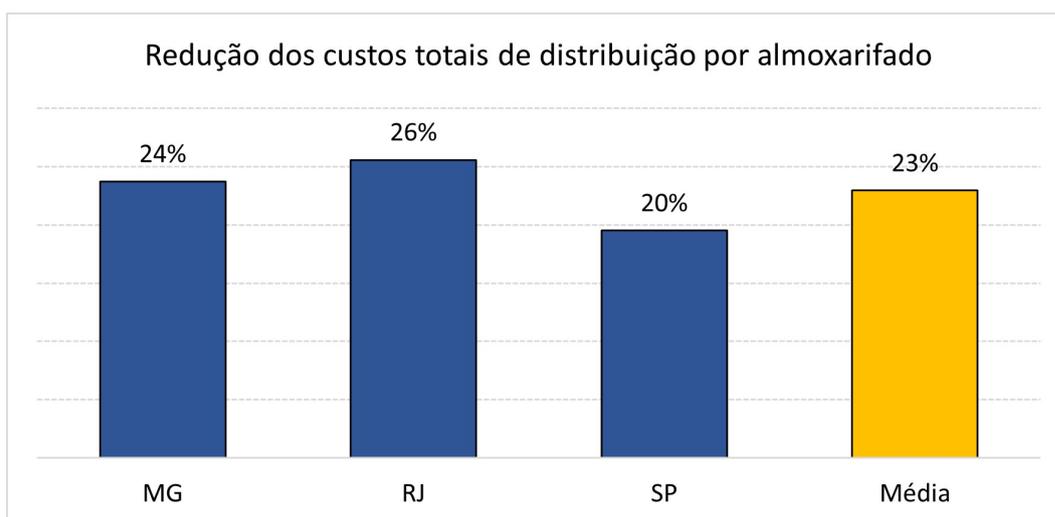


Figura 5.4: Redução dos custos totais de distribuição por almojarifado

Com base no indicador de Custos Totais de Distribuição é possível observar que os custos tiveram uma redução igual ou acima de 20% em todos os almojarifados da empresa considerando o novo modelo de distribuição, chegando a 26% de redução no almojarifado do Rio de Janeiro. A redução se torna mais significativa sob a ótica dos altos custos logísticos empregados no processo de distribuição de material.

5.6

Resultados qualitativos e a visão estratégica do processo

Além dos resultados quantitativos, é preciso analisar o modelo também por uma ótica qualitativa. A redução na utilização de locomotivas e vagões

para a distribuição de materiais é um ganho significativo para a área de Planejamento e Controle de Operações (PCO), uma vez que estes recursos poderão ser integrados à operação de transporte de cargas. Este ganho se torna ainda mais evidente no cenário atual da empresa, com a expansão de suas operações e um aumento significativo do volume a ser transportado no próximo ano.

Outro ganho qualitativo importante para o processo é a eliminação da etapa de transporte rodoviário, que é terceirizada no processo atual. Conforme destacado anteriormente, o transporte por rodovia corresponde a uma parcela significativa dos custos logísticos de distribuição e grande parte das perdas está associada a esta etapa, devido a má conservação das rodovias nacionais ou à dificuldade no acesso rodoviário aos locais de de manutenção ao longo da ferrovia. Ao eliminar esta etapa, os impactos de fatores externos no processo são minimizados.

Os ganhos de processo poderão ser observados principalmente nas áreas de manutenção. A maior previsibilidade na entrega dos materiais permite ao PCM otimizar o planejamento da manutenção, garantindo uma distribuição eficiente de recursos, equipes e equipamentos. Como consequência, os ganhos também são observados na área de Execução, com o atendimento do material ocorrendo na data prevista, sem necessidade de reprogramações de atividades e perdas.

Por fim, o modelo proposto surge como uma alternativa eficiente para minimizar os riscos apresentados no modelo atual e melhorar a logística de distribuição dos materiais. Sua principal característica é a centralização das entregas e utilização do modal ferroviário para a logística dos itens de manutenção. Isto permite reduzir custos e aumentar a eficiência do processo, garantindo maior produtividade e utilização otimizada dos recursos. Do ponto de vista do planejamento de manutenção, o novo modelo possibilita uma maior assertividade no atendimento de materiais atuando nos locais prioritários, conforme necessidade de manutenção prevista. Outro benefício que merece destaque é a redução dos desvios no processo relacionados aos atrasos na entrega do material pelos fretes rodoviários e a ineficiência de uma gestão descentralizada para atendimento da manutenção.

5.7

Implementação do modelo

Após a construção e análise sistemática do modelo, considerando os ganhos quantitativos e qualitativos do processo, a empresa iniciou a implementação do projeto. Por se tratar de um modelo com visão tática, o teste de

viabilidade ocorrerá por meio de um projeto piloto, que permitirá analisar também as especificidades do nível operacional do processo. Dessa forma, o almoxarifado escolhido para a realização dos testes foi o da região de São Paulo. A escolha deste almoxarifado está atrelada ao menor volume de manutenção da região, o que reduz o volume de material transportado e a complexidade do processo. Até a conclusão deste trabalho, o projeto piloto ainda estava em execução, o que não permitiu realizar as análises e conclusões do processo a nível operacional.

6

Conclusão

Este trabalho discutiu o problema de planejamento da distribuição de materiais em uma malha ferroviária e apresentou um modelo de formulação matemática para sua resolução, capaz de consolidar ganhos significativos ao processo.

A implementação de um modelo de otimização que aumente a eficiência do processo e reduza seus custos é fundamental para a competitividade da empresa no setor. Através do modelo, foi possível obter soluções ótimas que minimizam os custos logísticos deste processo. Em uma análise simplificada comparando os dois modelos, é possível observar que o modelo proposto possui custo de distribuição cerca de 23% menor.

No modelo atual de distribuição, o processo ocorre de maneira fragmentada, com vários intermediários envolvidos na distribuição, desde o fornecedor até as coordenações de via. Um dos fatores de maior relevância no processo atual é buscar a redução dos conflitos na malha com os trens de carga por meio da descentralização da entrega de materiais. A alta ocupação da malha pode ocasionar em atrasos no transporte de cargas dos clientes, que são a prioridade de qualquer operadora logística. Por outro lado, a falta de padronização no planejamento e a descentralização da entrega requer um grande volume de recursos para a realização das atividades como maior número de maquinistas, locomotivas e vagões. Além disso, a grande dependência do meio rodoviário para realizar a distribuição, eleva os custos e absorve mais falhas no processo, por considerar um maior número de agentes externos em um processo crítico e de grande relevância para a empresa.

A proposta de um novo formato de distribuição utilizando o meio ferroviário permite reduzir os riscos do processo apresentados anteriormente. A principal característica do modelo é a centralização da distribuição com a utilização do modal ferroviário para a logística dos itens de manutenção. Isto permite aumentar a eficiência do processo por meio da utilização dos recursos de forma otimizada e estruturada e eliminação do frete rodoviário. Além disso, o modelo proposto permite a gestão de recursos e facilita a tomada de decisões considerando a avaliação global do processo e não mais decisões locais.

Os resultados do estudo foram satisfatórios, considerando o limite de

escopo, as premissas assumidas e a qualidade dos dados disponibilizados. O modelo matemático construído realizou a alocação dos itens de manutenção conforme a quantidade demandada para cada local, respeitando a capacidade dos trens com objetivo de minimizar o custo logístico para distribuição dos materiais em determinado período. O novo modelo apresentou redução nos custos em todas as 20 coordenações de manutenção de via da empresa, sendo mais significativo nas coordenações próximas aos almoxarifados, com percentual de redução variando entre 9 e 35%. Além disso, outro indicador relevante é o que compara os custos totais de distribuição nos dois processos, projetando uma eficiência em custos de, aproximadamente, 23% em todo o sistema.

A principal contribuição deste estudo é abordar uma nova visão de distribuição dos materiais de manutenção da malha, utilizando o transporte ferroviário sem interferência significativa no fluxo dos trens de carga. Na maioria dos casos, este processo logístico é realizado com meio rodoviário justamente para evitar os riscos de conflitos com a operação de trens. Acredita-se que o modelo desenvolvido possa ser aplicado para otimização logística em diversas empresas do setor ferroviário.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do escopo do trabalho para avaliar os impactos financeiros das decisões relacionadas aos diferentes níveis de planejamento, principalmente no nível operacional do processo. Isto resultará na definição de um fluxo consolidado de distribuição de material, visto que o nível tático já foi avaliado neste trabalho. Além disso, existe também a possibilidade de utilizar o modelo para casos maiores e de maior complexidade, com informações mais detalhadas e com integração de outros planejamentos uma vez que o tempo de processamento para os casos analisados neste estudo se mostraram razoavelmente pequenos.

Outra linha de investigação é a construção de um modelo para definir o tamanho ótimo dos trens. Neste trabalho, os trens foram padronizados com capacidade constante a fim de garantir uma análise inicial do processo. Entretanto, após a avaliação operacional, recomenda-se a criação de um modelo que defina o tamanho ideal de cada trem para atendimento da demanda em seu respectivo almoxarifado.

Por fim, a localização dos almoxarifados foram consideradas conforme o cenário atual com o objetivo de não interferir significativamente na estrutura física da empresa. Neste contexto, outra melhoria proposta é a inclusão de ferramentas de otimização ao modelo existente a fim de definir a localização ótima dos almoxarifados, também denominados Centros de Distribuição (CDs). Dessa forma, é possível obter a distribuição ótima dos locais de armazenamento

ao longo da malha ferroviária, garantindo que as estratégias sejam obtidas através de análises de equilíbrio ótimo do sistema e não somente por análise dos cenários existentes.

Referências bibliográficas

- [1] AHUJA, R. K.; VAIDYANATHAN, B.; JHA, K. C. **Multicommodity network flow approach to the railroad crew-scheduling problem.** In: IBM JOURNAL OF RESEARCH AND DEVELOPMENT, volumen 51, p. 325–344, USA, 2007. IBM Corp.
- [2] FUKASAWA, R. **Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira.** Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [3] PEREIRA, O. C. **Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga.** PhD Thesis, 2009.
- [4] PNL. **Plano nacional de logística integrada.** Empresa de Planejamento e Logística S.A., 2015. Acesso em: Dezembro de 2020.
- [5] ALVARENGA, G. B. **Um algoritmo híbrido para os problemas de Roteamento de Veículos Estático e Dinâmico com Janela de Tempo.** Tese de doutorado em ciência da computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- [6] ILOS. **Ilos - especialistas em logística e supply chain.** Ilos - Especialistas em Logística e Supply Chain, 2012. Acesso em: Maio de 2020.
- [7] CAMPOS, L. B.; POMPERMAYER, F. M.; CRUZ, M. M. C. **Modelo de otimização aplicado ao planejamento do transporte ferroviário de carga.** In: ANAIS DO XV CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 2008.
- [8] CORDEAU, J.; LAGANÀ, D.; MUSMANNO, R.; VOCATURO, F. **A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem.** Computers & Operations Research, 55:153–166, 2015.
- [9] CORDEAU, J.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J.; SEMET, F. **A guide to vehicle routing heuristics.** Journal of the Operational Research society, 53(5):512–522, 2002.

- [10] RUIZ, R.; MAROTO, C.; ALCARAZ, J. **A decision support system for a real vehicle routing problem.** *European Journal of Operational Research*, 153(3):593–606, 2004.
- [11] CAMPOS, V.; MOTA, E. **Heuristic procedures for the capacitated vehicle routing problem.** *Computational Optimization and Applications*, 16(3):265–277, 2000.
- [12] BALDACCI, R.; TOTH, P.; VIGO, D. **Recent advances in vehicle routing exact algorithms.** *4OR*, 5(4):269–298, 2007.
- [13] GOLDBERG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização e programação linear.** Editora Campus, 2005.
- [14] MONTANÉ, F. A. T.; GALVÃO, R. D. **Vehicle routing problems with simultaneous pick-up and delivery service.** *Opsearch*, 39(1):19–33, 2002.
- [15] RENAUD, J.; LAPORTE, G.; BOCTOR, F. F. **A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem.** *Computers & Operations Research*, 23(3):229–235, 1996.
- [16] ARCHETTI, C.; SPERANZA, M. G. **The split delivery vehicle routing problem: a survey.** Springer, 2008.
- [17] PINEDO, M. **Theory, scheduling algorithms and systems**, 2012.
- [18] OLIVEIRA, E.; SMITH, B. M. **A job-shop scheduling model for the single-track railway scheduling problem.** *RESEARCH REPORT SERIES - UNIVERSITY OF LEEDS SCHOOL OF COMPUTER STUDIES LU SCS RR*, 1(21), 2000.
- [19] YANG, Z.; MA, Z.; WU, S. **Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production.** *Automation in Construction*, 72:321–329, 2016.
- [20] BRUCKER, P.; HURINK, J.; JURISCH, B.; WÖSTMANN, B. **A branch & bound algorithm for the open-shop problem.** *Discrete Applied Mathematics*, 76(1-3):43–59, 1997.
- [21] CORDEAU, J.; TOTH, P.; VIGO, D. **A survey of optimization models for train routing and scheduling.** *Transportation science*, 32(4):380–404, 1998.

- [22] NEMHAUSER, G. L. **Scheduling local and express service.** *Transportation Science*, 3(2):164–175, 1969.
- [23] SALZBORN, F. J. M. **The minimum fleetsize for a suburban railway system.** *Transportation Science*, 4(4):383–402, 1970.
- [24] NACHTIGALL, K.; VOGET, S. **A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization.** *Computers & Operations Research*, 23(5):453–463, 1996.
- [25] ODIJK, M. A. **A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables.** *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(6):455–464, 1996.
- [26] AHUJA, R. K.; LIU, J.; ORLIN, J. B.; SHARMA, D.; SHUGHART, L. A. **Solving real-life locomotive-scheduling problems.** *Transportation Science*, 39(4):503–517, 2005.
- [27] KOCJAN, W. **Heuristic methods for routing and scheduling**, 2001.
- [28] CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; TOTH, P. **Modeling and solving the train timetabling problem.** *Operations research*, 50(5):851–861, 2002.
- [29] HAMACHER, F.; PORTO, O.; UCHOA, E.; POGGI, M. **Logística ferroviária: Resolução do problema de alocação ótima de vagões e locomotivas no curto prazo.** In: ANAIS DO XXXVII SBPO, p. 943–954, Gramado, 2005. SOBRAPO.
- [30] CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; TOTH, P.; VIGO, D.; GUIDA, P. L. **Algorithms for railway crew management.** *Mathematical programming*, 79(1-3):125–141, 1997.
- [31] MARTINELLI, R.; ARAGÃO, M. P.; REIS, M. **Modelos para o planejamento tático para ferrovias.** In: ANAIS DO XL SBPO, p. 744–755, Rio de Janeiro, 2008. SOBRAPO.
- [32] PIMENTEL, F. A.; SANTOS, B. **Algoritmos para planejamento integrado de produção e transporte de minérios.** In: ANAIS DO XL SBPO, p. 1027–1038, Rio de Janeiro, 2009. SOBRAPO.
- [33] FAJARDO, A. P. C. **Uma Contribuição ao Estudo do Transporte Intermodal - Otimização da Expansão Dinâmica das Redes Intermodais do Transporte de Soja Produzida no Estado de Mato Grosso.** Tese de doutorado em ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

- [34] MEIRELES, R. P. L. **Modelagem e simulação da malha ferroviária em circuito fechado da estrada de ferro vitória a minas**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.
- [35] BRANCO FILHO, G. **A Organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Ciência Moderna, 2008.