

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1161

**PLANEJAMENTO DA AQUISIÇÃO DE
MATERIAIS PARA MANUTENÇÃO
PREVENTIVA DE VAGÕES DE CARGA GERAL**

Clayton Guimarães de Almeida

DATA DA DEFESA: 11/12/2019

CLAYTON GUIMARÃES DE ALMEIDA

PLANEJAMENTO DA AQUISIÇÃO DE
MATERIAIS PARA MANUTENÇÃO
PREVENTIVA DE VAGÕES DE CARGA GERAL

Versão final

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: PROF. EDUARDO GONTIJO CARRANO

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2019

A447p

Almeida, Clayton Guimarães de.

Planejamento da aquisição de materiais para manutenção preventiva de vagões de carga geral [recurso eletrônico] / Clayton Guimarães de Almeida. - 2019.

1 recurso online (xx, 52 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eduardo Gontijo Carrano.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 49-52.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Controle de estoque - Teses. 3. Otimização multiobjetivo - Teses. 4. Transporte ferroviário de cargas - Vagões - Teses. I. Carrano, Eduardo Gontijo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

"Planejamento da aquisição de materiais para manutenção preventiva de vagões de carga geral"

Clayton Guimarães de Almeida

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 11 de dezembro de 2019.

Por:



Prof. Dr. Eduardo Gontijo Carrano
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Michel Bessani
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Rodrigo Tomás Nogueira Cardoso
DFM (CEFET-MG)

Dedico este trabalho à minha família que é minha base, meu tudo.

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por ter me dado saúde e força para trilhar este caminho de muito aprendizado e evolução.

Agradeço também a meus pais por sempre serem meu maior exemplo de luta, perseverança, humildade, dedicação e amor.

A minha esposa Chyrlen, o amor da minha vida, por ter me apoiado do início ao fim, me ajudando durante toda esta jornada e por ter me dado o melhor presente de toda minha vida: nosso filho Arthur. Filhão, você é a razão da minha alegria diária, papai te ama.

Aos meus irmãos pelo apoio e incentivo durante todos os momentos deste percurso. Obrigado por me compreenderem quando estive ausente.

Agradeço também ao meu sogro e sogra por sempre me tratarem como um filho. Aos meus cunhados e cunhadas pelo apoio e compreensão.

A meus familiares e amigos pelo apoio e companheirismo em todos os momentos desta caminhada. Gostaria de agradecer especialmente aos meus amigos Jésus e Breno por me incentivarem a começar esta caminhada junto a eles e por estarem presentes compartilhando os desafios e conquistas ao longo do percurso até chegar a este momento.

Agradeço ao meu orientador, professor Eduardo Gontijo Carrano por compartilhar comigo seu vasto conhecimento e capacidade intelectual durante as orientações. Muito obrigado pelo apoio, ensinamentos, reuniões e revisões deste trabalho. Agradeço também ao professor André Maravilha pelo apoio e contribuição na elaboração do modelo matemático deste trabalho.

Por fim, agradeço à empresa VLI Logística pelo incentivo na realização deste mestrado.

Resumo

Este trabalho apresenta uma ferramenta para otimizar o estoque de materiais utilizados na manutenção preventiva de vagões de carga geral. Essa abordagem tem duas funções objetivo: a primeira se concentra em minimizar o custo de compra de materiais e a segunda visa minimizar o custo de risco de parada dos vagões devido à falta de materiais. O objetivo desta ferramenta é apontar a redução de custos com o estoque ao mesmo tempo em que o risco de parada dos vagões é controlado. Esses dois objetivos definem um *trade-off*, que deve ser analisado na escolha de uma solução com base em quanto risco se deseja assumir para reduzir os custos de estoque. É apresentada uma lista de todos os materiais a serem adquiridos em cada período do ciclo de manutenção para cada solução pareto ótima. A ferramenta permite identificar quais materiais estão sendo priorizados em cada solução. Um conjunto de dados reais de uma empresa de transporte ferroviário, com foco no ciclo de manutenção de vagões de carga geral durante um período de um ano, foi usado para testar a ferramenta. Outro teste realizado foi a comparação entre as soluções geradas pelas taxas de sucateamento calculadas para o ciclo anterior (2017) e os resultados alcançados utilizando as taxas reais de sucateamento do ciclo de 2018. Essa análise permitiu estimar o *gap* de risco entre as soluções previstas e as ideais, o que possibilitou identificar pontos de melhoria nos processos da empresa em questão.

Palavras-chave: Planejamento de estoque, Vagão, Manutenção Preventiva, Otimização Multiobjetivo, Gurobi.

Abstract

This work presents a tool for optimizing the inventory used for preventive maintenance of general cargo freight cars. This approach has two objective functions: the first one is focused on minimizing the purchase cost of materials, and the second one is to minimize the risk cost of stopping freight cars due to material shortages. The objective of this tool is to aim cost reduction with inventory at the same time that freight cars stop risk is controlled. These two objectives define a trade-off, which must be analyzed in the choice of a solution based on how much risk one wants to assume to reduce the inventory costs. A list of all materials to be purchased in each period of the maintenance cycle is presented for each Pareto-optimal solution. It makes possible to identify which materials are being prioritized in each solution. A real data set from a transport railway company, focusing on the maintenance cycle of general cargo freight cars over a one year period, was used to test the tool. Another test performed was the comparison between the solutions generated through the scrapping rates calculated for the previous cycle (2017) and the results achieved using the real scrapping rates of the 2018 cycle. This analysis allowed to estimate the risk gap between predicted and ideal solutions, which made possible to indicate points of improvement in the processes of the company in question.

Keywords: Inventory Planning, Freight Car, Preventive Maintenance, Multiobjective Optimization, Gurobi.

Lista de Figuras

2.1	Vista Lateral de um Vagão HPE. Fonte: [VLI, 2016]	9
2.2	Vista explodida dos principais materiais de um vagão. Adaptado de [VLI, 2016]	10
3.1	Fluxograma do algoritmo de otimização	28
4.1	Fluxo de transporte de enxofre e fosfato com vagões HPE.	31
4.2	Fronteira pareto ótima com as soluções 2 e 13 selecionadas.	35
4.3	Fronteira pareto com dados de 2018.	41
4.4	Comparativo entre as fronteiras paretos com dados de 2017 e 2018.	41

Lista de Tabelas

2.1	Lista de materiais	11
3.1	Cálculo da demanda dos materiais por período	25
4.1	Lista de manutenções preventivas a serem realizadas por período	32
4.2	Dados de materiais para entrada do algoritmo	34
4.3	Tabela de resultados da fronteira pareto	36
4.4	Lista de materiais da solução 2 e as quantidades a serem compradas por período	37
4.5	Lista de materiais da solução 13 e as quantidades a serem compradas por período	38
4.6	Lista de materiais da solução 2 e seus quantitativos por período	39
4.7	Lista de materiais da solução 13 e seus quantitativos por período	40
4.8	Tabela de GAP's entre os resultados de 2017 e 2018	42

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Contribuições Alcançadas	3
1.4 Estrutura do Texto	4
2 Referencial Teórico	7
2.1 Definição do problema	7
2.1.1 Vagões	8
2.1.2 Tipos de manutenção	9
2.1.3 Gestão de estoque atual e suas inconsistências	11
2.1.4 Gestão de riscos	13
2.2 Trabalhos Relacionados	14
2.2.1 Previsão de demandas por séries temporais	14
2.2.2 Previsão de demandas utilizando a confiabilidade das peças e informações dos seus ativos base	15
2.2.3 Comparativo entre previsões de demanda feitas por meio da con- fiabilidade das peças e por séries temporais	17
2.3 Materiais e métodos	19
3 Método proposto	21

3.1	Modelo Matemático	21
3.2	Ferramenta Proposta	27
4	Resultados e Discussões	31
4.1	Estudo de Caso	31
4.2	Resultados Computacionais	35
4.3	Validação da Metodologia	40
5	Considerações Finais	45
5.1	Conclusões	45
5.2	Trabalhos Futuros	46
5.3	Produção Bibliográfica	47
	Referências Bibliográficas	49

Capítulo 1

Introdução

O cenário econômico global vem se tornando cada vez mais desafiador. Juntamente com isso, tem-se o aumento da competição, a volatilidade do mercado e os avanços tecnológicos os quais demandam das organizações a busca por novas estratégias para redução de custos operacionais e aumento na eficiência de processos. Dentre os instrumentos utilizados na busca por vantagens competitivas frente as concorrentes, destaca-se a gestão de estoque [Librantz et al., 2010].

Segundo Rego & Mesquita [2011] e Porras & Dekker [2008], a gestão de estoque é um processo extremamente delicado e não muito bem gerido na maior parte das empresas. Isso faz com que existam estoques muito inflados, gerando perdas por capital estagnado, custos de manutenção e estocagem dos materiais e perdas devido à obsolescência. Em contraposição, a adoção de estoques reduzidos pode gerar falta de materiais e, conseqüentemente, perdas por paralisação de ativos [der Auweraer et al., 2019].

Bertolde & Junior [2013] afirmam que a gestão de estoque de peças de reposição para a manutenção de ativos é muito importante para empresas de prestação de serviços, as quais necessitam que ativos estejam funcionais para cumprir suas atividades. Com isso, faz-se necessário gerir de forma eficaz as peças de reposição utilizadas na manutenção dos mesmos.

A maior parte dos trabalhos relacionados visam prever a demanda dos materiais a serem consumidos nas manutenções dos ativos. Com isso, nos últimos anos, pesquisas que tem como foco a previsão da demanda destes materiais de reposição vêm ganhando destaque [Callegaro, 2010]. A intensificação de trabalhos nessa área foi motivada pelas diversas questões que tornam a previsão de demanda uma tarefa complexa, devido a intermitência/variabilidade de consumo das peças de reposição e a gestão dos custos associados tais como o custo da falta de material, custo da perda de produção e o custo

de compra emergencial da peça faltante [Bertolde & Junior, 2013].

O presente trabalho apresenta uma metodologia de otimização de estoque onde são consideradas as demandas variáveis referentes a três tipos de manutenção preventivas realizados em vagões de carga geral de empresas do ramo ferroviário. Para cada um dos tipos de manutenção são consideradas as taxas de sucateamento de peças de reposição, as quais são substituídas mediante inspeção. Essas taxas de sucateamento são estocásticas, baseadas em trocas anteriores, não sendo possível definir exatamente a quantidade de materiais a serem gastos. Dois critérios de otimização são considerados: minimização do custo da compra dos materiais e minimização do custo de risco da falta de materiais. Neste contexto, o risco refere-se a probabilidade de ser necessário substituir uma peça de reposição durante uma manutenção preventiva e a mesma não estar disponível, fazendo com que o ativo fique parado gerando prejuízos até que a peça seja adquirida e substituída. Esta metodologia foi testada utilizando-se como estudo de caso uma empresa de transporte ferroviário e avaliada utilizando informações de gastos durante um período determinado.

1.1 Motivação

Os estudos baseados em predição de estoque de peças de reposição estão sendo muito utilizados por empresas em vários ramos de atuação, com o objetivo de obter ganhos competitivos de preço e qualidade no serviço prestado. Além disso, uma predição de consumo próximo do real evita a compra excessiva de materiais e também as perdas com ativos inoperantes devido à indisponibilidade dos mesmos. Existem várias técnicas utilizadas na predição de estoque, tais como média móvel, suavização exponencial simples, Croston, ARIMA, dentre outros [Bertolde & Junior, 2013].

Em todas as metodologias citadas, o foco é a busca pela predição do estoque que mais se aproxime da demanda real. No entanto, as mesmas não avaliam o risco da falta de materiais e o quanto este risco pode gerar de prejuízos. Esta é uma necessidade pouco explorada em pesquisas relacionadas ao tema. Também não há enfoque na priorização de compra dos materiais mediante restrições de verbas para sua aquisição. Diante disso, a primeira motivação deste trabalho é desenvolver uma metodologia que, além de focar na priorização de aquisição dos materiais de reposição utilizados nas manutenções preventivas de ativos, apresente o custo dos riscos envolvidos ao se predizer consumos muito distintos do real.

Devido ao cenário econômico enfrentado pelas empresas em que, na maioria das vezes, não há verba disponível para a aquisição de todos os materiais que garantam a

extinção dos riscos de indisponibilidade, faz-se necessário obter informações de quais e quantos materiais devem ser comprados. Outro ponto importante é saber quando adquirir os materiais para que não haja uma espera muito grande devido ao *lead time* estipulado pelos fornecedores. Com isso, a segunda motivação é a criação de uma ferramenta capaz de prover informações para a priorização de compra dos materiais mediante as restrições impostas pelas empresas com relação ao custeio disponível para a aquisição dos materiais.

Outra motivação deste trabalho é apresentar os resultados encontrados pela otimização através de uma fronteira de Pareto-ótima. Isso permite que sejam feitas escolhas de cenários de compra dos materiais sabendo do risco que será corrido com esta escolha. Espera-se com isso obter clareza nas escolhas e justificar eventuais solicitações de aumento de investimentos com base na diminuição do risco a ser assumido.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a criação de uma metodologia que seja capaz de construir planos de aquisição de materiais utilizados em manutenções preventivas de vagões de carga geral, visando minimizar o investimento na aquisição de materiais e minimizar o custo do risco associado a indisponibilidade destes. Para tanto, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Definir um modelo matemático que trate as incertezas nas demandas de materiais por meio da penalização pela falta de peças de acordo com o tempo de inatividade do vagão.
- Efetuar a comparação dos resultados gerados a partir das taxas de sucateamento do ciclo anterior com o consumo real do ciclo subsequente, apresentando o *gap* entre o resultado calculado e o melhor resultado teoricamente atingível.

1.3 Contribuições Alcançadas

As principais contribuições científicas alcançadas por este trabalho são:

- Criação de uma metodologia que apresente os riscos inerentes ao processo de predição de consumo de materiais em manutenções preventivas ao longo de um ciclo, bem como o quanto estes riscos podem causar de prejuízos.

- Criação de uma ferramenta que permita a avaliação de várias soluções e que apresente, em cada uma delas, a priorização na compra de materiais, sendo possível, a partir do orçamento disponível, optar por uma solução que minimize os riscos envolvidos com a falta de materiais. Com isso será possível saber quando, quanto e quais materiais devem ser comprados para que os riscos de falta possam ser minimizados.
- Outra contribuição é prover informações que permitam uma avaliação do quanto de verba será necessário para que os riscos sejam minimizados. Com isso será possível saber o quanto investir e qual será o retorno com relação à redução da falta de materiais durante as manutenções, aumentando assim os ganhos financeiros com este processo.

Também foi possível alcançar contribuições práticas, conforme pode ser visto a seguir:

- Substituição do formato empírico de previsão e planejamento de compra de peças de reposição utilizado em empresas do ramo ferroviário por uma metodologia que apresente o risco a ser corrido mediante as escolhas de cenários de compra de materiais seguindo somente a taxa de sucateamento de ciclos anteriores.
- Obter resultados ótimos para o planejamento anual da aquisição de peças de reposição em um tempo computacional aceitável para tal tarefa.

1.4 Estrutura do Texto

Este capítulo apresentou o problema de previsão de peças de reposição para manutenções em empresas, o qual é complexo devido a vários fatores tais como as demandas intermitentes e os riscos de se ter estoques inflados ou insuficientes.

O capítulo 2 apresenta a definição dos problemas enfrentados na gestão de estoques das peças de reposição utilizadas em manutenções preventivas. Também são apresentadas as definições dos ativos e tipos de manutenções utilizados no estudo de caso e, por fim, são apresentados trabalhos correlacionados, apresentando algumas das metodologias aplicadas em empresas de outras áreas de atuação.

No capítulo 3 é apresentado o algoritmo proposto para resolução do problema, bem como a forma que o mesmo foi implementado. Também são detalhados quais tipos de dados são utilizados como entrada do algoritmo. Outro assunto abordado

neste capítulo é o modelo matemático proposto, o qual foca no *trade-off* entre o custo de compra e o custo do risco da falta dos materiais.

Os resultados alcançados com a metodologia são apresentados no capítulo 4. Nele é detalhado o cenário utilizado para os testes, apresentando os materiais utilizados, os tipos de manutenção e taxas de sucateamento das peças em cada uma delas e a definição do ciclo de manutenções utilizado. Posteriormente tem-se os resultados obtidos através da otimização do modelo e, por fim, é feita uma validação da metodologia proposta por meio da apresentação do *gap* entre o resultado encontrado com as taxas de sucateamento calculadas e o resultado ideal, baseado no consumo real do período sob estudo.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes à metodologia proposta e os resultados alcançados, finalizando com a apresentação de algumas ideias para continuação do trabalho.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Empresas que têm como foco a prestação de serviços precisam manter seus ativos sempre em funcionamento para evitar perdas por paradas não programadas. Para tanto, uma gestão adequada de estoque se torna essencial [Mentzer et al., 2001] pois, sem um controle adequado, problemas como excesso de peças armazenadas ou falta dos materiais durante a manutenção dos ativos podem acarretar em prejuízos [Librantz et al., 2010].

Existem muitas atividades a serem executadas no que diz respeito a área de suprimentos para que tais problemas sejam minimizados ou, se possível, evitados. Uma das atividades de destaque na gestão de estoque é a previsão das demandas de peças de reposição. Esta pode garantir economia nos gastos e tornar as empresas mais competitivas e lucrativas, garantindo a alta disponibilidade dos ativos ([Marseguerra et al., 2005; van Jaarsveld & Dekker, 2011; Barabadi et al., 2014]).

Essa atividade, bem como outras tarefas referentes ao gerenciamento de demandas das peças de reposição para manutenções preventivas de ativos, são um desafio enfrentado por empresas de prestação de serviço, tais como empresas de transporte ferroviário, as quais executam manutenções preventivas em vagões utilizados para transporte de carga geral. Esses desafios serão detalhados ao longo deste capítulo.

2.1 Definição do problema

O problema na gestão das peças de reposição é um grande desafio para empresas de prestação de serviços cujos ativos são o cerne do negócio. Em empresas de transporte ferroviário os principais ativos são os trens, os quais são compostos por locomotivas e vagões de diferentes tipos. As locomotivas são materiais rodantes responsáveis por

fazer a tração de todo o trem e os vagões são veículos rebocados responsáveis por fazer o transporte das cargas [Cordeau et al., 2000].

Cada um dos trens possui, aproximadamente, seis locomotivas e noventa vagões. Essas quantidades variam de acordo com o fluxo, carga a ser transportada e o relevo do trecho a ser percorrido, podendo haver trens com mais locomotivas e vagões. Por isso, a frota de vagões é muito grande e a gestão das peças de reposição para manutenção dos mesmos se torna um grande desafio. Esse desafio é potencializado devido a variedade de tipos de vagões existentes, sendo que cada um possui suas especificidades.

2.1.1 Vagões

Um vagão pode ser descrito como um ativo ferroviário rebocado responsável por efetuar transportes, podendo ser de carga ou de passageiros. Por serem rebocados, os mesmos necessitam que as locomotivas façam a tração para que haja a locomoção de toda a composição. Para este trabalho, o enfoque será dado aos vagões de carga.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) [ABNT, 2015], os principais tipos de vagões responsáveis por transporte de carga utilizados no Brasil são:

- Fechados: utilizado para transporte de produtos que não devem ser expostos ao clima, tais como caixarias, ensacados, cargas unitizadas e granéis sólidos;
- Gondola: transporta produtos que podem ser expostos ao tempo e também para granéis sólidos;
- *Hopper*: vagões com entrada de produtos pela parte superior e descarga pela parte inferior. Transporta produtos que podem ou não ser expostos ao tempo;
- Tanque: responsável por transportar derivados do petróleo e líquidos em geral.

Em empresas de transporte ferroviário são utilizados vários tipos de vagões para transporte tanto de carga quanto de pessoas. Esses transportes são realizados em vários fluxos, os quais são definidos pelos produtos transportados ou no transporte de passageiros em trens turísticos. O transporte de carga, o qual é a principal atividade desse tipo de empresa, comumente possui uma frota extensa de vagões. Com isso, tem-se o desafio de manter a confiabilidade dos mesmos por meio de monitoramento, inspeções e manutenções [VLI, 2016].

Para este trabalho será utilizado o tipo de vagão *Hopper* fechado com proteção anticorrosiva e que possui a finalidade de transportar enxofre e fosfato. Uma foto do mesmo pode ser vista na Figura 2.1 [VLI, 2016]. Sua identificação é feita através do

código HPE, o qual define suas especificações: i) HP: *Hopper* fechado com escotilha e tremonha para transporte de produtos corrosivos; ii) E: Bitola métrica (um metro de distância entre os rodeiros) com dimensões de 6" x 11". Esta identificação define o limite de peso suportado por truque, que é de 60.000 kg, com um total de 120.000 kg por vagão devido ao mesmo possuir dois truques [ABNT, 2015].



Figura 2.1. Vista Lateral de um Vagão HPE. Fonte: [VLI, 2016]

Este tipo de vagão, assim como qualquer ativo, necessita passar por manutenções preventivas para que seja garantido seu bom funcionamento. Dentro do fluxo de transporte de carga existem as oficinas de manutenção para onde os vagões são levados para que sejam efetuadas estas manutenções preventivas, foco deste trabalho. Essas possuem características específicas no que se refere à sua periodicidade e às regras para substituição dos materiais durante a realização das mesmas.

2.1.2 Tipos de manutenção

A demanda por peças de reposição pode vir de manutenções corretivas ou preventivas, sendo que cada uma delas têm suas próprias características [Wang & Syntetos, 2011; Wang, 2002].

Segundo Wang & Syntetos [2011], as demandas de peças decorrentes das manutenções corretivas são aquelas geradas após a falha de algum ativo. As mesmas são imprevistas com relação à data de chegada, o que as tornam intermitentes. Pode haver vários períodos sem nenhuma demanda e outros períodos com demanda alta. Isso faz com que estas demandas sejam tratadas como irregulares.

Já as demandas decorrentes de manutenções preventivas são tratadas como determinísticas, pois as mesmas são programadas. A quantidade de peças de reposição utilizadas para realização das mesmas tem caráter estocástico por ser necessário efetuar uma inspeção no ativo para constatar quais peças necessitam ser substituídas [Wang & Syntetos, 2011].

Neste trabalho será abordada a previsão de peças de reposição para as manutenções preventivas realizadas nos vagões do tipo HPE. Estas se dividem em três tipos:

1. Básica: inspeção com reparação condicional em todos os sistemas do vagão (choque e tração, truques, rodeiros e freios). Neste tipo de manutenção, as trocas de peças de reposição são feitas somente de forma condicional, mediante inspeção;
2. Intermediária: inspeção de todos os sistemas do vagão em oficina, com ênfase nos componentes de truque e substituição de adaptadores e válvulas de freio. As trocas de peças são feitas prioritariamente de forma condicional e com algumas trocas obrigatórias;
3. Geral: inspeção de todos os sistemas do vagão, com ênfase nos componentes de truque e aparelho de choque e tração. Também são feitas as substituições de adaptadores, molas, cunhas, disco bordado, válvula de freio e componentes de engate (mandíbula, rotor, castanha, chaveta e pinos). Nesta manutenção as trocas obrigatórias são prioritárias, apesar de também existirem algumas trocas condicionais.

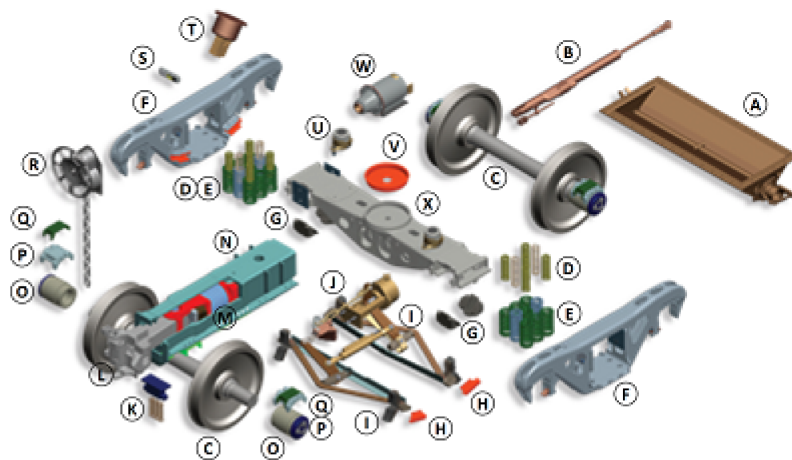


Figura 2.2. Vista explodida dos principais materiais de um vagão. Adaptado de [VLI, 2016]

Em todos os tipos de manutenção realizadas são feitas trocas condicionais de peças de reposição. A Figura 2.2 apresenta uma visão geral das principais peças de um vagão em uma visão explodida da parte de infraestrutura do mesmo. O detalhamento destas peças pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Lista de materiais

Identificador	Material
A	Tremonha
B	Ajustador de Folga
C	Rodeiro
D	Mola da Suspensão Interna Cunha
E	Mola da Suspensão Externa Cunha
F	Lateral do Truque
G	Cunha de fricção
H	Corrediça do Triângulo de Freio CVRD
I	Triângulo de Freio CVRD
J	Timoneria de Freio
K	Apoio do Engate com Mola
L	Engate Completo Tipo E 6.1/4 X 8
M	Aparelho de Choque e Tração
N	Abraçadeira Engate Tipo E
O	Rolamento
P	Adaptador Convencional
Q	PAD
R	Freio Manual
S	TAG
T	Capacete do Ampara Balanço
U	Ampara Balanço
V	Disco Solto Prato Pião 14"
W	Cilindro de Freio
X	Travessa Central

Todas as peças que não possuem substituição obrigatória necessitam de uma inspeção detalhada para verificar a real necessidade de troca, caracterizando a demanda estocástica dos materiais a serem substituídos. Com isso, faz-se necessário uma boa gestão do estoque destas peças para manter o fluxo de manutenções sem paradas indesejadas.

2.1.3 Gestão de estoque atual e suas inconsistências

A gestão de estoque é uma atividade muito importante para as empresas pois pode garantir a redução de custos e evitar perdas. Uma linha importante é a gestão do estoque

de peças de reposição utilizadas em manutenções preventivas. Os custos envolvendo essas peças podem ser de aquisição, estocagem e obsolescência.

O custo de estocagem pode ser muito alto, podendo exceder o lucro anual de algumas empresas. Essa estocagem precisa ser feita para garantir um nível adequado de atendimento ao cliente, porém esta gestão ainda apresenta os desafios de se ter um estoque inflado que gere alto custo de manutenção e obsolescência ou ter um estoque enxuto e ter perdas por falta de peças de reposição durante as manutenções [Porras & Dekker, 2008].

Segundo [Viana, 2000], a definição de gestão de estoque é feita como um conjunto de atividades com o intuito de atender as demandas de materiais nas empresas, focando na diminuição dos custos e provendo maior eficiência. Outra tarefa dessa gestão é garantir a rotatividade dos materiais, evitando assim que os mesmos fiquem obsoletos. Por fim, tem-se a busca pelo equilíbrio entre o nível ideal do estoque e a minimização dos custos gerais para tal. Para [Nogueira, 2012] a redução de custos na gestão de estoque passa pela melhor gestão de rotatividade dos materiais, liberando assim o capital ativo e reduzindo os custos de manutenção e estocagem das peças.

Para assegurar que os materiais estejam disponíveis, faz-se necessário manter um determinado nível de estoque. Isso é necessário devido a incerteza existente na previsão de demandas futuras. Mais informações podem ser vistas em [Pozo, 2000].

Com base nas manutenções citadas na seção 2.1.2, as trocas de muitas das peças de reposição são feitas mediante inspeção de sua condição atual. Isso ocorre com menos frequência na manutenção geral, porém tem maior frequência nas manutenções intermediárias e básicas. Para algumas situações, a troca das peças é obrigatória. Com isso, tem-se uma lista de materiais que sempre serão trocados durante a manutenção a ser executada e outra lista das peças que terão troca condicional, a qual é estocástica.

Para que seja feita a previsão de gastos anuais com estas trocas obrigatórias e estocásticas, é levada em consideração a quantidade de vagões a serem mantidos durante o ano e qual tipo de manutenção preventiva os mesmos receberão. Assim é possível saber com certeza quantas peças de troca obrigatória serão necessárias e efetuar a compra antecipada das mesmas. Já os materiais de troca condicional precisam ser previstos para que não haja problemas de falta dos mesmos durante o período de manutenções. Estas previsões para o ano seguinte podem ser feitas por meio da taxa de sucateamento dos materiais ao longo do período anterior.

Para efetuar o cálculo da taxa de sucateamento de cada um dos materiais, são levadas em consideração a quantidade e tipos de manutenção realizadas durante o ano e a quantidade gasta de cada material. Com isso, tem-se uma taxa de sucateamento específica para cada peça em cada um dos tipos de manutenção realizadas. A equação

(2.1) apresenta a forma com que é feito o cálculo da taxa de sucateamento.

$$ts_{i,j} = qms_{i,j}/qmr_j \quad (2.1)$$

Onde:

$ts_{i,j}$: taxa de sucateamento do material i para o tipo de manutenção j ;

$qms_{i,j}$: quantidade do material i que foi substituído durante a realização das manutenções do tipo j no período avaliado;

qmr_j : quantidade de manutenções do tipo j realizadas durante o período avaliado;

Com a equação (2.1) são obtidas as taxas de sucateamento de todos os materiais para cada um dos tipos de manutenção. Além disso, tem-se a previsão de quantas e quais tipos de manutenção serão realizadas no período futuro. Estas informações são utilizadas para a previsão da quantidade necessária de cada um dos materiais, sendo esses dados os norteadores da equipe de suprimentos para a compra das peças ao longo do período vindouro.

Segundo [Bertolde & Junior, 2013], a utilização apenas da taxa de sucateamento não é a melhor forma para se obter acurácia na previsão da demanda, pois a mesma não prevê as incertezas existentes neste processo. Porém, para se ter uma melhor forma de previsão de demandas é necessário uma base de dados robusta que permita fazer uma regressão e criação de um modelo adequado. Para empresas que não possuem estas informações disponíveis, a utilização da taxa de sucateamento referente ao período anterior se torna a opção existente para este fim, porém estas incertezas geram riscos na previsão de demandas, os quais podem gerar prejuízos para as empresas.

2.1.4 Gestão de riscos

Com as incertezas inerentes à previsão de demandas das peças de reposição, faz-se necessário dispender esforços para gerir os mesmos. A gestão de riscos é uma técnica utilizada para minimizar prejuízos causados por situações não previstas que podem fazer com que as empresas interrompam suas linhas de produção ou sua prestação de serviços em função de falta de estoque de peças. [Simchi-Levi et al., 2009] definem dois tipos de riscos: os riscos *unknown-unknown* e os riscos *known-unknown*.

Os riscos *unknown-unknown* são riscos mais difíceis de controlar, pois são associados a cenários em que não se pode mapear antecipadamente a probabilidade de

ocorrência dos mesmos. Tais riscos podem ser desastres naturais, epidemias, ataques terroristas, riscos geopolíticos dentre outros.

Já os riscos *known-unknown* possuem tratativas mais fáceis de se fazer por serem riscos os quais são passíveis de quantificação. Como exemplo, tem-se o desempenho de fornecedores em termos de tempo de entrega de materiais, problemas na fabricação de peças, problemas na execução e mudanças de mercado.

Entre os dois extremos de riscos citados acima, existem vários outros riscos que são passíveis de tratamento até certo ponto. Para tanto, existem várias técnicas que podem garantir uma gestão correta de riscos, tais como criação de redundâncias, criação de contratos de longo prazo, utilização de estratégias compensativas e também estratégias flexíveis. Para mais informações, veja [Simchi-Levi et al., 2009].

Na sequência é apresentado um levantamento bibliográfico relacionado a previsão de demandas de peças de reposição.

2.2 Trabalhos Relacionados

Por se tratar de um tema relevante para a otimização de custos e disponibilidade de ativos para a maioria das empresas, a previsão de peças de reposição é um tema recorrente na literatura, como pode ser visto em [Wang & Syntetos, 2011; Bacchetti & Saccani, 2012; Dekker et al., 2013; der Auweraer et al., 2019]).

Dentre os trabalhos pesquisados, os mesmos foram separados em três categorias distintas: i) os trabalhos focados somente na previsão de demandas por meio de séries temporais; ii) os trabalhos que focam na previsão de demandas de peças de reposição por meio da confiabilidade das peças e informações dos seus ativos base; iii) e os trabalhos que fazem o comparativo entre previsão por séries temporais e previsão baseada na confiabilidade das peças. Esses trabalhos são apresentados nas seções seguintes.

2.2.1 Previsão de demandas por séries temporais

No artigo de Willemain et al. [2004] é efetuada uma comparação entre os métodos de suavização exponencial, Croston e o método *bootstrapping* adaptado proposto pelos autores. Nele os métodos são comparados através de testes utilizando nove bases de dados de empresas tanto locais como multinacionais. Como resultado, foi visto que o método *bootstrapping* adaptado foi o mais preciso dentre os três. Já os métodos de Croston e suavização exponencial não apresentaram diferenças estatisticamente relevantes entre si. Devido a previsão da demanda ter sido efetuada para 1, 3 e 6 meses,

foi percebido que a precisão do método proposto foi decaindo, porém o mesmo ainda se manteve como o mais preciso dos métodos.

Outro trabalho focado na previsão de demandas foi desenvolvido por Filho et al. [2013], o qual visa a prever a quantidade de bolsas de componentes sanguíneos serão requisitadas para suprir a demanda dos hospitais e de centros de saúde. Foi desenvolvido um aplicativo de identificação de modelos baseado em BJ-SARIMA procedimento *Box e Jenkins* de identificação de modelos SARIMA de séries temporais [Box & Jenkins, 1994]) e, com base na identificação destes modelos, efetua a previsão de demandas futuras. Como resultado deste estudo, foi apresentado um aplicativo capaz de identificar o melhor modelo dentre os modelos encontrados. Posteriormente, o modelo selecionado é estruturado e utilizado na previsão de demanda dos componentes sanguíneos com o objetivo de minimizar as perdas por não utilização dos materiais estocados (devido aos mesmos serem perecíveis) e também minimizar a falta do sangue.

2.2.2 Previsão de demandas utilizando a confiabilidade das peças e informações dos seus ativos base

O artigo de [Dekker et al., 2013] aborda o estudo do impacto na previsão de peças de reposição a partir da coleta e utilização de informações dos ativos onde essas peças estão instaladas, os quais são denominados ativos base. Segundo os autores, alguns dos problemas causadores da diminuição do nível de assertividade da previsão de peças de reposição são a intermitência nas demandas dessas peças, sua baixa movimentação e as alterações nos ciclos de vida das mesmas. Para minimizar estes impactos, foi visto que a utilização das informações de ativos base aumentaram a confiabilidade e acurácia das previsões. Contudo, é citado o quão desafiador pode ser o processo de coleta destas informações, visto que existem vários tipos de ativos base, cada um com suas configurações e particularidades. Outro desafio apresentado é lidar com a falta de informação desses ativos base ou com a dificuldade de consolidação das informações as quais estão espalhadas em diversos sistemas legados. Também são fatores que contribuem para a baixa confiabilidade nas previsões de demanda a grande quantidade de peças distintas e a alta criticidade dos ativos que as utilizam. Por fim, é citado que existem muitos benefícios de se utilizar as informações coletadas dos ativos na previsão de peças de reposição, tais como ganhos em custo com *lead times*, diminuição dos custos por falta de peças e diminuição das perdas por obsolescência dos materiais.

Em Barabadi et al. [2014] é apresentado um trabalho cujo foco é a aplicação de modelos de confiabilidade com covariáveis na predição e otimização de peças de repo-

sição. Neste estudo foi mostrado como a previsão das peças de reposição baseada nas características de confiabilidade dos itens é uma boa estratégia para prevenir problemas de falta de material e perdas por tal. Foi visto que para uma previsão efetiva, deve ser levado em consideração não somente a taxa de falha dos materiais mas também as condições do ambiente e as características operacionais. Nestas condições, foram levantadas as correlações entre estas variáveis para definir qual a melhor metodologia a ser utilizada, sendo escolhida a forma paramétrica do modelo de risco proporcional (*Proportional hazard model* - PHM). Os testes realizados para validação da metodologia levaram em consideração ativos responsáveis por efetuar escavação de dois tipos distintos de rocha. Estes ativos possuem tipos diferentes de brocas de perfuração (peças a serem repostas), as quais variam de duração e preço. Com isso foi efetuada a previsão de consumo destas brocas e, posteriormente, a otimização de quatro cenários, levando em consideração dois tipos de rocha e dois tipos de broca. Por fim, foram encontrados os custos de cada um dos cenários em um período de 10 anos, sendo definido que o melhor deles é aqueles que apresentou o melhor *trade-off* entre a quantidade de metros perfurados e o custo total das peças de reposição necessárias para execução do trabalho.

No trabalho de Hu et al. [2018] é apresentado um *framework* de pesquisa operacional focado em: i) gestão de peças de reposição; ii) fases do ciclo de vida dos equipamentos e suas principais tarefas; iii) tarefas da pesquisa operacional que apoiam o gerenciamento das peças de reposição. Nele são abordados fatores como confiabilidade e taxa de falha das peças e não só os dados utilizados nas séries temporais como a maioria das pesquisas. Também é levado em consideração o status do ativo base onde as peças estão instaladas e o impacto de diferentes estratégias de manutenção e a influência do ambiente operacional. Além de fazer uma revisão baseada em todas as etapas da pesquisa operacional focada em gerenciamento peças de reposição, o novo *framework* proposto inclui questões ambientais nos objetivos do mesmo. Além disso ele propõe também a inclusão da fase 0 que é a fase de pré-vida das peças de reposição. Por fim é dito que não foram incluídos na revisão os aplicativos e sistemas de software devido aos mesmos abrangerem todas as fases e disciplinas englobadas pelo *framework* proposto e também devido ao fato de que ainda existe uma grande lacuna entre as pesquisas científicas já efetuadas e os sistemas desenvolvidos. Com isso é finalizado o trabalho apresentando a necessidade de diminuir a lacuna entre as pesquisas realizadas e os sistemas desenvolvidos para que as pesquisas se tornem mais relevantes na prática e a implementação dos sistemas apresente as melhores práticas nesta área as quais foram identificadas por pesquisas de alta qualidade.

2.2.3 Comparativo entre previsões de demanda feitas por meio da confiabilidade das peças e por séries temporais

O trabalho de Wang & Syntetos [2011] tem como foco propor um método de previsão de demandas das peças de reposição diferente da maioria dos métodos utilizados para previsão de demanda baseados em séries temporais. Como premissa deste trabalho tem-se que as manutenções e peças de reposição estão diretamente ligadas e que é possível identificar as características de confiabilidades destas peças. Para a realização dos experimentos, foi assumido que em todas as inspeções seriam encontrados todos os defeitos existentes. Outra definição foi que as inspeções e reparos seriam executados em intervalos fixos (em dias) de $t = 28$ e que as peças de reposição sempre seriam substituídas, não havendo falta de nenhuma delas. Por fim, foi definido que o tempo de substituição das peças de reposição e a nova falha das mesmas seguiriam uma distribuição *Weibull*. Após essas definições, foram feitos os experimentos e comparados os resultados deste modelo de tempo de atraso na inspeção e substituição de peças com o modelo SBA (do inglês, *Syntetos-Boylan Approximation*), baseado em séries temporais. Com isso foi constatado que o modelo proposto apresentou melhores resultados em quase todos os casos analisados.

Em Bertolde & Junior [2013], é feita a comparação de metodologias de previsão de peças de reposição de motores a diesel de locomotivas com o método utilizado em uma empresa de transporte ferroviário. O processo utilizado na empresa é baseado no percentual de sucateamento das peças de reposição mediante as manutenções preventivas e corretivas efetuadas ao longo de um período. Já as técnicas definidas na literatura que foram utilizadas como comparativo foram a média móvel, suavização exponencial simples [Sani & Kingsman, 1997], Holt [Holt, 2004], Croston ([Croston, 1972; Johnston & Boylan, 1996]) e o modelo ARIMA ([Box & Jenkins, 1994; Zhang, 2003]). Este estudo utilizou uma base de dados de 600 itens em um período de 42 meses. Deste período foram utilizados 36 meses como base para que as metodologias efetuassem a previsão dos outros 6 meses. O formato de avaliação se deu por meio do comparativo entre a mediana dos erros quadráticos médios (EQM) de cada uma das seis metodologias. Também foi realizado um ranqueamento dos métodos.

Como resultado deste trabalho, foi identificado que tanto na métrica de EQM quanto na métrica de ranking, a metodologia de suavização exponencial simples foi a que efetuou as melhores previsões para as demandas das peças nos 6 meses. Já a metodologia aplicada na empresa em questão apresentou os piores resultados, sendo que somente obteve maior precisão na previsão para itens com maior giro e menores variações nas quantidades utilizadas em cada demanda.

Já no trabalho de Driessen et al. [2015] é proposto um *framework* que faz o planejamento e controle de toda cadeia de suprimentos de peças de reposição. Dentre as funcionalidades propostas, o mesmo apresenta um módulo de previsão de demandas das peças de reposição, o qual avalia as entradas e seleciona o melhor método de previsão. Os modelos de previsão utilizados são a média móvel, métodos de suavização, o método de Croston e *bootstrapping*. Outro método utilizado é a previsão baseada na confiabilidade das peças, levando em consideração a taxa de falha das mesmas e extrapolando esta taxa para o ativo em que a peça está instalada juntamente com as condições variáveis de operação. Este *framework* foi validado mediante testes em uma empresa holandesa de manutenção de materiais rodantes ferroviários (NedTrain) e com outras empresas de diversas áreas da indústria, sendo demonstrada sua aplicabilidade e benefícios no processo de gestão de peças de reposição.

Todos os trabalhos supracitados focam no processo de previsão de peças de reposição utilizando diversos métodos e técnicas. Na maioria deles, os autores utilizam métodos baseados em séries temporais para efetuar esta predição. Em um deles foram utilizadas as taxas de sucateamento dos materiais, onde essa abordagem se mostrou menos eficiente em comparação com as séries temporais amplamente abordadas na literatura. Por fim foi citado um trabalho cuja previsão se baseia na manutenção e taxa de falhas dos ativos, onde essa abordagem apresentou melhores resultados que os métodos baseados em séries temporais.

Este trabalho utilizará a taxa de sucateamento das peças de reposição como forma de prever as demandas de manutenções preventivas a serem realizadas em vagões de carga geral. Essa abordagem será utilizada devido ao fato de que os dados utilizados no cenário de testes não permitem a aplicação de uma melhor técnica de geração da taxa de falha dos materiais para ser feita uma melhor previsão de demanda dos mesmos. Outro ponto importante é que a forma de geração da taxa de sucateamento pode ser alterada futuramente pois a mesma é uma entrada de dados da ferramenta implementada, não sendo necessário alterar a metodologia aplicada para comportar esta alteração. Devido a esta taxa de sucateamento ser estocástica, será aplicada uma função binomial, baseada na taxa de sucateamento, para estimar estas incertezas e transformá-las em custos de risco da falta de materiais. Esta abordagem se difere da literatura apresentada por fazer a previsão das peças e ainda mensurar o custo do risco da falta das peças. Esta forma de previsão do custo de risco da falta das peças juntamente com a previsão da necessidade de materiais por período não foi apresentada em nenhuma das bibliografias pesquisadas.

Com isso, a abordagem proposta se diferencia das demais não pela forma com que trata a previsão das demandas por peças de reposição e sim pela utilização de

uma função objetivo que foca nos custos de risco gerados pela falta de peças durante a execução das manutenções preventivas de vagões de carga geral. Além disso, outra diferença desta abordagem com os trabalhos citados anteriormente é que serão disponibilizadas várias soluções onde cada uma delas apresentará uma lista com as prioridades de compra dos materiais em cada período, podendo ser analisado quais materiais serão priorizados em cada solução e quais não serão indicados para a aquisição.

A seguir serão apresentados os materiais e métodos utilizados na implementação da ferramenta desenvolvida.

2.3 Materiais e métodos

Conforme será apresentado na seção 3.1, o modelo matemático proposto neste trabalho é um modelo de programação linear inteira (PLI). Problemas de programação linear (PL) consistem na minimização de funções de custo linear com o objetivo de alcançar o melhor resultado possível da função objetivo. Outro ponto é que as restrições também devem ser lineares do tipo igualdades e/ou desigualdades. Já a PLI consiste na utilização de variáveis com valores inteiros, sendo que esta possui nível de dificuldade similar aos problemas de PL. A diferença é que na PL o espaço de soluções é infinito, enquanto na PLI o espaço de soluções é finito. Para maiores informações, consulte [Bazaraa et al., 2011].

Por se tratar de um problema com duas funções objetivo, este é tratado como bi-objetivo ou multiobjetivo. Os algoritmos multiobjetivos otimizam simultaneamente duas ou mais funções objetivo, conseguindo encontrar um conjunto de soluções em uma única execução do algoritmo. Este conjunto de soluções é tratado como soluções de compromisso, ou soluções pareto-ótimas, pois ao melhorar o resultado de um objetivo, os demais objetivos experimentam uma piora nos seus resultados. Um aprofundamento nos conceitos de otimização multiobjetivo pode ser feito em [Chankong & Haimes, 2008].

Neste trabalho foi utilizado a técnica ϵ – *restrito* para escalarizar o problema e utilizar o solver *Gurobi*. A técnica ϵ – *restrito* consiste na transformação de problemas bi-objetivos em problemas mono-objetivo restritos, por meio da alteração de uma das funções objetivo para uma restrição do problema. Com isso, ao variar o valor de ϵ de forma paramétrica é possível gerar um conjunto eficiente de soluções para o problema a ser resolvido. Para mais informações sobre esta técnica, consulte [Haimes et al., 1971] e [Laumanns et al., 2006].

Já para o tratamento das incertezas na previsão das peças de reposição durante

as manutenções preventivas, foi utilizada uma função binomial baseada na taxa de sucateamento dos materiais. Esta distribuição binomial refere-se a taxa de sucateamento dos materiais dentro de um período t de tempo para todos os tipos de manutenções. A binomial é uma distribuição de probabilidade discreta a qual apresenta a quantidade de sucessos são obtidos em uma determinada quantidade de tentativas, sendo que os resultados podem ser apenas binários (sucesso ou fracasso, 0 ou 1, sim ou não) e que cada uma das tentativas executadas não tem dependência com as demais tentativas. Com isso, tem-se a equação 2.2 que é a base dessa distribuição [Forbes et al., 2011].

$$p(x) = \mathbb{P}[X = k] = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad (2.2)$$

Na equação (2.2), X refere-se a quantidade de sucessos obtidos nas n tentativas realizadas e p é a probabilidade de sucesso em cada ensaio. A forma de utilização desta função binomial no modelo matemático proposto será apresentada na próxima seção.

Capítulo 3

Método proposto

O método proposto para a gestão de peças de reposição de vagões de empresas de transporte ferroviário baseia-se em um modelo bi-objetivo que tem como foco a minimização do custo de compra dos materiais ao longo de um período de observação e também a minimização do custo do risco da falta das peças durante as manutenções preventivas.

Serão apresentados como resultados um conjunto de soluções Pareto-ótimas encontrado pela ferramenta, bem como uma lista dos materiais e as quantidades a serem compradas de cada um deles em cada um dos períodos de observação.

3.1 Modelo Matemático

Neste trabalho será abordado um problema bi-objetivo: a primeira função objetivo é responsável pela minimização do custo de compra dos materiais de reposição nas manutenções preventivas a serem realizadas nos vagões; já a segunda função objetivo minimiza o custo do risco da falta dos materiais durante as manutenções. Ambas podem ser vistas nas equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

$$\min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NI} c_i \cdot x_{i,t} \quad (3.1)$$

$$\min \left[\sum_{i=1}^{NI} y_i + \sum_{i=1}^{NI} \sum_{t=1}^{NT} \left[\sum_{k=D_{i,t}+1}^{NU_{i,t}} z_{i,t,k} \cdot p(F_{i,t} = k) \right] \right] \cdot L_i \quad (3.2)$$

$$p(F_{i,t} = k) = \binom{NU_{i,t}}{k} t_s^k (1 - t_s)^{NU_{i,t}-k} \quad (3.3)$$

$$L_i = CVPD * LT_i \quad (3.4)$$

Sujeito a:

$$y_i \geq \sum_{t=1}^{NT} D_{i,t} - e_{i,0} - \sum_{t=1}^{NT} x_{i,t} \quad (3.5)$$

$$Mz_{i,t,k} \geq k - e_{i,t} \quad (3.6)$$

$$e_{i,t} - \alpha_{i,t} = e_{i,t-1} + x_{i,t} - D_{i,t} \quad (3.7)$$

$$e_{i,t} \leq M\beta_{i,t} \quad (3.8)$$

$$\alpha_{i,t} \leq M(1 - \beta_{i,t}) \quad (3.9)$$

$$e_{i,t} \geq 0 \quad (3.10)$$

$$\alpha_{i,t} \geq 0 \quad (3.11)$$

$$\beta_{i,t} \in \{0, 1\} \quad (3.12)$$

$$y_i \geq 0 \quad (3.13)$$

$$z_{i,t,k} \in \{0, 1\} \quad (3.14)$$

$$x_{i,t} \geq 0, \in \mathbb{Z} \quad (3.15)$$

$$M = 2(\max(D_{i,t}) + 1) + e_{i,0} \quad (3.16)$$

Tendo como parâmetros de entrada da ferramenta:

c_i : custo unitário do material i ;

NT : número total de períodos;

NI : número total de tipos de materiais;

$CVPD$: custo diário do vagão parado;

$e_{i,0}$: estoque inicial do material i ;

Parâmetros calculados pela ferramenta:

$D_{i,t}$: demanda esperada do material i no período t ;

L_i : prejuízo causado pela falta do material i . Este valor é dado pela equação (3.4) a qual considera o custo diário do vagão parado (parâmetro $CVPD$) multiplicado pelo parâmetro LT_i , que é o menor *lead time* do material i dentre os todos os fornecedores deste material;

$NU_{i,t}$: quantidade máxima de materiais i a serem trocados no período t , o que corresponde a necessidade de substituição de todos os materiais do tipo i contidos nos vagões a serem mantidos no período t ;

$p(Fi, t = k)$: parâmetro referente ao valor da função binomial do material i no período t para o valor do parâmetro k ;

M : parâmetro responsável por armazenar um valor suficientemente grande para que se possa definir o limite máximo de uma das variáveis $e_{i,t}$ ou $\alpha_{i,t}$. Este parâmetro deve ser grande o suficiente para suportar os valores de $e_{i,t}$ ou $\alpha_{i,t}$, porém não pode ser muito grande para não enfraquecer o modelo.

Já as variáveis do modelo são listadas a seguir:

$x_{i,t}$: quantidade de materiais i a serem comprados no período t ;

y_i : variável que recebe valor máximo entre 0 e $\sum_{t=1}^{NT} D_{i,t} - e_{i,0} - \sum_{t=1}^{NT} x_{i,t}$ para cada um dos materiais i ;

$e_{i,t}$: estoque do material i no período t ;

$z_{i,t,k}$: variável binária que recebe 1 se a subtração do contador k por $e_{i,t}$ for positivo ou 0, caso contrário;

$\alpha_{i,t}$: variável auxiliar responsável por fazer com que o valor de $e_{i,t}$ sempre receba o valor 0 ou o valor da equação: $(e_{i,t-1} + x_{i,t} - D_{i,t})$ caso o resultado da mesma seja maior que 0.

Para efetuar o cálculo da demanda dos materiais ($D_{i,t}$), foram utilizadas informações das demandas variáveis de cada um dos tipos de manutenções a serem realizadas em cada um dos períodos. Para tanto, foi levantado quantas manutenções básicas, intermediárias e gerais seriam realizadas em cada um dos períodos do ciclo de manutenções. Com isso foram calculadas as quantidades de peças a serem gastas em cada período através da multiplicação da taxa de sucateamento da mesma em cada tipo de manutenção pela quantidade dos planos de manutenção a serem realizados no período conforme apresentado na equação (3.17).

$$QtdeCalculada_{i,t} = \sum_{p=1}^3 NU_{i,t} \cdot ts_{i,t,p} \cdot QtdeManut_{t,p}, \forall i \in NI, \forall t \in NT \quad (3.17)$$

Onde:

p : tipo de manutenção preventiva, podendo ser básica (1), intermediária (2) ou geral (3);

$ts_{i,t,p}$: taxa de sucateamento do material i no período t para a manutenção preventiva p ;

$QtdeManut_{t,p}$: quantidade de manutenções preventivas do tipo p a serem realizadas no período t .

O cálculo da quantidade de materiais a serem substituídos em cada um dos períodos tem como resultado um valor decimal devido a utilização da taxa de sucateamento dos materiais cujo valor também é decimal. Contudo, não é possível efetuar a aquisição de uma quantidade decimal de peças, somente pode ser feita a aquisição de valores inteiros. Sendo assim, foi definida uma regra de arredondamento conforme descrito a seguir:

- O primeiro passo é calcular a quantidade de demanda do material em cada um dos períodos utilizando a equação (3.17);
- Posteriormente é feito o arredondamento (sempre para cima) do valor decimal calculado da demanda do material no primeiro período;
- O valor gasto para arredondar a demanda para cima é enviado para o próximo período para ser descontado da demanda decimal já calculada;

- Subtrai-se o valor da demanda do período subsequente pelo valor arredondado no período anterior e o resultado é arredondado novamente para cima. Caso este valor seja negativo, o mesmo será arredondado para 0;
- Repete-se os procedimentos anteriores até que seja calculado o valor inteiro da demanda do material em todos os períodos do ciclo de manutenções.

Tabela 3.1. Cálculo da demanda dos materiais por período

	Períodos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Qtde Calculada	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Demanda Atual	0,3	-0,4	-0,1	0,2	-0,5	-0,2	0,1	-0,6	-0,3	0	0,3	-0,4
Demanda Calculada	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Qtde Arredondada	0,7	0,4	0,1	0,8	0,5	0,2	0,9	0,6	0,3	0	0,7	0,4

Este cálculo de demanda pode ser exemplificado pela Tabela 3.1 a qual apresenta o quadro de arredondamentos de apenas uma peça. Nele pode ser visto que o valor de demanda calculado pela taxa de sucateamento de uma peça é de 0,3 peças em cada um dos 12 períodos (linha "Qtde Calculada"). A linha "Demanda Atual" refere-se ao valor da quantidade calculada menos o valor da linha "Quantidade Arredondada" do período anterior. Já a linha "Demanda Calculada" é dada pelo arredondamento (para cima) do valor da linha "Demanda Atual". Com isso, a linha "Demanda Calculada" define o valor real da demanda da peça em todos os períodos. Com a demanda dos materiais já calculada, o próximo passo é calcular a segunda função objetivo do modelo.

A equação 3.2 apresenta o custo do risco de falta dos materiais durante o processo de manutenção dos vagões, a qual se divide em duas partes. A primeira parte refere-se ao custo do risco quando o somatório da quantidade de materiais comprada somada ao seu estoque inicial da peça são menores que o somatório da demanda do material em todos os períodos.

Esse valor obtido na primeira parte da equação é maior que o valor encontrado na segunda parte da equação devido ao fato de que se for comprada uma quantidade de materiais menor que a demanda definida pela taxa de sucateamento, a probabilidade de faltar materiais durante as manutenções preventivas é muito maior do que a probabilidade de haver uma demanda de troca de peças superior à demanda determinada pela taxa de sucateamento.

Já a segunda parte da equação trata da probabilidade de falta do material, que depende de:

- $z_{i,t,k}$;

- distribuição binomial apresentada na equação 3.3.

A taxa de sucateamento dos materiais é calculada a partir das informações coletadas durante as manutenções realizadas no ano anterior. Porém a demanda real pode variar, fazendo com que não se tenha peças suficientes para efetuar a manutenção. Para tratar a incerteza contida na previsão de gastos dos materiais dada por dessa taxa, foi modelada a distribuição binomial conforme a equação (3.3).

Esta equação é utilizada dentro de um somatório que vai de $k = D_{i,t} + 1$ até $NU_{i,t}$. Isso significa que será calculada a distribuição binomial do material i no período t para cada um dos k valores maiores que a demanda estipulada pela taxa de sucateamento ($D_{i,t}$) até chegar a demanda máxima do material, que é dada por $NU_{i,t}$. Com isso será contabilizado o valor do custo de risco da falta do material i no período t para todos materiais que estiverem acima da quantidade em estoque do mesmo naquele período.

Com o valor de k definido como um contador incremental, faz-se necessário calcular a função binomial para cada entrada possível. Este cálculo é feito utilizando a equação (3.3), sendo que a mesma possui os seguintes dados:

- $F_{i,t}$: quantidade de materiais i que necessitam ser substituídos no período t ;
- $NU_{i,t}$: quantidade máxima de materiais i a serem trocados no período t , o que corresponde a necessidade de substituição de todos os materiais do tipo i contidos nos vagões a serem mantidos no período t ;
- ts : taxa de sucateamento do material, a qual foi detalhada na seção 2.1.3.

Todas as funções binomiais foram pré processadas para todos os materiais em todos os períodos, fazendo com que o modelo proposto permanecesse como um modelo de programação linear inteira mista.

Por fim é feito o somatório das duas partes da equação e o resultado obtido neste somatório é multiplicado por L_i , que é o valor do prejuízo do ativo parado. O valor obtido deste cálculo refere-se ao custo total da equação (3.2).

As demais equações apresentadas são referentes as restrições do problema, cujos papéis são os seguintes:

- **Equações 3.5 e 3.13:** definir que a variável y_i receberá o maior valor entre 0 e o valor do somatório de todas as demandas do material i , subtraindo o somatório da quantidade de materiais a serem comprados ($\sum_{t=1}^{NT} x_{i,t}$) e o estoque inicial do material ($e_{i,0}$). Com isso, a função objetivo 2 somente terá sua primeira parte penalizada quando a demanda mapeada para o material for superior ao estoque inicial das peças somado a quantidade total do material a ser comprada;

- **Equações 3.6 e 3.14:** garantir que a variável $z_{i,t,k}$ receberá o valor 0 ou 1 para ativar a penalização da segunda parte da função objetivo (3.2). Esta variável somente irá receber o valor de 1 caso a subtração do valor do contador k (que representa os valores acima da demanda do período até o número máximo de demandas do material) pelo estoque atual do material resulte em um valor positivo. Isso indica que, a partir desse momento, o estoque da peça não suporta mais as demandas acima do programado, gerando assim um valor de risco devido à probabilidade de falta dos materiais no período;
- **Equações 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12:** garantir que a variável $e_{i,j}$ receberá o valor do estoque atual do material i dado pela soma do estoque anterior ($e_{i,t-1}$) com a quantidade de materiais a ser comprada no período ($x_{i,t}$) e subtraindo este valor pela demanda atual do mesmo material ($D_{i,t}$). Além disso, estas restrições também garantem que este valor nunca será menor que 0. Caso o cálculo receba o valor negativo, este valor será atribuído para a variável $\alpha_{i,t}$ e a variável $e_{i,t}$ receberá 0;
- **Equação 3.15:** permitir que a variável $x_{i,t}$ receba somente valores discretos maiores ou iguais a 0;
- **Equação 3.16:** definir um valor para o parâmetro M que seja suficientemente grande para acomodar o limite máximo da variável de estoque atual, evitando que sejam compradas quantidades muito maiores que a necessidade real dos materiais. De acordo com [Camm et al., 1990], esta escolha de um valor muito grande de M pode expandir de forma desnecessária a região de busca do algoritmo, fazendo com que o mesmo se torne mais lento pelo fato de ser necessário buscar resultados em uma área maior. Por isso é necessário definir um valor de M que não afete a região factível mas que guie a pesquisa para uma região reduzida de busca.

3.2 Ferramenta Proposta

Com o modelo matemático definido, o próximo passo é efetuar a otimização do modelo a fim de encontrar as soluções para o problema. Por se tratar de um modelo de programação linear inteira mista (PLIM), foi desenvolvido um algoritmo que utiliza o *solver Gurobi* ([Gu et al., 2019]) e a linguagem de programação *C#* para sua solução.

Devido a modelagem matemática ser baseada em programação linear inteira mista, foi possível utilizar o *solver Gurobi* para implementação da ferramenta. Para tanto, foi efetuada a integração com a linguagem de programação *C#* juntamente

com o *framework* Asp.Net Core da *Microsoft*. A integração entre o *Gurobi* e a aplicação foi feita através da utilização de uma biblioteca de vínculo dinâmico (do inglês *Dynamic-link library* ou *DLL*) disponibilizada por este *solver*. Com a integração entre as tecnologias já realizada, foi efetuada a implementação do algoritmo. Por se tratar de uma problemas multiobjetivo, foi necessário utilizar a técnica de épsilon-restrito (ϵ - *restrito*) ([Haimes et al., 1971] e [Laumanns et al., 2006]).

A aplicação do ϵ - *restrito* foi feita de forma que a equação (3.2) foi selecionada como o objetivo a ser solucionado e a equação (3.1) foi transformada em restrição do problema. Para melhor visualização dos resultados, foi definido que somente serão exibidas 17 soluções na fronteira Pareto-ótima. Isso fez com que o processamento das otimizações fosse reduzido e, conseqüentemente, reduzisse o tempo de execução da ferramenta para encontrar o resultado final. A forma com que a quantidade de soluções e o espaçamento entre elas foram definidos será detalhada na seção 4.2.

Com os métodos e tecnologias definidos, foi possível implementar o algoritmo e obter os resultados esperados. Todo o processo de execução do mesmo pode ser visto na figura 3.2, a qual apresenta um fluxograma de execução da ferramenta desenvolvida.

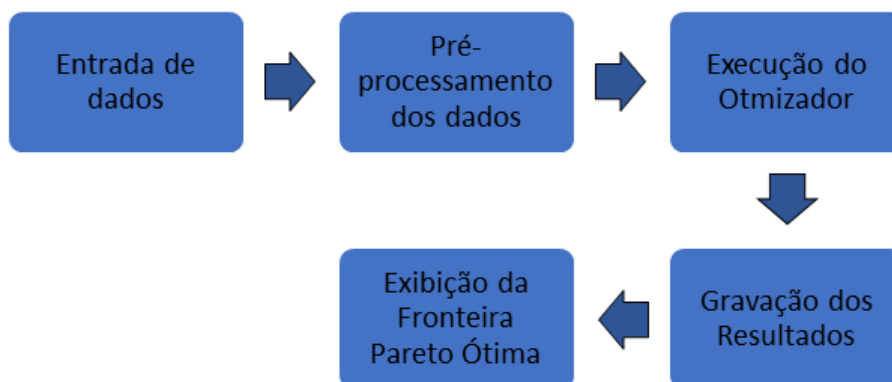


Figura 3.1. Fluxograma do algoritmo de otimização

O fluxograma da figura 3.2 é dividido nas seguintes etapas:

1. **Entrada de dados:** nesta etapa os dados a serem processados são inseridos no algoritmo por meio de arquivos ".csv". Estas entradas são realizadas por meio de dois arquivos: i) arquivo de dados dos materiais, contendo o código, descrição, taxa de sucateamento para cada um dos tipos de manutenção, o código de cada fornecedor, o *lead time* de cada fornecedor e o preço de venda de cada fornecedor; ii) arquivo de planos, onde são enviados os tipos e quantidades de plano de manutenção em cada um dos períodos a serem otimizados;

2. **Pré-processamento das informações:** nesta etapa são feitos os processamentos das informações de entrada para construção dos modelos de programação linear inteira mista. Nesta etapa são calculados todos os valores das demandas de cada um dos materiais em cada um dos períodos e também são calculados os valores das funções binomiais utilizadas no modelo para cada um dos materiais;
3. **Execução do otimizador:** após o pré-processamento dos dados, o modelo de otimização é construído para a execução do *Gurobi*. Com isso, são feitas as otimizações de todos os objetivos individuais de acordo com o método ϵ -restrito;
4. **Gravação dos resultados:** com a execução da otimização realizada, são gravados em arquivos ".csv". Os resultados de cada uma das soluções pareto ótimas bem como os dados de quantidade de compra para cada um dos materiais em cada um dos períodos de observação;
5. **Exibição da fronteira pareto ótima:** por fim é apresentado o gráfico onde é exibida a fronteira pareto ótima encontrada, possibilitando a visualização e escolha da solução que melhor anteder ao *trade-off* entre custo e risco.

A execução deste algoritmo foi realizada e todos os resultados foram obtidos em sua otimalidade e com um tempo computacional aceitável, o qual será detalhado na seção 4.2. Os dados utilizados nesta execução foram extraídos de um cenário real de uma empresa de transporte ferroviário para um fluxo cativo de enxofre e fosfato.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

O algoritmo de otimização foi executado para dados da empresa VLI, os quais foram selecionados de acordo com um cenário em que fosse possível validar os resultados obtidos pela ferramenta e verificar a sua eficiência.

4.1 Estudo de Caso

Com o intuito de validar a ferramenta implementada, foi escolhido um cenário controlado da empresa VLI, em que os vagões utilizados são todos do modelo HPE e estão rodando continuamente carregados em um trecho fixo.

Os produtos transportados neste fluxo são o enxofre e fosfato. Neste fluxo, todos os vagões partem do terminal TIPLAM carregados de enxofre e descarregam o produto no cliente A. Após isso esses mesmos vagões são carregados de fosfato e retornam para o TIPLAM. Também se encontra neste trecho a oficina onde os vagões sofrem manutenção, a qual está localizada na cidade de Goiandira/GO, próximo ao cliente A. Todo este trajeto é apresentado na figura 4.1.

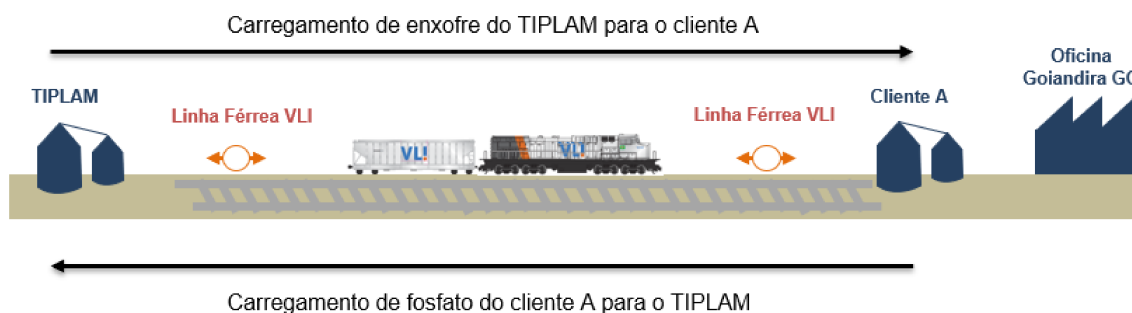


Figura 4.1. Fluxo de transporte de enxofre e fosfato com vagões HPE.

Tendo o fluxo de transporte definido, o próximo passo é determinar quantos vagões serão utilizados e quais tipos de manutenção cada um deles receberá. Os dados das manutenções utilizados na execução da ferramenta são referentes às preventivas realizadas no ano de 2018 na oficina de Goiandira. A quantidade de manutenções executadas neste período foi definida levando em consideração o planejamento de manutenções anual, priorizando de forma igualitária o custo de manutenção e a confiabilidade dos vagões. Com isso foram mapeados 290 vagões a serem mantidos conforme pode ser visto na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Lista de manutenções preventivas a serem realizadas por período

Período	Quantidade de manutenções		
	Básica	Intermediária	Geral
1	25	2	4
2	23	4	4
3	18	2	4
4	15	10	0
5	22	0	4
6	4	0	4
7	25	2	4
8	23	4	4
9	18	2	4
10	15	10	0
11	22	0	4
12	4	0	4
Total	214	36	40

A tabela 4.1 apresenta uma lista de quantas manutenções foram realizadas em cada um dos 12 períodos do ano de 2018. Para cada período (mês) é apresentada a quantidade de manutenções preventivas básicas, intermediárias e gerais foram realizadas. Esta definição foi feita pela empresa de acordo com as demandas já mapeadas para este fluxo de transporte e a disponibilidade de parada dos vagões em cada um dos meses. Também foi levada em consideração a capacidade da oficina para realização destas manutenções.

Devido ao custeio disponibilizado pela empresa, pode ser visto que o enfoque foi dado nas manutenções básicas, as quais não possuem nenhum material de troca obrigatória. Todas as peças possuem uma taxa de sucateamento, a qual foi calculada com base na quantidade de peças substituídas durante as manutenções do ciclo de 2017. Isso foi feito devido ao fato de que a empresa possui somente os dados de 2017 para levantamento das taxas de sucateamento das peças, não sendo possível aplicar uma melhor técnica para geração desta informação. Os demais tipos de manutenção

tiveram uma quantidade muito próxima entre si, sendo 36 manutenções intermediárias e 40 gerais. A distribuição das manutenções em cada um dos períodos de 2018 foi feita levando em consideração a capacidade da oficina e o planejamento estratégico da empresa.

Em todas as manutenções são realizadas as trocas condicionais e/ou obrigatórias dos materiais contidos nos vagões. Para cada um desses materiais foi efetuado o levantamento das informações necessárias para executar a otimização. Essas são listadas a seguir:

- Descrição: texto descritivo do material;
- Qtde por Vagão: quantidade do material utilizada em cada vagão;
- Tx. Suc. Geral: taxa de sucateamento do material quando submetido o vagão a uma manutenção geral. Esta taxa é dada pelo percentual de peças trocadas em todas as manutenções gerais do ciclo anterior de manutenções;
- Tx. Suc. Interm.: taxa de sucateamento do material quando submetido o vagão a uma manutenção intermediária. Esta taxa é dada pelo percentual de peças trocadas em todas as manutenções intermediárias do ciclo anterior de manutenções;
- Tx. Suc. Básica: taxa de sucateamento do material quando submetido o vagão a uma manutenção básica. Esta taxa é dada pelo percentual de peças trocadas em todas as manutenções básicas do ciclo anterior de manutenções;
- Estoque Inicial: quantidade já armazenada do material no início do período de otimização;
- Fornecedor: texto contendo o nome do fornecedor. Este texto foi parametrizado para manter em sigilo os nomes dos fornecedores da VLI;
- Custo: valor pago na compra de uma unidade do material junto ao fornecedor. Este valor foi normalizado para fins de sigilo de informações da VLI;
- *Lead Time*: tempo gasto (em dias) para a entrega do material na VLI.

Estes dados foram tabulados e utilizados como dados de entrada da ferramenta de otimização. Cada uma das linhas desta tabela refere-se a um material e um fornecedor único. Com isso, caso haja um material com três fornecedores, serão encontradas três linhas com as mesmas informações do material (descrição, quantidade por vagão, taxas de sucateamento e estoque inicial), sendo alterados somente os dados das colunas

"Fornecedor", "Custo" e "Lead Time". A tabela 4.2 apresenta uma versão resumida dos dados de entrada dos materiais.

Tabela 4.2. Dados de materiais para entrada do algoritmo

Descrição	Qtde por vagão	TX Suc. Geral(%)	TX Suc. Interm(%)	TX Suc. Básica(%)	Estoque Inicial	Fornecedor	Custo	Lead time (dias)
ENGATE	2	0,0100	0,0015	0,0005	4	Fornecedor A	1,00000	90
MANDIBULA	2	1,0000	0,1000	0,0500	4	Fornecedor A	0,23277	150
PINO DA MANDIBULA	2	1,0000	1,0000	0,0050	31	Fornecedor F	0,02701	115
PINO DA MANDIBULA	2	1,0000	1,0000	0,0050	14	Fornecedor C	0,05289	30
PINO DA MANDIBULA	2	1,0000	1,0000	0,0050	17	Fornecedor D	0,00362	123
CASTANHA	2	1,0000	0,0750	0,0070	4	Fornecedor A	0,13272	35
CASTANHA	2	1,0000	0,0750	0,0070	25	Fornecedor E	0,02912	118
ROTOR DO ENGATE	2	1,0000	0,0750	0,0070	9	Fornecedor B	0,02717	64
ROTOR DO ENGATE	2	1,0000	0,0750	0,0070	25	Fornecedor E	0,03328	24
CRUZETA DO ACT	2	1,0000	0,0100	0,0001	25	Fornecedor E	0,09188	46
PINO "T"	2	0,1000	0,1000	0,0500	25	Fornecedor E	0,00921	62
PINO DO PIAO	2	0,5000	0,2000	0,0200	25	Fornecedor E	0,01691	35
DISCO PRATO PIAO	2	0,3000	0,3000	0,0050	9	Fornecedor B	0,27547	56
DISCO PRATO PIAO	2	0,3000	0,3000	0,0050	14	Fornecedor C	0,39585	56
CHAPA DE DESGASTE	8	1,0000	1,0000	0,1000	25	Fornecedor E	0,00136	27

Na tabela completa constam 88 tipos de materiais distintos, os quais são os principais materiais utilizados nas manutenções preventivas e nos controles realizados na VLI. As demais peças são consideradas itens de consumo, as quais possuem custo reduzido e são compradas em grandes quantidades, sendo efetuada apenas uma compra inicial para suprir as necessidades de todo o ciclo de manutenções.

Com as informações de entrada já definidas, a próxima etapa realizada pela ferramenta de otimização é o processamento destes dados. De acordo com a tabela 4.1, serão realizadas manutenções em um ciclo de 12 períodos. Para cada um destes períodos foi determinada a quantidade de manutenções a serem realizadas. Com isso é possível efetuar o cálculo da quantidade de peças que serão necessárias em cada um dos períodos. Isso é possível pois tem-se a taxa de sucateamento de cada um dos materiais em cada um dos tipos de manutenção. Essas taxas de sucateamento podem ser valores decimais, os quais indicam que o material possui troca condicional ou então podem possuir o valor 1, o que indica a troca obrigatória do material.

O cálculo da quantidade de peças a serem trocadas de forma obrigatória é feita separadamente pela ferramenta, não sendo necessário nenhum tipo de otimização para tal. Com isso a ferramenta de otimização leva em consideração somente os materiais que possuem a taxa de sucateamento menor que 1. Esta separação entre trocas obrigatórias e trocas condicionais é o primeiro pré-processamento realizado pela ferramenta. Outro processamento inicial realizado é o cálculo dos valores da função binomial (equação (3.3)), os quais serão utilizados dentro da função objetivo apresentada na equação (3.2).

Após definir o cenário a ser avaliado, os testes foram realizados utilizando-se um notebook com as seguintes configurações: i) sistema operacional *Windows 10 Enterprise*; ii) processador Intel Core I5 2,5GHz; iii) memória RAM de 8GB. O tempo computacional médio gasto para que a ferramenta encontrasse 17 soluções ótimas foi de 4 horas, perfeitamente compatível com a aplicação.

4.2 Resultados Computacionais

Conforme pode ser visto na figura 4.2, a fronteira Pareto-ótima obtida é composta por 17 soluções, as quais são suficientes para obtenção de diversos cenários de aplicação das políticas de compra de materiais de reposição. O controle do tamanho desse conjunto foi feito por meio do ajuste do parâmetro ϵ no modelo ϵ – *restrito*, transformando a função objetivo (3.1) em restrição.

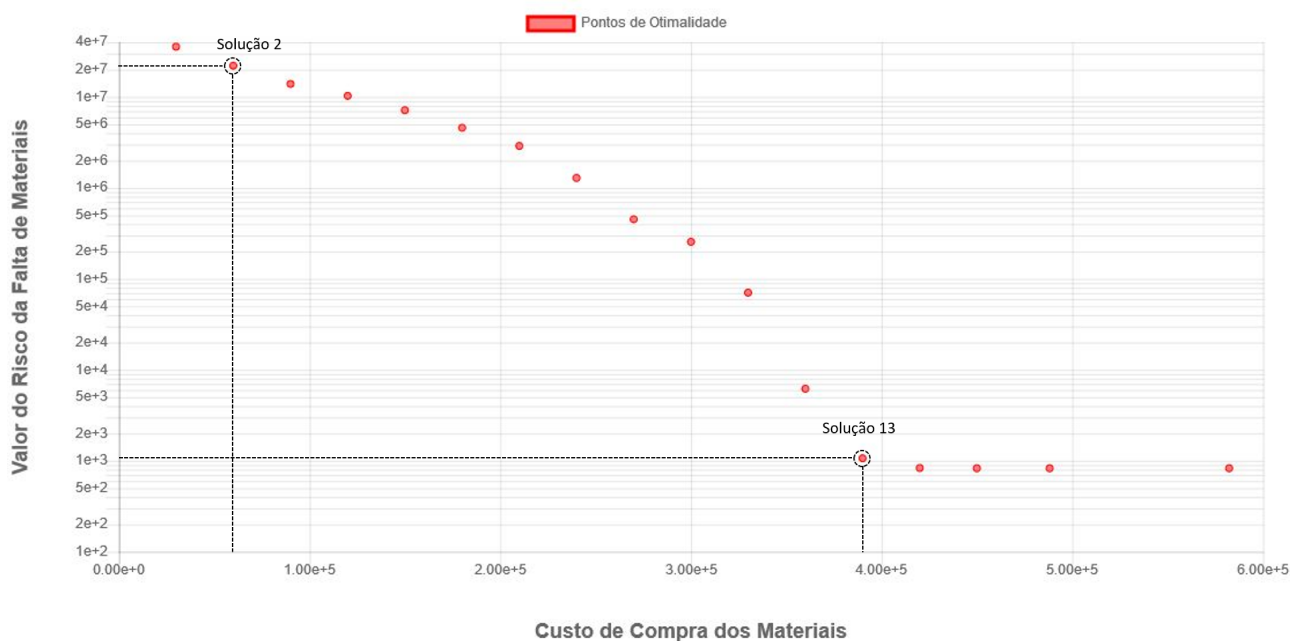


Figura 4.2. Fronteira pareto ótima com as soluções 2 e 13 selecionadas.

Conforme pode ser observado, quanto maior o custo do risco da falta de materiais, menor é o custo investido na compra dos mesmos. A medida que o custo de compra dos materiais é incrementado, existe uma redução expressiva em relação ao custo do risco. Considerando como primeira solução àquela que está mais à esquerda do gráfico da figura 4.2, pode ser observado que a partir da décima terceira solução a redução do risco se torna menos expressiva, mesmo com o aumento do custo de compra das

Tabela 4.3. Tabela de resultados da fronteira pareto

Solução	Custo de Compra dos Materiais	Valor do Risco da Falta de Materiais
1	3.00E+04	3.57E+07
2	6.00E+04	2.21E+07
3	9.00E+04	1.39E+07
4	1.20E+05	1.03E+07
5	1.50E+05	7.16E+06
6	1.80E+05	4.59E+06
7	2.10E+05	2.90E+06
8	2.40E+05	1.29E+06
9	2.70E+05	4.52E+05
10	3.00E+05	2.56E+05
11	3.30E+05	7.06E+04
12	3.60E+05	6.20E+03
13	3.90E+05	1.06E+03
14	4.20E+05	8.33E+02
15	4.50E+05	8.28E+02
16	4.88E+05	8.28E+02
17	5.82E+05	8.28E+02

peças. Isso também pode ser visto na tabela 4.3. Esta diminuição expressiva ocorre nas primeiras soluções devido ao fato de que existem alguns materiais cujo *lead time* é muito alto. Um exemplo disso é a mandíbula para engate tipo "E" de 15", a qual possui um tempo de entrega de 150 dias. Sendo assim, ao se optar pela compra da mesma para atendimento de todas as demandas, o custo de risco será diminuído consideravelmente. Já um item como a mola interna modelo D3 possui um *lead time* de 1 dia. Isso faz com que este material não gere muito custo de risco pois a falta do mesmo impactará em apenas 1 dia de imobilização. Dessa forma, materiais com menor tempo de entrega afetam de forma menos relevante no custo do risco pois o valor de L_i será menor.

Um dos resultados obtidos com a ferramenta é a lista de priorização de compra dos materiais para cada uma das soluções. Sendo assim, foram selecionadas duas soluções para avaliação, conforme pode ser visto na figura 4.2. Uma lista resumida de priorização de compra dos materiais para a solução 2 pode ser vista na tabela 4.4. Já a tabela 4.5 apresenta os resultados para a solução 13.

Ao comparar as duas listas de materiais pode ser observado que a quantidade de peças a serem compradas na solução 13 é muito superior à lista da solução 2. Isso se dá devido a diferença entre o custo de compra dos materiais de cada uma das soluções. Para a solução 13 esse custo é muito superior ao custo aplicado à solução 2, porém,

Tabela 4.4. Lista de materiais da solução 2 e as quantidades a serem compradas por período

Material	Períodos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ENGATE COMPLETO TIPO E 6.1/4 X 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MANDÍBULA ENGATE TIPO E 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PINO DA MANDIBULA E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CASTANHA PARA ENGATE TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ROTOR DO ENGATE TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HASTE DE MANOBRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CRUZETA AC TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAVETA PARA ENGATE 6 1/4 X 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PINO T DE RETENÇÃO DA CHAVETA	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PINO DO CENTRO PIÃO FCA	5	23	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0
DISCO SOLTO PRATO PIÃO 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAPA DE DESGASTE CUNHA	62	5	28	12	0	21	19	0	0	0	0	0
MOLA EXTERNA CUNHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MOLA INTERNA CUNHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MOLA INTERNA D3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADAPTADOR CONVENCIONAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOPADOR ROLAMENTO 6 .1/2	38	0	24	0	0	18	0	0	0	0	0	0
SUP. DO BOCAL ENGATE CEGO F	0	20	12	8	4	0	9	7	5	0	0	0
ABRACADEIRA ENGATE TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DISCO DE DESGASTE MANGA E 14"	24	13	9	0	9	8	8	9	1	0	0	0
CUNHA DE FRICÇÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TRIANGULO DE FREIO CVRD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAPA DE DESGASTE GUIA	20	5	4	0	7	3	3	0	0	0	0	0

com o maior investimento, tem-se a redução considerável no custo do risco de falta de materiais.

Com o intuito de auxiliar a forma com que é feita a análise de cada uma das soluções encontradas, foi criada uma tabela de detalhamento de cada uma das soluções. Esta é uma tabela de previsão de consumo de materiais de acordo com a previsão de gastos feita pela taxa de sucateamento da mesma. Nessa tabela são calculadas as quantidades necessárias de cada material em cada período e é feito um somatório de todos os itens a serem comprados em cada um dos períodos.

Essa forma de validação das quantidades estimadas de materiais a serem gastos apresenta uma visão da quantidade de materiais que irá faltar em cada período de acordo com a indicação da ferramenta de quantos materiais devem ser comprados. Para isso o cálculo parte do estoque inicial da peça e começa a subtrair a quantidade de peças mapeadas para serem substituídas a cada período. Também é feita a soma da quantidade do material mapeada para ser comprada no período. Caso o saldo desta conta seja negativo, isso significa que naquele período haverá a falta do material caso o consumo real seja condizente com a taxa de sucateamento.

Tabela 4.5. Lista de materiais da solução 13 e as quantidades a serem compradas por período

Material	Períodos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ENGATE COMPLETO TIPO E 6.1/4 X 8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MANDÍBULA ENGATE TIPO E 15	14	3	2	2	3	1	3	4	2	2	0	0
PINO DA MANDIBULA E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CASTANHA PARA ENGATE TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ROTOR DO ENGATE TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HASTE DE MANOBRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CRUZETA AC TIPO E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHAVETA PARA ENGATE 6 1/4 X 8	23	21	8	6	9	2	10	2	0	0	0	0
PINO T DE RETENÇÃO DA CHAVETA	14	4	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
PINO DO CENTRO PIÃO FCA	0	36	4	0	13	0	2	0	0	0	0	0
DISCO SOLTO PRATO PIÃO 14	6	17	4	6	2	0	0	0	0	0	0	0
CHAPA DE DESGASTE CUNHA	62	19	4	0	40	3	20	0	16	17	0	0
MOLA EXTERNA CUNHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MOLA INTERNA CUNHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MOLA INTERNA D3	0	193	23	0	0	0	0	109	0	0	0	0
ADAPTADOR CONVENCIONAL	20	14	9	0	43	0	0	19	0	0	0	0
TOPADOR ROLAMENTO 6 .1/2	38	12	0	0	24	12	12	0	0	0	9	0
SUP. DO BOCAL ENGATE CEGO F	20	12	5	8	4	3	6	7	6	7	0	0
ABRACADEIRA ENGATE TIPO E	14	5	2	5	2	0	3	4	2	4	0	0
DISCO DE DESGASTE MANGA E 14"	24	13	9	0	9	8	8	9	8	0	9	3
CUNHA DE FRICÇÃO	44	26	17	0	18	16	17	17	16	0	18	2
TRIANGULO DE FREIO CVRD	14	3	2	4	1	1	2	2	2	1	0	0
CHAPA DE DESGASTE GUIA	20	5	4	2	5	3	5	5	5	0	1	0

O valor obtido no cálculo no primeiro período é repassado para o próximo período, sendo feito o somatório da quantidade de materiais a serem adquiridos e subtraindo a quantidade de materiais a serem consumidos. Isso é feito para todos os períodos e, ao final dos períodos, tem-se a quantidade de períodos que podem apresentar falta de materiais.

Ao selecionar a solução 2, que possui custo de risco da falta de materiais no valor de $2,21e + 07$ e um custo de compra de materiais de $6,00e + 04$, é apresentada uma listagem de todos os materiais e os resultados da validação de cada um deles com relação ao atendimento da demanda definida pela taxa de sucateamento. A tabela 4.6 apresenta uma lista resumida de materiais e seus resultados. Para esta solução pode ser visto que houveram 85 situações em que se obteve um valor de material menor que o valor definido pela taxa de sucateamento. Esse valor é o somatório de todos os períodos de todos os materiais em que a quantidade em estoque somada a quantidade mapeada para ser comprada não foram suficientes para cobrir a demanda estimada do mesmo. Para cada material é apresentada essa quantidade de períodos com falta da peça na coluna denominada "Qtde Situações Falta Mat.". Também na tabela são

Tabela 4.6. Lista de materiais da solução 2 e seus quantitativos por período

Material	Qtde Situações Falta Mat.	Períodos											
		P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	P.12
ENGATE COMPLETO TIPO E 6.1/4	10	2	0	-1	-1	-5	-5	-7	-9	-10	-10	-14	-14
MANDÍBULA ENGATE TIPO E 15	4	4	4	1	1	1	1	1	1	-2	-2	-2	-2
PINO DA MANDIBULA	0	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
CASTANHA PARA ENGATE TIPO E	0	29	29	29	25	21	21	21	21	21	17	13	13
ROTOR DO ENGATE TIPO E	0	34	34	28	25	21	19	19	19	13	10	6	4
HASTE DE MANOBRA	0	46	46	46	46	44	44	44	44	44	44	42	42
CRUZETA AC TIPO E	0	25	25	25	23	23	23	23	23	23	21	21	21
CHAVETA PARA ENGATE 6 1/4 X 8	1	25	25	25	25	24	12	12	12	12	11	-1	
PINO T DE RETENÇÃO DA CHAVETA	0	25	40	40	40	40	32	32	32	32	32	32	24
PINO DO CENTRO PIAO FCA	4	53	53	37	14	11	7	7	7	-9	-32	-27	-31
DISCO SOLTO PRATO PIAO 14	7	23	23	21	3	3	-1	-1	-1	-3	-21	-21	-25
CHAPA DE DESGASTE CUNHA	0	80	106	120	108	138	85	93	104	104	92	92	36
MOLA EXTERNA CUNHA	0	83	83	83	83	83	51	51	51	51	51	51	19
MOLA INTERNA CUNHA	0	74	74	74	74	74	66	66	66	66	66	66	58
MOLA INTERNA D3	9	140	140	38	-25	-57	-63	-63	-63	-165	-228	-260	-266
ADAPTADOR CONVENCIONAL	8	41	41	41	41	-7	-15	-15	-15	-15	-15	-63	-71
TOPADOR ROLAMENTO 6 .1/2	0	55	88	88	88	56	87	87	87	87	87	55	55
SUP. DO BOCAL ENGATE CEGO F	7	2	9	9	5	-5	-4	2	-4	-11	-23	-37	-39
ABRACADEIRA ENGATE TIPO E	12	-2	-6	-6	-6	-6	-6	-10	-14	-14	-14	-14	-14
DISCO DE DESGASTE MANGA E 14'	10	9	1	-3	-3	-10	-14	-25	-37	-49	-49	-65	-77
CUNHA DE FRICÇÃO	0	52	78	95	95	109	77	91	91	91	91	87	39
TRIANGULO DE FREIO CVRD	11	2	-2	-8	-10	-12	-12	-14	-18	-24	-26	-28	-28
CHAPA DE DESGASTE GUIA	2	28	33	17	19	18	21	24	24	4	4	-2	-2

pintados de vermelho os períodos em que existe essa pendência de materiais.

Ao analisar esta tabela, pode ser visto que o material "ABRACADEIRA ENGATE TIPO E" apresenta os 12 períodos negativados. Isso indica que em todos os períodos esta peça têm um consumo estimado maior que a quantidade mapeada pela ferramenta para aquisição. Neste caso, pode se afirmar que a mesma não foi priorizada para esta solução. Já avaliando a peça "ROTOR DO ENGATE TIPO E" a mesma está com os valores positivos em todos os períodos. Isso mostra que esta peça foi priorizada e que a chance de falta da mesma é muito baixa, visto que a quantidade a ser comprada supre a necessidade mapeada pela taxa de sucateamento. Existem também outras peças com priorização intermediária, as quais apresentam períodos com quantidades positivas e também períodos negativados.

Já a solução 13 possui um custo de risco de $1,06e + 03$ e um custo de compra de materiais de $3,90e + 05$. Ao se comparar estes resultados com os valores obtidos na solução 2, observa-se uma redução de $2,2115e + 07$ em relação ao custo de risco e um aumento de $3,30e + 05$ em relação ao custo de compra dos materiais. Ao observar a tabela 4.7, referente às quantidades de materiais a serem comprados, pode ser observado que a quantidade de períodos com falta de materiais foi de 25, sendo 60 períodos a menos com falta de material que a solução 2. Essa diminuição se deu devido ao aumento do custo para compra de materiais.

De posse dos dados de cada uma das soluções é possível visualizar em cada uma delas quais materiais foram priorizados e quais não serão adquiridos. Essa informação permite uma melhor escolha da solução a ser adotada levando em consideração o custeio

Tabela 4.7. Lista de materiais da solução 13 e seus quantitativos por período

Material	Qtde Períodos Falta Mat.	Períodos											
		P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	P.12
ENGATE COMPLETO TIPO E 6.1/4	8	3	1	0	0	-4	-4	-6	-8	-9	-9	-13	-13
MANDÍBULA ENGATE TIPO E 15	0	18	21	20	22	25	26	29	33	32	34	34	34
PINO DA MANDIBULA	0	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
CASTANHA PARA ENGATE TIPO E	0	29	29	29	25	21	21	21	21	21	17	13	13
ROTOR DO ENGATE TIPO E	0	34	34	28	25	21	19	19	19	13	10	6	4
HASTE DE MANOBRA	0	46	46	46	46	44	44	44	44	44	44	42	42
CRUZETA AC TIPO E	0	25	25	25	23	23	23	23	23	23	21	21	21
CHAVETA PARA ENGATE 6 1/4 X 8	0	48	69	77	83	91	81	91	93	93	93	92	80
PINO T DE RETENÇÃO DA CHAVETA	0	39	43	43	43	48	40	40	40	40	40	40	32
PINO DO CENTRO PIAO FCA	3	25	61	49	26	36	32	34	34	18	-5	-8	-12
DISCO SOLTO PRATO PIAO 14	0	29	46	48	36	38	34	34	34	32	14	14	10
CHAPA DE DESGASTE CUNHA	0	87	106	110	98	138	85	105	105	121	126	126	70
MOLA EXTERNA CUNHA	0	83	83	83	83	83	51	51	51	51	51	51	19
MOLA INTERNA CUNHA	0	74	74	74	74	74	66	66	66	66	66	66	58
MOLA INTERNA D3	0	140	332	254	191	159	153	153	262	160	97	65	59
ADAPTADOR CONVENCIONAL	0	61	75	84	84	79	71	71	90	90	90	42	34
TOPADOR ROLAMENTO 6 .1/2	0	77	89	89	89	81	93	105	105	105	105	82	82
SUP. DO BOCAL ENGATE CEGO F	4	22	21	14	10	0	1	7	1	-5	-10	-24	-26
ABRACADEIRA ENGATE TIPO E	0	12	13	15	20	22	22	21	21	23	27	27	27
DISCO DE DESGASTE MANGA E 14'	10	9	1	-3	-3	-10	-14	-25	-37	-42	-42	-49	-58
CUNHA DE FRICÇÃO	0	52	78	95	95	109	77	94	111	127	127	141	95
TRIANGULO DE FREIO CVRD	0	16	15	11	13	12	13	13	11	7	6	4	4
CHAPA DE DESGASTE GUIA	0	28	33	17	19	18	21	26	31	16	16	11	11

disponível para a compra das peças de reposição.

4.3 Validação da Metodologia

Todas as informações apresentadas na seção anterior referem-se a validação da aquisição dos materiais e do comparativo da quantidade mapeada para compra frente à necessidade de utilização dessas peças mapeadas pela taxa de sucateamento das mesmas.

Contudo, faz-se necessário validar a ferramenta efetuando o comparativo dos valores encontrados com os valores reais de consumo da empresa no ano de 2018. Sendo assim, foram coletados os dados reais de consumo do ano de 2018 para extrair as taxas de sucateamento reais e verificar como a ferramenta se comporta ao executar a otimização com essas novas informações.

Foi necessário efetuar ajustes na tabela de materiais, atualizando as taxas de sucateamento para os valores reais de 2018 e, após isso, foi executado novamente a ferramenta de otimização a fim de encontrar as soluções ótimas do problema. Os resultados encontrados pela ferramenta podem ser vistos no gráfico de pareto apresentado na figura 4.3.

Foi verificado que, ao aplicar as taxas de sucateamento reais do ano de 2018, os riscos das soluções aumentaram em relação aos resultados encontrados com as taxas de 2017. Para melhor visualizar estas diferenças foram incluídos os dois conjuntos de

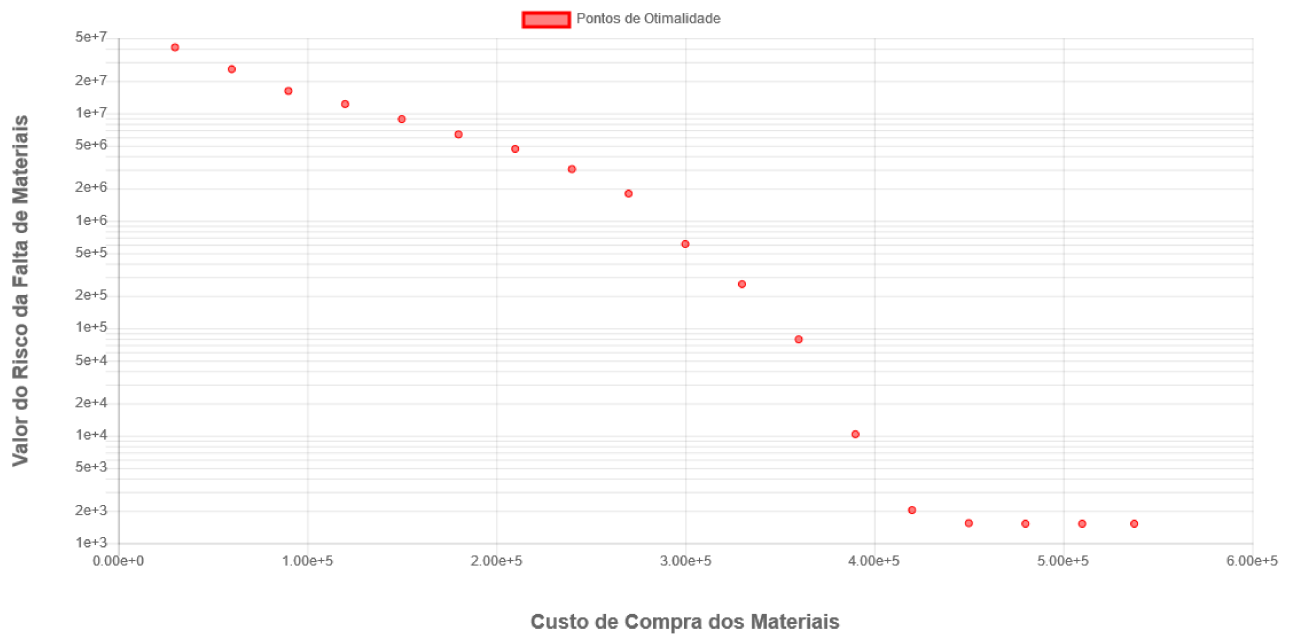


Figura 4.3. Fronteira pareto com dados de 2018.

soluções em um mesmo gráfico, o qual é apresentado na figura 4.4.

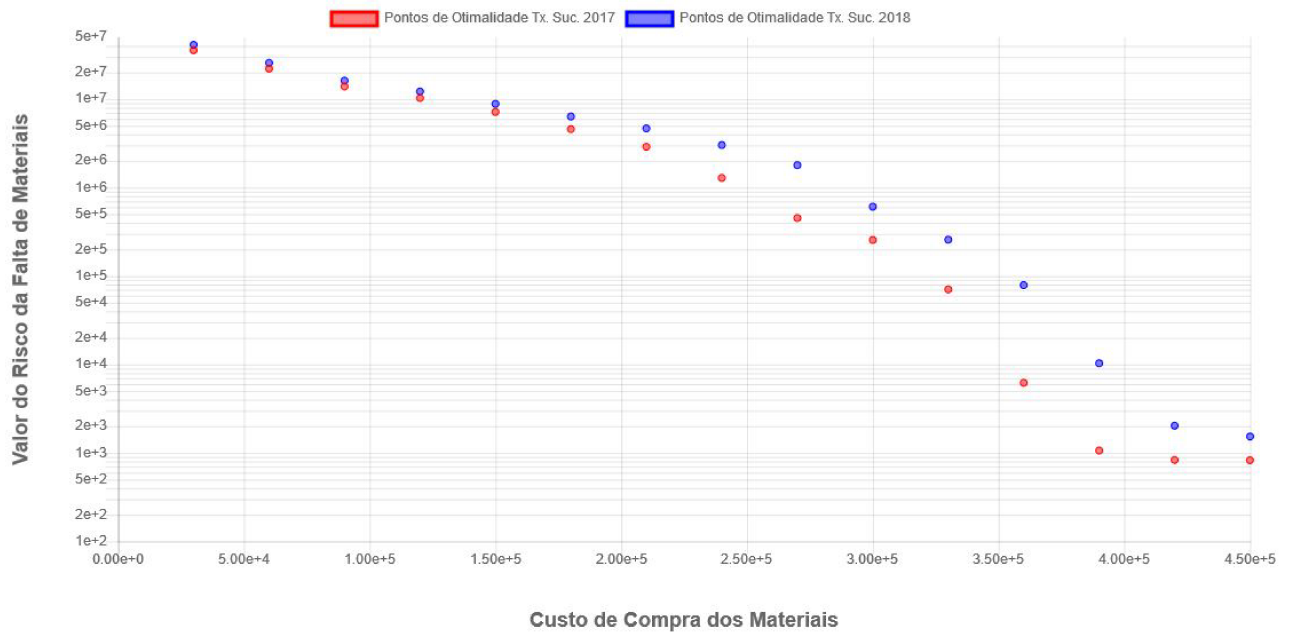


Figura 4.4. Comparativo entre as fronteiras paretos com dados de 2017 e 2018.

Para fins de comparativo, foram removidas as soluções de cada conjunto de resultados (2017 e 2018) onde uma solução não possui uma solução equivalente no outro

conjunto. Isso foi feito para realizar um comparativo de soluções com as taxas de sucateamento dos dois cenários com relação ao custo do risco de falta de materiais.

Com isso foram selecionadas 15 soluções de cada conjunto e efetuado o cálculo do GAP entre cada solução e sua correspondente no outro conjunto de resultados. Os GAP's para cada solução são apresentados na tabela 4.8. Nela pode ser visto que em todos os casos, as soluções em azul referentes às taxas de sucateamento reais de 2018 possuem custo de risco superiores aos custos de risco das taxas de 2017 (marcadas em vermelho).

Tabela 4.8. Tabela de GAP's entre os resultados de 2017 e 2018

Solução	Custo do Risco 2017	Custo do Risco 2018	GAP entre Riscos
1	3,57e+07	4,11e+07	5,42e+06
2	2,21e+07	2,57e+07	3,63e+06
3	1,39e+07	1,62e+07	2,24e+06
4	1,03e+07	1,22e+07	1,91e+06
5	7,16e+06	8,84e+06	1,68e+06
6	4,59e+06	6,37e+06	1,78e+06
7	2,90e+06	4,67e+06	1,77e+06
8	1,29e+06	3,03e+06	1,74e+06
9	4,52e+05	1,79e+06	1,34e+06
10	2,56e+05	6,08e+05	3,52e+05
11	7,06e+04	2,58e+05	1,87e+05
12	6,20e+03	7,89e+04	7,27e+04
13	1,06e+03	1,03e+04	9,26e+03
14	8,33e+02	2,03e+03	1,20e+03
15	8,28e+02	1,54e+03	7,07e+02

O GAP médio das soluções é de $1,48e + 06$ indicando um aumento considerável no custo do risco em relação aos resultados obtidos com as taxa de sucateamento levantadas no ano de 2017. Com isso, pode ser observado que existe uma discrepância entre valores estimados no ciclo anterior com valores reais de consumo dos materiais durante a execução das manutenções preventivas.

Este comparativo de soluções mostra que o custo do risco real é maior que o custo do risco estimado com as taxas de sucateamento do ano anterior. Essa diferença mostra que existem oportunidades de melhoria dos processos da empresa e que, se houver a melhora na qualidade dos dados de entrada, a ferramenta pode apresentar uma melhor assertividade, gerando economias financeiras consideráveis para a companhia.

Além de indicar possíveis pontos de melhoria com relação aos dados de entrada da ferramenta, este comparativo mostra que o processo de previsão de consumo de materiais por meio das taxas de sucateamento pode ser evoluído para se ter maior exa-

tidão, sendo possível mapear de forma correta os reais custos de risco experimentados pela empresa VLI.

Capítulo 5

Considerações Finais

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais da dissertação, sendo apresentados os ganhos obtidos na implementação da ferramenta de otimização de gestão de materiais utilizados nas manutenções preventivas de vagões de carga geral. Também são apresentados alguns pontos de evolução da ferramenta para continuidade deste trabalho.

5.1 Conclusões

Com a grande competitividade entre as empresas de prestação de serviço, um dos principais pontos estratégicos das mesmas é a confiabilidade dos seus ativos. Com isso, as manutenções realizadas nos ativos são extremamente importantes para o bom funcionamento dos mesmos. Para a realização destas manutenções, faz-se necessário gerir de forma criteriosa o estoque das peças de reposição utilizadas nas mesmas. Isso se dá devido ao fato de que a falta de algum material durante uma manutenção preventiva pode acarretar em prejuízos financeiros pela parada do ativo e também prejuízos junto ao cliente por não conseguir atender às demandas do mesmo. Além disso, um estoque inflado pode gerar perdas por capital estagnado e obsolescência.

Neste contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de implementar uma ferramenta capaz de mapear o custo do risco da falta dos materiais durante as manutenções preventivas, bem como definir a quantidade de materiais a serem comprados em cada um dos períodos de manutenção preventiva realizados.

Esta ferramenta implementada apresentou resultados que possibilitaram identificar quanto custa o risco para cada um dos cenários de investimentos para aquisição dos materiais, sendo possível saber quanto se economiza em risco ao se investir mais na compra das peças de reposição. Com a fronteira pareto ótima apresentada, a tomada

de decisão baseada no *trade-off* entre custo de compra de materiais e custo do risco de falta dos mesmos se torna muito mais simples e clara para o usuário da ferramenta.

Além de apresentar os custos de risco, a ferramenta também apresenta a lista de todos os materiais a serem adquiridos e a quantidade dos mesmos a serem compradas em cada um dos períodos do ciclo de manutenção. Isso é feito para cada uma das soluções encontradas, permitindo constatar quais materiais estão sendo priorizados e quais estão sendo preteridos nas compras.

Para validar a ferramenta foi efetuada a execução da mesma com um conjunto de dados de manutenções preventivas de vagões de carga geral da empresa VLI. Esses dados coletados são referentes às manutenções preventivas realizadas em 2017 juntamente com o planejamento efetuado para manutenção de 290 vagões no ano de 2018. Foi feito então um comparativo dos resultados obtidos com as taxas de sucateamento calculadas no ciclo de 2017 com os dados reais do ciclo de 2018. Com isso foi constatado que os custos de compra de materiais foram similares, porém houve um *gap* considerável nos custos de risco da falta de materiais, onde o risco foi maior ao utilizar os dados reais de 2018. Isso mostra que existe uma oportunidade de melhoria nos processos de coleta de dados efetuada pela empresa VLI. Além disso a ferramenta conseguiu minimizar a quantidade de períodos com falta de materiais para soluções com custo de compra de materiais semelhantes, pois a variação das taxas de sucateamento permitiram uma melhor adequação dos valores a serem utilizados na compra das peças de reposição.

Por fim, a ferramenta também pode ser utilizada para a defesa do aumento de investimentos em compra de materiais, visto que é possível apresentar o risco inerente à redução da verba para aquisição dos mesmos. Além disso, a variação do custeio tanto para mais quanto para menos se torna muito simples pois a ferramenta já apresenta o mapa de compras dos materiais. Com isso não é necessário efetuar de forma manual e passível de erros o processo de seleção de quais materiais devem ser priorizados e quais devem ser preteridos para a adequação ao custeio disponibilizado.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão de tópicos de estudo para continuidade deste trabalho, tem-se:

- Ampliar a abrangência da ferramenta para atender todos os tipos de vagões existentes na empresa a qual foram retirados os dados de teste;
- Incorporar o tratamento de peças que possibilitem recondicionamento e futura reutilização;

- Englobar outros ativos, tais como locomotivas e máquinas de via, bem como incorporar à ferramenta as peculiaridades de cada um deles;
- Melhorar a assertividade nos resultados obtidos pela ferramenta através do aperfeiçoamento dos dados de *input* da mesma. Para tanto, uma opção seria a utilização da estimativa da taxa de falhas dos materiais por meio da criação de um modelo de regressão utilizando um horizonte maior que apenas um ano de informações anteriores. A taxa de sucateamento utilizada atualmente baseia-se somente no dados de manutenções do ano anterior. Esse aprofundamento na taxa de falhas pode melhorar a previsibilidade do consumo de materiais devido a maior acurácia na predição da falha das peças;
- Implementar um módulo de auxílio à tomada de decisão que apoie o usuário na escolha da melhor solução de acordo com as premissas existentes para tal.

5.3 Produção Bibliográfica

- ALMEIDA, CLAYTON GUIMARÃES DE ; OLIVEIRA, BRENO CARVALHO DE ; SANTOS, JESUS JONATAN SOUZA ; CASTRO, GUSTAVO BARROS ; CARRANO, EDUARDO GONTIJO ; LIMA, GUSTAVO ELÓI DE SÁ . PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A OTIMIZAÇÃO DO ESTOQUE DE MATERIAIS UTILIZADOS EM VAGÕES DE CARGA GERAL. In: 73º Congresso Anual da ABM, 2018, São Paulo. ABM Proceedings. São Paulo: Editora Blucher, 2018. v. X. p. 1220

Referências Bibliográficas

- ABNT (2015). Nbr 11691:2015 - vagão ferroviário - classificação, identificação e marcação. Norma, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Bacchetti, A. & Saccani, N. (2012). Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 40(6):722 – 737. ISSN 0305-0483. Special Issue on Forecasting in Management Science.
- Barabadi, A.; Barabady, J. & Markeset, T. (2014). Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization – a case study. *Reliability Engineering & System Safety*, 123:1 – 7. ISSN 0951-8320.
- Bazaraa, M. S.; Jarvis, J. J. & Sherali, H. D. (2011). *Linear programming and network flows*. John Wiley & Sons.
- Bertolde, A. I. & Junior, W. P. X. (2013). Uma comparação de métodos de previsão de demanda de peças de reposição: uma aplicação ao transporte ferroviário. *Revista Gestão Industrial*, 9:535–551. ISSN 1808-0448.
- Box, G. E. P. & Jenkins, G. M. (1994). *Time Series Analysis - Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco, third edição.
- Callegaro, A. (2010). Forecasting methods for spare parts demand. Dissertação de mestrado, Universita Degli Studi di Padova, Pádua.
- Camm, J. D.; Raturi, A. S. & Tsubakitani, S. (1990). Cutting big m down to size. *Interfaces*, 20(5):61–66.
- Chankong, V. & Haimes, Y. Y. (2008). *Multiobjective decision making: theory and methodology*. Courier Dover Publications.
- Cordeau, J.-F.; Soumis, F. & Desrosiers, J. (2000). A benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem. *Transportation Science*, 34:133–149.

- Croston, J. D. (1972). Forecasting and stock control for intermittent demands. *Journal of the Operational Research Society*, 23(3):289–303.
- Dekker, R.; Çerağ Pinçe; Zuidwijk, R. & Jalil, M. N. (2013). On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice. *International Journal of Production Economics*, 143(2):536 – 545. ISSN 0925-5273. Focusing on Inventories: Research and Applications.
- der Auweraer, S. V.; Boute, R. N. & Syntetos, A. A. (2019). Forecasting spare part demand with installed base information: A review. *International Journal of Forecasting*, 35(1):181 – 196. ISSN 0169-2070. Special Section: Supply Chain Forecasting.
- Driessen, M.; Arts, J.; van Houtum, G.-J.; Rustenburg, J. W. & Huisman, B. (2015). Maintenance spare parts planning and control: a framework for control and agenda for future research. *Production Planning & Control*, 26(5):407–426.
- Filho, O. S. S.; Carvalho, M. A.; Cezarino, W.; Silva, R. & Salviano, G. (2013). Demand forecasting for blood components distribution of a blood supply chain. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(24):565 – 571. ISSN 1474-6670. 6th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics.
- Forbes, C.; Evans, M.; Hastings, N. & Peacock, B. (2011). *Statistical Distributions*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, fourth edição.
- Gu, Z.; Rothberg, E. & Bixby, R. (2019). *Gurobi Optimizer Reference Manual*. Gurobi Optimization Inc., Houston, TX, version 8.1 edição.
- Haimes, Y. Y.; Lasdon, L. S. & Wismer, D. A. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-1(3):296–297. ISSN 0018-9472.
- Holt, C. C. (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1):5 – 10. ISSN 0169-2070.
- Hu, Q.; Boylan, J. E.; Chen, H. & Labib, A. (2018). Or in spare parts management: A review. *European Journal of Operational Research*, 266(2):395 – 414. ISSN 0377-2217.
- Johnston, F. R. & Boylan, J. E. (1996). Forecasting for items with intermittent demand. *Journal of the Operational Research Society*, 47(1):113–121.

- Laumanns, M.; Thiele, L. & Zitzler, E. (2006). An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. *European Journal of Operational Research*, 169(3):932 – 942. ISSN 0377-2217.
- Librantz, A. F. H.; Sidnei, A.; Alexandre, L. W. & Gisele, C. (2010). Algoritmos de busca aplicados na estimação de parâmetros em um modelo probabilístico de gestão de estoque. *Exacta*, 8:237–248. ISSN 1678-5428.
- Marseguerra, M.; Zio, E. & Podofillini, L. (2005). Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 87(3):325 – 335. ISSN 0951-8320.
- Mentzer, J. T.; DeWitt, W.; Keebler, J. S.; Min, S.; Nix, N. W.; Smith, C. D. & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2):1–25.
- Nogueira, A. d. S. (2012). Logística empresarial: uma visão local com pensamento globalizado. *São Paulo: Atlas*.
- Porras, E. & Dekker, R. (2008). An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. *European Journal of Operational Research*, 184(1):101 – 132. ISSN 0377-2217.
- Pozo, H. (2000). *Administração de recursos materiais e patrimoniais: uma abordagem logística*. Editora Atlas SA.
- Rego, J. R. & Mesquita, M. A. (2011). Controle de estoque de peças de reposição em local único: uma revisão da literatura. *Production*, 21:645 – 666. ISSN 0103-6513.
- Sani, B. & Kingsman, B. G. (1997). Selecting the best periodic inventory control and demand forecasting methods for low demand items. *Journal of the Operational Research Society*, 48(7):700--713. ISSN 1476-9360.
- Simchi-Levi, D.; Kaminsky, P. & Simchi-Levi, E. (2009). *Cadeia de suprimentos projeto e gestão: conceitos, estratégias e estudos de caso*. Bookman Editora.
- van Jaarsveld, W. & Dekker, R. (2011). Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11):1576 – 1586. ISSN 0951-8320.
- Viana, J. J. (2000). *Administração de materiais: um enfoque prático*. Atlas.
- VLI (2016). *Manual Técnico de Vagões*. VLI Logística, Belo Horizonte.

- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3):469 – 489. ISSN 0377-2217.
- Wang, W. & Syntetos, A. A. (2011). Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6):1194 – 1209. ISSN 1366-5545.
- Willemain, T. R.; Smart, C. N. & Schwarz, H. F. (2004). A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of Forecasting*, 20(3):375 – 387. ISSN 0169-2070.
- Zhang, G. (2003). Time series forecasting using a hybrid arima and neural network model. *Neurocomputing*, 50:159 – 175. ISSN 0925-2312.