

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1192

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DOS CUSTOS E  
RISCOS ASSOCIADOS À MANUTENÇÃO DE  
VAGÕES**

**Breno Carvalho de Oliveira**

DATA DA DEFESA: 27/07/2020



BRENO CARVALHO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DOS CUSTOS E  
RISCOS ASSOCIADOS À MANUTENÇÃO DE  
VAGÕES**

**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

Julho de 2020



O48a

Oliveira, Breno Carvalho de.

Análise multicritério dos custos e riscos associados à manutenção de vagões [recurso eletrônico] / Breno Carvalho de Oliveira. - 2020.

1 recurso online (xx, 51 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eduardo Gontijo Carrano.

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

Bibliografia: f. 49-51.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Confiabilidade (Engenharia) - Teses. 3. Custos - Teses. 4. Manutenção - Planejamento - Teses. 5. Otimização multiobjetivo - Teses. 6. Vagões (Ferrovias) - Teses. I. Carrano, Eduardo Gontijo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Análise Multicritério dos Custos e Riscos Associados A  
Manutenção de Vagões"**

**Breno Carvalho de Oliveira**

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 27 de julho de 2020.

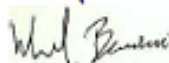
Por:



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



Prof. Dr. Lucas de Souza Batista  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Michel Bessani  
(UFMG)



Prof. Dr. André Luiz Maravilha Silva  
Informática, Gestão e Design (CEFET-MG)

*Dedico este trabalho a Deus, à minha família e à minha esposa, que são minha base.*



*Agradeço, primeiramente, a Deus, por estar sempre presente em minha vida e por permitir que tudo isso se realizasse.*

*À minha família, que foi a base de tudo, apoiando-me nos momentos difíceis com força, confiança, amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los.*

*À minha esposa Isabela, pela compreensão, incentivo e motivação, por ter vivido comigo todos os detalhes deste trabalho e por acrescentar razão e beleza aos meus dias.*

*Aos meus amigos, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos desta caminhada, em especial, aos amigos Clayton e Jésus, por estarem sempre presentes, compartilhando os desafios, noites de estudos, aprendizados e conquistas ao longo do percurso até chegar a este momento.*

*Ao meu orientador, professor Eduardo Gontijo Carrano, agradeço por todo o apoio, disponibilidade, competência e conhecimento transmitidos durante todo o processo. Muito obrigado pelos ensinamentos durante as aulas, reuniões e revisões desta dissertação. Agradeço também ao professor André Maravilha pelo apoio e contribuição na elaboração do modelo matemático deste trabalho.*

*À empresa VLI Logística, pelo incentivo na realização deste mestrado.*

*Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.*



# Resumo

O gerenciamento estratégico da manutenção de vagões é um aspecto crítico para as concessionárias ferroviárias, visto que falhas inoportunas comprometem a produção e geram perdas financeiras significativas. Neste estudo, é apresentada uma metodologia integrada ao gerenciamento e planejamento da manutenção de ativos. Um modelo de otimização multiobjetivo é proposto, minimizando simultaneamente os custos das políticas de manutenção e o custo dos riscos previstos por falhas inesperadas, com base em estimativas estatísticas da probabilidade de falha e no impacto econômico esperado das falhas.

O problema foi modelado por meio de programação linear inteira e resolvido por meio de uma abordagem  $\epsilon$  – *Restrito*, para a obtenção de algumas soluções Pareto-ótimas e posterior tomada de decisão. A ferramenta apresenta resultados que permitem identificar quanto se economiza em risco ao se investir em manutenções com menores probabilidades de falha, além de apresentar uma lista contendo qual manutenção deve ser executada para cada um dos vagões em cada um dos anos do ciclo de investimentos.

A ferramenta proposta é testada em um conjunto de dados reais de uma empresa de transporte ferroviário, por meio de uma análise comparativa entre os resultados obtidos para o primeiro ano de planejamento e o cenário real de 2019. Essa análise permitiu explorar os ganhos da metodologia quando comparada ao método empírico usualmente realizado, identificando pontos de melhoria nos processos da empresa em estudo.

**Palavras-chave:** Vagão; Planejamento da Manutenção; Análise da Confiabilidade; Custos e Riscos Associados; Otimização Multiobjetivo.



# Abstract

The strategic management of railcar maintenance is a critical aspect for railway concessionaires, since unexpected failures compromise production and generate significant losses in financial health. This study presents an integrated methodology for asset maintenance management and planning. A multi-objective optimization model is implemented, considering the minimization of maintenance costs and predicted risks as the main goals, based on statistical estimates of the probability of failure and the expected economic impact of the failures.

The problem is modeled using integer linear programming and an  $\epsilon - \text{Restricted}$  approach is employed to obtain some Pareto-optimal solutions, which can be later subjected to decision making. The tool presents results that allow to identify how much is saved in risk when investing in more detailed maintenance. In addition, the proposed tool also provides a list containing which maintenance must be performed for each of the wagons in each of the years of the investment cycle.

The proposed algorithm is tested on a set of real data from a railway transport company, through a comparative analysis between the results of the first year of planning and the real scenario for the year 2019. This analysis allowed to explore the gains of the methodology when compared to the empirical method usually performed, identifying points of improvement in the processes of the company under study.

**Keywords:** Wagons, Maintenance Planning, Reliability Analysis, Costs and Risks Associated, Multiobjective Optimization.



# Lista de Figuras

2.1	Tipos de Vagões. Fonte: Autor. . . . .	7
2.2	Classificação dos Vagões. Fonte: [ABNT, 2015]. . . . .	7
2.3	Vagão HPE. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	7
2.4	Sistemas do Vagão. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	8
2.5	Vista Explodida dos Sistemas do Vagão. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	9
2.6	Sistema de Estrutura do Vagão. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	9
2.7	Vista Explodida do Sistema de Estrutura do Vagão. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	10
2.8	Manutenção em Vagão. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	11
2.9	Inspeção do Vagão. Fonte: [VLI, 2018]. . . . .	12
2.10	Manutenção da Estrutura do Vagão. Fonte: [RRVW, 2020]. . . . .	15
2.11	Tipos de Dados Censurados. TTF = <i>Time to failure</i> . Fonte: Adaptado de [Reliawiki, 2020]. . . . .	17
3.1	(a) Pintura Interna Corroída; (b) Vazamento de Produto nos Furos Laterais. Fonte:[VLI, 2018]. . . . .	23
3.2	Planos de Recuperação: (a) Tapa-Buraco; (b) Substituição de Chaparia e (c) Revestimento Interno. Fonte:[VLI, 2018]. . . . .	24
3.3	Riscos: (a) Vagão Retido na Oficina; (b) Vazamento de Produto. Fonte:[VLI, 2018] . . . . .	25
3.4	Resultados do Teste de Anderson-Darling (AD) para as Intervenções. Fonte: Autor. . . . .	32
3.5	Funções de Weibull para a Intervenção (II) Tapa-Buraco. Fonte: Autor. . . . .	33
3.6	Funções de Weibull 3 parâmetros para a Intervenção (III) Substituição da Chaparia. Fonte: Autor. . . . .	33
3.7	Funções de Weibull 3 parâmetros para a Intervenção (IV) Revestimento Interno. Fonte: Autor. . . . .	34
3.8	Falha Acumulada. (a) II - Tapa-Buraco; (b) III - Substituição de Chaparia e (c) IV - Revestimento Interno. Fonte:[MINITAB, 2016]. . . . .	35

4.1	Fronteira Pareto-ótima com os 21 pontos selecionados. . . . .	38
4.2	Fronteira Pareto-ótima com soluções A e B. . . . .	39
4.3	Classificação dos 25 primeiros vagões das Soluções A e B. . . . .	41
4.4	Custo do Risco e Custo de Manutenção da Solução 21. . . . .	41

# Lista de Tabelas

4.1	Resultados da fronteira Pareto-ótima. . . . .	40
4.2	Quantidade de manutenções classificadas nas soluções A e B. . . . .	40
4.3	Custo do 1° ano real e do 1° ano das soluções do algoritmo. . . . .	42
4.4	Quantidade de manutenções classificadas nas soluções 0 e 9 no 1° ano. . .	43



# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Contribuições . . . . .	3
1.4 Estrutura do Texto . . . . .	4
<b>2 Referencial Teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Definição do Problema . . . . .	5
2.1.1 Vagões . . . . .	6
2.1.2 Manutenção de Vagões . . . . .	11
2.1.3 Análise de Sobrevivência . . . . .	16
2.2 Trabalhos Relacionados . . . . .	18
<b>3 Metodologia</b>	<b>21</b>
3.1 Estudo de Caso . . . . .	21
3.2 Modelo Matemático . . . . .	25
3.3 Implementação . . . . .	28
3.3.1 Dados . . . . .	29
3.3.2 Análise de Confiabilidade . . . . .	30
3.3.3 Ferramenta Proposta . . . . .	34
<b>4 Resultados e Discussões</b>	<b>37</b>

4.1	Resultados Computacionais . . . . .	37
4.2	Validação da Metodologia . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>45</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	46
5.2	Produção Bibliográfica . . . . .	46
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>49</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A globalização industrial gerou imensas alterações teóricas e práticas no campo da manutenção, apresentando-se atualmente como meio essencial de geração de valor e não mais como uma simples atividade de reparo [Wendland & Tauchen, 2010; Rodriguez, 2018]. O crescimento contínuo das demandas no setor produtivo, tornou fundamentais as exigências em relação à disponibilidade dos equipamentos, uma vez que falhas inoportunas comprometem a produção e geram perdas significativas em um ambiente altamente competitivo.

Segundo [Moubray, 2000], os trabalhos voltados para a manutenção elevam o desempenho e disponibilidade dos equipamentos para a produção, mas, ao mesmo tempo, contribuem no aumento dos custos de operação. Atualmente, busca-se atingir um equilíbrio entre a saúde física dos ativos e a saúde financeira das organizações por meio de uma nova gestão estratégica de manutenção.

Neste contexto, as ferrovias buscam aumentar a produtividade operacional do seu sistema, sem causar danos ao patrimônio público e ambiental. Para tanto, mais de 70% do custo total do ciclo de vida da ferrovia são despendidos em manutenção dos materiais rodantes e via permanente [Dias et al., 2015].

Estes altos custos motivam a busca por soluções de manutenção que se baseiam na condição do ativo, no ciclo de operação ou até a falha. Segundo [Dong & Frangopol, 2015], esta estratégia não leva em consideração o resultado econômico exposto pela probabilidade de uma falha ou as consequências deste evento, assim, um planejamento equivocado pode levar a empresa a despendar custos desnecessários.

Este trabalho apresenta uma metodologia para a minimização dos custos e riscos associados à recuperação de vagões. Para cada um dos escopos de recuperação, são considerados os custos, as durações e os modelos de probabilidade para as falhas. Neste contexto, o risco refere-se à probabilidade de o ativo falhar e, por consequência, gerar

custos operacionais não programados.

Esta metodologia foi testada utilizando-se, como estudo de caso, uma empresa de transporte ferroviário em um horizonte de planejamento de longo prazo, oferecendo uma ferramenta computacional de otimização para o suporte à tomada de decisão.

## 1.1 Motivação

A crescente demanda produtiva vem impulsionando as empresas na busca por maiores vantagens competitivas. A implementação da manutenção baseada na condição dos ativos está cada vez mais frequente, uma vez que seus resultados estão diretamente interligados à confiabilidade, segurança e redução de custos. Existem vários estudos que forneceram abordagens estatisticamente sólidas para a probabilidade de falhas e análise de sobrevivência dos equipamentos. Embora sejam as ferramentas mais indicadas para modelar a confiabilidade, estas análises geralmente não associam os riscos ou as consequências que estes eventos podem causar. Esta é uma necessidade pouco explorada em pesquisas relacionadas ao tema [Zvolensky et al., 2014].

Entre as áreas de aplicação ferroviária, grande parte dos procedimentos de manutenção é tradicionalmente planejada com base no conhecimento e na experiência de empregados, sem qualquer tipo de abordagem baseada em confiabilidade ou nas consequências que os riscos podem causar. Deste modo, grandes oportunidades de redução de custos passam despercebidos [Podofilini et al., 2006]. Revela-se, tendo em vista estes fatores, que a primeira motivação deste trabalho é desenvolver uma metodologia, que além de determinar o planejamento ótimo dos custos de manutenção dos vagões, possibilite mensurar os custos dos riscos inerentes ao processo.

No entanto, a política ótima de manutenção requer altos custos e um cumprimento de planejamento em longo prazo em que a solução mais duradoura nem sempre é aplicável a todos os ativos. Estas restrições são impostas dado o cenário financeiro desafiador enfrentado pelas empresas, que impõe limites orçamentários e incentiva a redução de custos. Este desafio é potencializado devido ao grande número de ativos e às diferentes soluções para tratamento.

Dessa maneira, a segunda motivação deste estudo, é a criação de uma ferramenta capaz de determinar a alocação ótima de equipamentos para diferentes regimes de manutenção sob restrições operacionais e orçamentárias. Outra motivação deste trabalho é apresentar os resultados da otimização por meio de uma fronteira Pareto-ótima, que permita, ao usuário, visualizar os cenários de manutenção, sabendo do risco exposto daquela escolha, tornando a tomada de decisão mais clara e compreensível para justificar

eventuais solicitações do aumento de investimentos.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para definição de uma estratégia ótima de intervenções da superestrutura de vagões, fornecendo uma ferramenta para auxílio à decisão, que visa a minimizar os investimentos em manutenção e os riscos operacionais. Para tanto, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Definir um modelo matemático que retrate a minimização de custos e riscos associados às intervenções de manutenção da superestrutura de vagões, em um horizonte de dez anos;
- Suportar a tomada de decisão do planejamento da manutenção, fornecendo um conjunto de soluções ótimas que permita, ao usuário, visualizar a relação de *trade-off* entre os custos e riscos dos cenários de manutenção;
- Analisar a solução gerada pelo algoritmo, comparando o resultado do primeiro ano que mais se aproximou ao cenário real, apresentando o ganho da diferença entre as estratégias.

## 1.3 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho foi de ordem prática, por ter modelado a partir de dados reais, o planejamento ótimo de cenários que minimizam os custos e riscos associados à manutenção de vagões em um período de observação de longo prazo.

Verificou-se, ainda, que a metodologia proposta apresentou resultados mais promissores quando comparada à metodologia empírica usualmente praticada na empresa em estudo, permitindo um maior controle das variáveis envolvidas no processo e uma relação de custos menos expostas aos riscos.

Adicionalmente, este trabalho contribui com a comunidade científica por ter promovido uma solução inovadora no setor de manutenção ferroviária, capaz de fornecer um suporte adequado para a tomada de decisões em um problema real de otimização, que tem um enorme potencial de gerar economias significativas de custos diretos (manutenção) e indiretos (riscos) para as concessionárias de vagões de carga.

## 1.4 Estrutura do Texto

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, cujos os conteúdos são resumidamente descritos a seguir.

Este capítulo apresentou o problema de planejamento dos custos e riscos associados à manutenção de vagões, assim como sua importância vem impulsionando as empresas a assumir uma nova postura estratégica. Também são apresentados os objetivos e contribuições que nortearam a pesquisa.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, detalhando os conceitos da manutenção de vagões e a análise de sobrevivência utilizados neste trabalho. Também são apresentadas as principais definições dos vagões e a estratégia de manutenção empregada em uma ferrovia brasileira de carga geral. Por fim, são apresentados os trabalhos e estudos correlacionados ao tema.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia e o algoritmo desenvolvidos neste trabalho, bem como a forma que eles foram implementados. Também é apresentado o estudo de caso desenvolvido em uma empresa de logística, detalhando as suas políticas de manutenção e os riscos inerentes ao seu processo. Em sequência, são abordados o modelo matemático e a estrutura da ferramenta proposta.

Os resultados alcançados são apresentados no Capítulo 4, onde são discutidos as soluções da fronteira Pareto-ótimo e o comportamento das restrições. Em seguida, é efetuada a validação da ferramenta por meio de uma análise comparativa do resultado real com o primeiro ano do período sob estudo.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentados as conclusões e os resultados alcançados da metodologia desenvolvida, assim como são apresentadas perspectivas para trabalhos futuros relacionados ao tema.

# Capítulo 2

## Referencial Teórico

As concessionárias ferroviárias têm seu foco no transporte de cargas e possuem uma solução eficiente para o escoamento de produtos em larga escala, dados a segurança, a velocidade e os custos. Esta eficiência depende, principalmente, do bom funcionamento dos ativos, visto que paradas em momentos inoportunos comprometem a produção e podem significar perdas irreversíveis em um ambiente altamente competitivo [Kardec & Nascif, 2012].

Para que a operação logística mantenha seu desempenho ótimo e atenda aos volumes contratados, torna-se primordial conhecer o comportamento das falhas dos ativos e o momento apropriado em tratá-las. Tal objetivo é alcançado com a estruturação de uma política de manutenção adequada, que garanta a segurança da operação com a melhor rentabilidade possível.

No entanto, a política ótima de manutenção requer altos custos e um cumprimento de planejamento em longo prazo em que a solução mais duradoura nem sempre é aplicável a todos os ativos. Estes altos custos motivam a busca por soluções de engenharia que aumentem a confiabilidade e reduzam gastos financeiros. Esses desafios são enfrentados por empresas que executam manutenções em vagões e serão detalhados ao longo deste capítulo.

### 2.1 Definição do Problema

Em empresas ferroviárias, os vagões são responsáveis por transportar os mais diversos tipos de cargas. O transporte de produtos corrosivos tem acelerado a degradação da caixa dos vagões e, conseqüentemente, aumentado a taxa de falhas destes ativos.

A corrosão antecipa o surgimento de furos que provocam a contaminação e o vazamento da carga transportada, o que, conseqüentemente, gera impactos na operação

e, em decorrência, a recusa de vagões e manutenções não planejadas. A exposição a este risco afeta diretamente as margens de lucros das transportadoras, bem como o tratamento para reestabelecer estes ativos exige investimentos dispendiosos e o cumprimento de um planejamento de longo prazo.

O desafio é potencializado, dados o grande número de vagões e as diferentes soluções para tratamento, sendo que, quanto mais caro o plano de intervenção, maior é sua expectativa de duração em um horizonte de vida útil. Porém, mediante a estratégia financeira, a solução mais duradoura nem sempre é aplicável a todos os ativos.

Neste contexto, analisar todos os possíveis cenários para cada um dos vagões é uma tarefa complexa e exaustiva, uma vez que a avaliação de cada cenário caracteriza um problema de análise combinatória de grandeza exponencial. Deste modo, torna-se necessário o estudo das melhores práticas de planejamento de manutenção e gestão de ativos a fim de minimizar os custos e maximizar a confiabilidade.

### 2.1.1 Vagões

O sistema ferroviário é composto por ativos que se movimentam sobre a via férrea e são denominados de Material Rodante, os quais podem ser divididos em ativos que traçam e ativos que são rebocados [Siementkowski, 2016]. Entre os ativos que traçam, destacam-se as locomotivas, que são veículos autopropulsores destinados ao reboque de vagões e carros de passageiros, sendo, assim, responsáveis por traçar toda a composição pela linha férrea. Já entre os ativos que são rebocados, destacam-se os vagões, que são veículos que permitem o transporte de passageiros e cargas, sendo, assim, responsáveis pelo acondicionamento de produtos, animais e pessoas [ANTT, 2013]. Para este trabalho, o foco será direcionado aos vagões de carga geral.

Mediante a grande variedade de produtos e os diferentes tipos de operações de carga e descarga, surgiram grupos específicos de vagões de acordo com a operação e a mercadoria a ser transportada [dos Santos, 2011]. A norma brasileira de classificação de vagões NBR 11.691 regulamenta e organiza estes ativos em grupos, podendo citar os principais tipos conforme a Figura 2.1.

A identificação dos vagões é realizada por um código alfanumérico de dez dígitos. Este código estabelece um critério de classificação em que as duas primeiras letras determinaram a finalidade e as características dos vagões, a terceira letra representa o peso bruto e bitola dos vagões e, em último, vem o número de série e o registro do proprietário [ABNT, 2015]. A Figura 2.2 mostra a sequência de números e letras que compõem esse identificador.

O objeto de estudo deste trabalho são os vagões de carga do tipo HPE, que






Tipo	Aplicação	Prefixo	Vagão
Hopper	Granéis sólidos, ensacados, caixarias, cargas unitizadas e produtos em geral que não podem ser expostos ao tempo, como celulose	H	
Fechado	Granéis sólidos e produtos diversos que podem ser expostos ao tempo, como minério de ferro	F	
Gôndola	Granéis corrosivos e sólidos que não podem ser expostos ao tempo e abertos, como grãos e farelo de soja, milho e calcário agrícola	G	
Plataforma	Contêineres, produtos siderúrgicos, grandes volumes, madeira, peças de grandes dimensões	P	
Tanque	Derivados de petróleo, cimento a granel e líquidos	T	

Figura 2.1. Tipos de Vagões. Fonte: Autor.

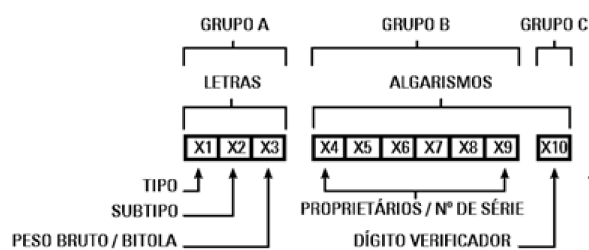


Figura 2.2. Classificação dos Vagões. Fonte: [ABNT, 2015].

transportam enxofre e fosfato, possuem carregamento superior por tulpas em terminais e descarga inferior. A Figura 2.3 mostra o modelo e as características do vagão em pauta.



Figura 2.3. Vagão HPE. Fonte: [VLI, 2018].

H *hopper*;

P fechado com proteção anticorrosiva;

E peso máximo admissível de 100, bitola métrica e manga E;

**054554-6** número de série e proprietário.

Os vagões HPE podem ser desmembrados em quatro principais sistemas, cada qual apresentando seus componentes e uma função essencial ao ativo, conforme a Figura 2.4.

CCT	FREIO	TRUQUE	ESTRUTURA
Engate	Timoneria	Aranha	Super
Braçadeira	Válvulas	Suspensão	Infra
ACT	Cilindro	Rodeiro	
Acessórios	Reservatório	Timoneria	

**Figura 2.4.** Sistemas do Vagão. Fonte: [VLI, 2018].

Localizado nas extremidades dos vagões, o Conjunto de Choque e Tração (CCT) é responsável pelo acoplamento entre um veículo e outro, permitindo a ligação em série de vários ativos para formar uma composição. Durante a movimentação dos veículos, uns transmitem aos outros diferentes esforços de tração e compressão, devido às mudanças de velocidade. O CCT amortece e absorve todos estes impactos que podem comprometer a estabilidade do material rodante sobre os trilhos.

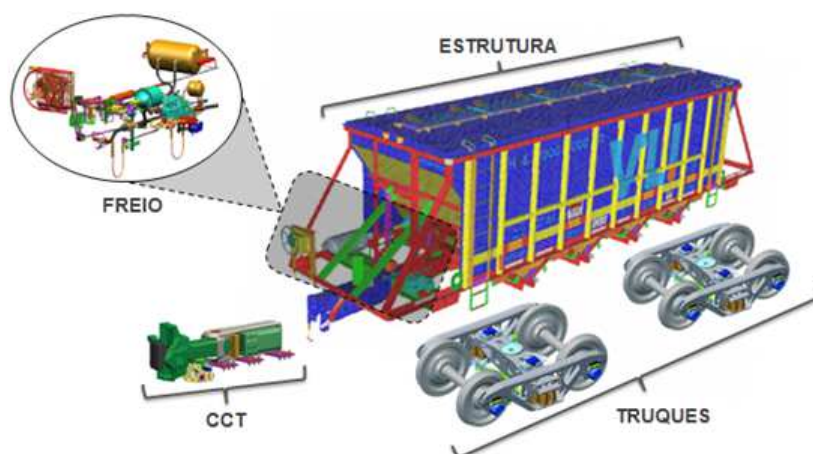
A finalidade do sistema de freios é controlar, com segurança, a velocidade do trem em aclives, declives e paradas de emergência. Ele é composto por um conjunto de equipamentos e dispositivos pneumáticos que fazem o controle e a transmissão de força para o sistema mecânico por meio de ar comprimido, o qual aciona a timoneria e sapatas que efetuam a frenagem nas rodas do vagão.

O truque tem a função de distribuir e transferir o peso do vagão, o que permite a movimentação guiada pelos trilhos. Sua função é guiar o ativo na inscrição de curvas e amortecer os impactos provenientes da via e do contato roda-trilho, evitando que esses choques sejam transferidos totalmente para a estrutura do vagão. Esse amortecimento é feito por meio do sistema de molas e pelo atrito entre superfícies, que proporcionam equilíbrio e estabilidade ao ativo.

A estrutura do vagão é responsável pelo acondicionamento da carga transportada. Sua construção é adaptada conforme as características do produto a ser transportado, bem como o tipo de carregamento/descarga a ser utilizado. Os materiais usados na construção devem ter alta resistência mecânica e proteção contra intempéries. Sua armação apoia-se sobre os truques e transferem os esforços ao veículo [VLI, 2018].

A vista explodida dos sistemas do vagão HPE pode ser vista na Figura 2.5.

Foco do trabalho, a estrutura dos vagões é composta por dois conjuntos, conforme pode ser observado na Figura 2.6.



**Figura 2.5.** Vista Explodida dos Sistemas do Vagão. Fonte: [VLI, 2018].

ESTRUTURA	
SUPER	INFRA
1 Caixa	4 Estrado
2 Cobertura	
3 Sistema Descarga	

**Figura 2.6.** Sistema de Estrutura do Vagão. Fonte: [VLI, 2018].

A caixa possui a função de suportar os esforços causados pela carga (produto) a ser transportada. Deve possuir a maior resistência possível aos esforços mecânicos, em caso de colisões, abalroamentos e descarrilamentos, bem como proporcionar economia na conservação, o que exige uma construção simples, robusta, durável e que permita fácil manutenção.

A durabilidade adequada da caixa depende das condições satisfatórias dos elementos de controle, ou seja, limpeza correta e análises periódicas das soldas, vestígios de oxidação, estufamento, dentre outros. Devido a inúmeras variáveis envolvidas durante a utilização do vagão, não é possível prever, de uma maneira 100% correta, a expectativa de vida da estrutura em termos de anos. Porém, o controle do desgaste da estrutura é fundamental para manter a durabilidade e o bom desempenho do vagão.

O estrado é a armação sobre a qual se apoia a caixa dos veículos ferroviários. O estrado tem as funções de transferir, para os truques, o peso imprimido pela caixa, além de transmitir os esforços de tração e compressão de um veículo a outro. Possui um *design* similar a uma espinha de peixe, com uma viga central e rampas de descarga dimensionadas para grande resistência às cargas.

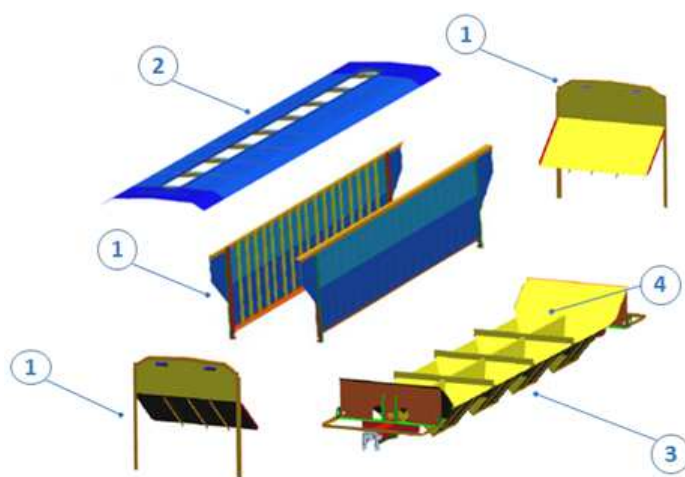
A cobertura é responsável pela proteção contra contaminantes e acesso indevido

da carga a ser transportada, em especial, para a vedação de água da chuva. O carregamento é realizado nos terminais pelo acesso superior do teto por meio da abertura das escotilhas articuláveis.

O sistema de descarga possui quatro bocas de descarga com o formato de rampas e portas para o acionamento manual ou automático. Foi criado para fornecer segurança no transporte e agilidade na operação de descarga, sendo desenvolvido em conformidade com as características das moegas de descarga dos clientes.

De fácil operação, o acionamento do sistema de descarga pode ser realizado de ambos os lados dos vagões, prezando a segurança e a ergonomia dos operados de modo que não seja necessário aplicar grandes esforços para o acionamento do sistema.

A vista explodida da estrutura do vagão HPE pode ser observada na Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Vista Explodida do Sistema de Estrutura do Vagão. Fonte: [VLI, 2018].

Assim como qualquer outro ativo, os vagões sofrem desgastes ao longo do tempo e demandam reparos para o seu bom funcionamento. Negligenciar estes aspectos põe em risco a segurança operacional da ferrovia, o que pode vir a acarretar grandes consequências, que se revelam não só na forma de despesas no reparo dos ativos, mas também nas questões de segurança, integridade do meio ambiente, perdas de produção e qualidade do produto. Logo, a manutenção tornou-se uma atividade fundamental no sistema das empresas, buscando maior eficácia na aplicação dos recursos e uma relação de custos adequada ao seu plano de negócios.

### 2.1.2 Manutenção de Vagões

A manutenção tem como intuito manter os equipamentos prontos para serem utilizados sem que manifestem falhas inesperadas, conservando-os em serviço durante o maior tempo possível e com o máximo de rendimento [Wendland & Tauchen, 2010].

Para que a operação logística mantenha seu desempenho ótimo, é necessário que os ativos se mantenham funcionais. Este objetivo é alcançado com a estruturação de uma política de manutenção adequada, que deva garantir a disponibilidade dos equipamentos, a confiabilidade e a segurança da operação com o menor custo possível [Costa, 2018].

Os planos contemplados na estratégia de manutenção de vagões são fundamentados conforme as características técnicas do vagão, manuais dos fabricantes, normas *Association of American Railroads* (ARR) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resoluções e portarias previstas pelos órgãos, como a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e a Agência Nacional de Transportes Ferroviários (ANTF). Na Figura 2.8, têm-se o exemplo de uma manutenção em vagão.



**Figura 2.8.** Manutenção em Vagão. Fonte: [VLI, 2018].

Neste trabalho, será abordada a política de manutenção realizada nos vagões de carga do tipo HPE adotados na empresa estudada. Baseados nestes conceitos e nas premissas orçamentárias, os métodos de manutenção estão classificados em quatro tipos:

- Inspeção;
- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva.

Os métodos de manutenção definidos na estratégia, além de garantir a confiabilidade e disponibilidade física dos ativos, são as quatro barreiras de proteção para evitar uma ocorrência ferroviária.

Assim, a partir do planejamento plurianual, torna-se possível estabelecer a relação entre receita e custos operacionais que norteiam as políticas de manutenção para cada frota de ativos.

### 2.1.2.1 Inspeções

Também conhecida como manutenção sensitiva, tem como objetivo levantar informações da integridade dos ativos e diagnosticar falhas potenciais. É um método simples, que acompanha a condição dos equipamentos e busca encontrar anomalias perceptíveis por meio de ferramentas de medição e parâmetros [Kardec & Nascif, 2012].

As inspeções de vagões são realizadas em pátios, linha sinalizada, postos de carregamento e descarga. Antes de formarem uma composição e entrarem em circulação, são verificadas as condições dos componentes dos vagões, visando às suas funcionalidades e, principalmente, à segurança operacional. Sempre que identificada uma anomalia, os vagões são encaminhados para manutenção, podendo esta ser corretiva, programada ou emergencial. Na Figura 2.9, observa-se a inspeção do rodeiro no vagão.



**Figura 2.9.** Inspeção do Vagão. Fonte: [VLI, 2018].

### 2.1.2.2 Manutenção Corretiva

É aquela realizada posteriormente a uma falha, restabelecendo o ativo para o seu pleno funcionamento. Então, ao trabalhar em um ativo que manifeste falha ou desempenho diferente do esperado, estar-se-à efetuando a manutenção corretiva [ABNT, 1994].

É usualmente realizada em vagões nomeados pela equipe de inspeção sempre que for encontrado algum defeito ou quando apresentar falha durante a operação. Estas manutenções podem ser programadas para serem executadas em oficina ou não programadas, quando ocorrerem assim que identificada a avaria em pátios, moegas e terminais.

É exercida também a manutenção corretiva denominada *Fast Track*, que consiste na execução de atividades de reparo rápido em trem formado, aproveitando o tempo morto de manobra e descarga, reduzindo significativamente o envio de vagões avariados para a oficina.

### 2.1.2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva permite assegurar um padrão de qualidade desejável, com base na utilização sistemática de técnicas de análise, utilizando de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para diminuir a manutenção preventiva e minimizar a manutenção corretiva [ABNT, 1994].

Tem como objetivo prevenir falhas nos equipamentos, implementando um programa sistematizado de acompanhamento, análise e diagnóstico de parâmetros, proporcionando a operação contínua do material pelo maior tempo possível [Kardec & Nascif, 2012].

As ferrovias utilizam um conjunto de equipamentos conhecidos como *Waysides*, que monitoram e identificam prováveis falhas antes que estas se manifestem de maneira mais grave. O sistema reúne sensores e câmeras instalados ao longo da via permanente, que registram, em tempo real, os parâmetros de desgaste e mau funcionamento nos componentes dos vagões. O sistema *Waysides* possui os seguintes equipamentos:

***HOT BOX*** – sensor de temperatura de rolamentos. É um sistema reativo que impede a ocorrência de degolas de manga de eixo;

***RAILBAM*** – sistema de detecção acústica de defeitos de rolamento. Utiliza o ruído para identificar avarias no componente, identificando a gravidade e o local da não conformidade;

***WILD IMPACT*** – detecta avarias na superfície de rolagem da roda, tais como calos e escamações. Auxilia a evitar quebras e desgastes superficiais das rodas/trilhos e aumenta a vida útil dos rolamentos;

***WHEEL VIEW*** – realiza medição do perfil da roda, extraindo parâmetros como a espessura do friso e da bandagem, a bitola de eixamento e a altura do friso;

***T-BOGIE*** avalia a performance do truque. Mede o desalinhamento dos rodeiros de forma a identificar truques com performance ruim, que necessitam de manutenção;

***COLDWHEEL*** – sistema de medição de temperatura das rodas em rampa, utilizado para identificar vagões com defeito no sistema de frenagem.

#### 2.1.2.4 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é realizada em espaços de tempo determinado com o objetivo de diminuir a chance de falhas e quedas de produção. Pode ser vista como uma intervenção técnica que visa à troca de itens antes mesmo de estes apresentarem avarias, antevendo a quebra e mantendo a disponibilidade total para a produção [Kardec & Nascif, 2012].

As manutenções preventivas dos vagões possuem uma frequência baseada em data calendário, visto que a rotina de operação dos equipamentos não possui uma variabilidade significativa. Isso proporciona uma previsibilidade de demanda de intervenções mais assertiva, facilitando o planejamento da manutenção.

São realizadas atividades de lubrificação, inspeção, qualificação, substituição e reparação de componentes conforme gabaritos e padrões técnicos, visando à redução de falhas para a garantia de desempenho operacional e maior confiabilidade.

Estas periodicidades são definidas de acordo com a quilometragem percorrida, vida útil de componentes e criticidade dos ativos. Desta forma, há uma estratégia de manutenção definida para cada modelo de vagão, de acordo com sua especificação e utilização na ferrovia. As manutenções preventivas dos vagões HPE são definidas como:

**PLANO BÁSICO (24 meses)** – inspeção com reparação condicional em todos os sistemas do vagão, inspeções sensitivas e testes de funcionamento;

**REV. INTERMEDIÁRIA (72 meses conforme a quilometragem do vagão)**  
– inspeção em todos os sistemas do vagão com recondicionamento dos componentes de truque, freio e mancais dos rodeiros, inspeções sensitivas e testes de funcionamento;

**REV. GERAL (144 meses conforme a quilometragem do vagão)** – inspeção em todos os sistemas do vagão com recondicionamento dos componentes de truque, freio, mancais dos rodeiros e conjunto choque e tração, inspeções sensitivas e testes de funcionamento.

Como pode ser visto, grande parte da política de manutenção é direcionada aos sistemas de CCT, freio e truque do vagão, salientando a escassez dos processos de manutenção direcionados à caixa.

Na maior parte dos casos, as manutenções direcionadas à caixa são realizadas por corretivas, dada a alta expectativa de vida dos materiais utilizados na estrutura do vagão. Porém, mediante as inúmeras variáveis envolvidas durante a utilização do ativo, como o descumprimento de orientações para a conservação e o transporte de cargas corrosivas, tem-se acelerado a degradação da caixa, aumentando a taxa de falhas dos vagões, gerando impactos não previstos no planejamento da manutenção.

Por consequência, o tratamento para restabelecer estes ativos requer altos custos e uma capacidade de execução dispendiosa. Deste modo, são amplamente direcionados a investimentos de longo prazo, compondo-se uma pequena parcela da corretiva programada, que estima recuperar os vagões críticos e recusados nos clientes. Na Figura 2.10 pode ser observado a manutenção da estrutura de um vagão.



**Figura 2.10.** Manutenção da Estrutura do Vagão. Fonte: [RRVW, 2020].

Na busca em desenvolver um programa de manutenção direcionado à caixa dos vagões, desenvolveu-se uma política de manutenção baseada na condição dos vagões, também conhecida como Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), a fim de garantir confiabilidade e a segurança operacional, evitando ações desnecessárias a baixo custo.

#### **2.1.2.5 Manutenção Centrada na Confiabilidade**

A manutenção centrada na confiabilidade é um processo que reúne dados do desempenho operacional dos equipamentos e utiliza estes dados para melhorar manutenções futuras. Sua frequência e atividade procuram estabelecer uma combinação ótima das

ações de manutenção a serem desenvolvidas com base na condição, no tempo e na operação até a falha dos equipamentos. De uma forma mais ampla, trata-se da probabilidade de um equipamento sobreviver sem a ocorrência de falhas por um período de tempo e condições operacionais predeterminados. Esta probabilidade de sobrevivência é denominada confiabilidade [Souza, 2008; Siqueira, 2005].

A análise de confiabilidade utiliza teorias estatísticas para construir modelos de distribuição de probabilidade que se adequem aos dados de sobrevivência dos equipamentos [Colosimo & Giolo, 2006]. Os modelos fornecem a estimativa da taxa de falhas dos equipamentos em função do tempo. Em outras palavras, eles estimam a probabilidade de falha do equipamento para um dado intervalo de tempo.

Segundo [Fogliato & Ribeiro, 2009; Reliasoft, 2006], existem diversos modelos estatísticos que podem ser utilizados para modelar os dados de sobrevivência, visto que o mais conhecido e utilizado nos estudos de confiabilidade é a distribuição de Weibull, devido à sua versatilidade em ajustar sua forma conforme os dados de vida dos equipamentos, podendo vir a representar falhas prematuras, aleatórias e por desgaste.

Em algumas situações, o comportamento da falha é descrito por uma distribuição em que seus parâmetros são desconhecidos. Tais parâmetros devem ser estimados, a partir dos dados amostrais, de modo que o modelo possibilite gerar o resultado que melhor represente a amostra.

Para garantir que os parâmetros da função tenham sido estimados corretamente, uma das técnicas utilizadas é a estimação pelo Método da Máxima Verossimilhança (MLE), que objetiva determinar os parâmetros que têm maior probabilidade de produzir os dados observados. Os estimadores MLE são os mais indicados para trabalhos com pequenas amostras e suportam melhor os dados com censura [Miranda, 2018].

### 2.1.3 Análise de Sobrevivência

A análise de sobrevivência consiste em analisar o tempo de vida dos indivíduos, desde o instante de entrada no estudo até o momento em que ocorre o evento de interesse, evento este que pode ser definido pela falha de um equipamento.

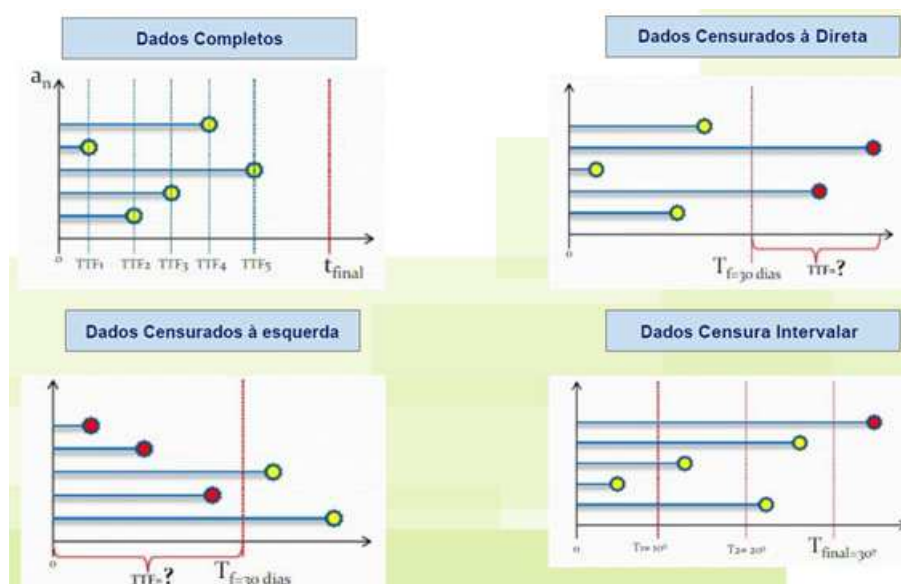
A maioria dos dados de confiabilidade contém censuras (informações incompletas) que não devem ser ignoradas. As censuras são itens onde os tempos de falha dos indivíduos só serão conhecidos quando se excederem certos valores de tempo, ou seja, em algumas das amostras pode não chegar a ocorrer a falha durante o período de observação. Desta maneira, deve-se representar a população de interesse como um todo e não somente os indivíduos ou equipamentos que falharam [Colosimo & Giolo, 2006].

Os dados censurados devem ser classificados e definidos *a priori* de forma a não enviesar os parâmetros da distribuição estatística [Miranda, 2018]. Os tipos de censura podem ser observados na Figura 2.11 e ser classificados como:

**Censura à Direita** – indivíduos que ainda estão em operação ao final do estudo (não apresentaram falhas até o período definido) ou foram removidos do estudo antes de ocorrer a falha;

**Censura à Esquerda** – indivíduos em que o tempo da falha é somente conhecido após certo tempo, ou seja, falharam antes do início do estudo;

**Censura Intervalar** – indivíduos que falharam, mas não se sabe, ao certo, quando, apenas que aconteceu em um certo intervalo de tempo (contêm incertezas em relação ao tempo exato em que a falha aconteceu).



**Figura 2.11.** Tipos de Dados Censurados. TTF = *Time to failure*. Fonte: Adaptado de [Reliawiki, 2020].

Assim, os dados de sobrevivência para o indivíduo ou equipamento  $i$  com ( $i = 1, \dots, N$ ), em estudo, são representados quanto a censura pela variável  $\delta_i$  na Equação (2.1):

$$\delta_i \begin{cases} 1 & \text{se } t_i \text{ falha} \\ 0 & \text{se } t_i \text{ censura} \end{cases} \quad (2.1)$$

Na sequência, é apresentado um levantamento bibliográfico relacionado ao planejamento ótimo da manutenção associado aos custos e riscos.

## 2.2 Trabalhos Relacionados

O problema em determinar as melhores práticas de manutenção estão cada vez mais frequentes nas empresas, buscando compreender o tipo e o intervalo de manutenção mais adequados ao comportamento das falhas dos equipamentos. Embora a análise de sobrevivência seja uma ferramenta mais indicada para modelar a confiabilidade, estas análises geralmente não associam os riscos ou consequências que estes eventos podem causar e, quando associados, estes riscos não são monetizados [Zvolensky et al., 2014; van der Westhuizen & Gräbe, 2013]. Esta é uma necessidade pouco explorada em pesquisas relacionadas ao tema ferroviário e as soluções encontradas na literatura são baseadas em heurísticas ou em técnicas de programação matemática, como pode ser observado nas propostas selecionadas a seguir.

Em [Li et al., 2006], foi proposta uma estratégia ótima baseada em risco para a alocação de recursos de manutenção e gerenciamento de ativos em que os objetivos de planejamento total de recursos para a manutenção e alocação das categorias de manutenção são modelados e otimizados separadamente. Este trabalho foi modelado como um problema de programação linear e otimizado por meio da relaxação Lagrangeana, na qual as variáveis não possuíam uma relação de *trade-off* entre si e o algoritmo desenvolvido trabalhou no processo de otimização em duas etapas: primeiramente, ele buscou maximizar a redução de risco e, em sequência, classificar cada tipo de manutenção por categoria nas diferentes maneiras de realocação de recursos. Porém, a metodologia não foi testada em um cenário real.

Segundo [Podofillini et al., 2006], foi desenvolvida uma metodologia que utiliza os dados colhidos por carros de inspeção de trilhos ferroviários para calcular os riscos e custos associados a uma estratégia de inspeção. As funções objetivo consideradas direcionam a busca por soluções caracterizadas por baixos gastos de manutenção e baixa probabilidade de descarrilamento. A otimização multiobjetivo é realizada por meio de um algoritmo genético que, por meio do método *min-max*, apresenta a melhor solução de compromisso conforme as preferências do usuário. Para estimar os parâmetros do modelo, foram utilizados dados de estatísticas ferroviárias da literatura e os estudos para a aplicabilidade da abordagem na prática estão em desenvolvimento por uma empresa ferroviária da Noruega.

[Rezvanizani et al., 2009] apresentaram uma abordagem baseada na análise de confiabilidade para os componentes de trem de passageiros, com o objetivo de identificar os componentes críticos com baixa confiabilidade e determinar as periodicidades ótimas de intervenção para eles. Para tanto, foi utilizada a base de dados de falhas de uma concessionária ferroviária do Irã durante um período de 44 meses. Os resultados da

análise de frequência mostraram que os rodeiros são o sistema mais crítico dos trens de passageiros e, por meio do *software* Weibull++, foram estimados os modelos de distribuição estatística que mais se adequam aos dados de tempo entre falhas (TBF) dos ativos. Posteriormente, a confiabilidade de cada tipo de componente é identificada em diferentes intervalos de tempo e pode ser usada para determinar o tempo apropriado das tarefas de manutenção preventiva conforme o nível de confiabilidade desejada.

Em [Spiroiu, 2015], é proposto um modelo de análise de confiabilidade para os rodeiros de vagões ferroviários, que são reconhecidos como o sistema mais crítico dos veículos. O estudo utilizou uma base de dados reais coletados em campo em um período de observação de um ano, totalizando 1802 amostras das quais 190 apresentaram falhas. A distribuição de probabilidade Weibull é usada para determinar o modelo matemático de confiabilidade. Em sequência, o modelo é linearizado, permitindo o uso da regressão linear para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull. O modelo probabilístico de confiabilidade estimado foi validado por meio da realização do teste qui-quadrado para verificar a hipótese assumida. O resultado do teste certificou que o modelo matemático de confiabilidade estimado se ajusta à distribuição de dados coletados.

Em [Miwa & Oyama, 2017], é proposto um modelo ótimo de programação da manutenção de trilhos ferroviários, que estima os custos de reparo da via e os custos associados ao risco de descarrilamento do trem devido a irregularidades no nível longitudinal da via férrea. A análise dos trilhos é indicada por meio das condições de deterioração medidas pelo desvio-padrão dos dados monitorados por carros de inspeção. Para calcular a estimativa dos custos, foram utilizados modelos da literatura e aplicou-se a análise estatística de dados de acidentes e manutenções ferroviárias. Este trabalho foi modelado como um problema de programação linear inteira e otimizado em duas etapas. Primeiramente foi maximizada a eficiência da manutenção, denominada OTMS, e, em sequência, foram desenvolvidos modelos que estimam os custos da manutenção e riscos associados ao descarrilamento por desgaste do trilho, resultando nas condições ideais para se manter o trilho, que não ofereçam perigo ao baixo custo. A eficiência da abordagem proposta é demonstrada em uma rede ferroviária, validando os resultados da estimativa, usando dados numéricos reais.

Desta forma, a abordagem proposta diferencia-se das demais não pela forma como determina o planejamento ótimo da manutenção, baseando-se em métodos de confiabilidade, e sim pela utilização de uma metodologia que avalia a relação de compromisso entre os custos e riscos associados às políticas de manutenção. Além disso, outra diferença desta abordagem com os trabalhos citados anteriormente é o horizonte de planejamento da manutenção de longo prazo que, até então, vinha sendo tratado

em um período de observação singular.

# Capítulo 3

## Metodologia

O método proposto para a otimização do planejamento da recuperação de vagões de uma empresa de transporte ferroviário consiste em um modelo bi-objetivo com a finalidade de minimizar os custos de intervenções e os riscos associados às falhas ao longo de um período de análise.

O desenvolvimento do algoritmo de otimização utilizou os dados da empresa VLI, os quais foram selecionados de acordo com um cenário em que fosse possível verificar a qualidade dos resultados obtidos pela ferramenta.

Os dados de confiabilidade das intervenções foram estimados por meio de um modelo estatístico, considerando que as falhas se comportam conforme a distribuição de probabilidade que melhor se adequa ao comportamento dos dados de falhas.

### 3.1 Estudo de Caso

Esta pesquisa foi desenvolvida na empresa de logística VLI, que integra portos, ferrovias e terminais. Com o intuito de validar a ferramenta implementada, foi escolhido um cenário com ambiente controlado, em um fluxo cativo, com vagões de mesmo modelo e que são carregados continuamente com as mesmas cargas.

O fluxo definido integra o corredor Centro Sudeste da VLI e engloba importantes regiões produtoras do país, além de ser uma das principais rotas de exportação para o porto de Santos e o terminal integrador Tiplam. Entre os principais fluxos de transporte do corredor Centro Sudeste está o transporte de rocha fosfática e enxofre para o Cliente A.

O transporte do Cliente A consiste no envio de enxofre e rocha fosfática úmida para a fábrica em Uberaba-MG. O enxofre é carregado no Tiplam e a rocha fosfática úmida é carregada na mina em Catalão-GO.

Para realizar o atendimento ao fluxo do cliente A, a VLI utiliza os vagões *hopper*, da série HPE, que possuem características e *design* específicos para o transporte destes produtos. Atualmente, a frota HPE possui 1053 vagões operacionais e sua manutenção é realizada na oficina de Goiandira-GO. Os vagões foram fabricados a partir do ano de 2002 e, atualmente, possuem uma idade média de 15 anos.

No entanto, ao realizar o transporte de produto altamente corrosivo, como o enxofre, os vagões HPE são submetidos a procedimentos como a utilização de marretas nas atividades de descarga dos terminais, que agravam a condição do revestimento interno. Além disso, por restrições operacionais, não foi possível cumprir algumas das recomendações do fabricante. Entre as boas práticas sugeridas pelo fornecedor, estão atividades como:

- inspeção periódica da pintura interna a cada seis meses para detectar e corrigir possíveis falhas na pintura;
- limpeza com detergente neutro a cada troca de produto carregado.

Tais orientações implicariam diretamente no *transit time* do fluxo, gerando uma indisponibilidade de vagões que não atenderia à necessidade de volume a ser transportado.

Esses pontos, com o passar do tempo, permitiram a deterioração do revestimento interno dos vagões, como é possível observar na Figura 3.1. Os defeitos do revestimento interno permitem o contato direto dos produtos carregados, enxofre (S) e fosfato (P205), com a chapa de aço da estrutura do vagão. Importante observar que o enxofre, quando em meio úmido, produz um ácido denominado ácido sulfuroso, de fórmula  $H_2SO_3$ , que, em contato com a estrutura do vagão, já sem o revestimento, acelera o processo de corrosão. Como efeito dessa corrosão, furos laterais começaram a surgir nos vagões em meados de 2014, expondo um alto risco ao processo de operação dos vagões devido ao vazamento de carga, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

Na maior parte dos casos, as manutenções direcionadas à superestrutura são realizadas por corretivas, dada a alta expectativa de vida dos materiais utilizados na estrutura do vagão. Porém, mediante as inúmeras variáveis envolvidas durante a utilização do ativo, como o descumprimento de orientações para a conservação e o transporte de cargas corrosivas, tem-se acelerado a degradação da caixa, aumentando a taxa de falhas dos vagões, elevando o número de ativos recusados para carregamento e autuações por vazamento de produto.

Por consequência, o tratamento para reestabelecer estes ativos requer altos custos e uma capacidade de execução não orçada, visto que estes custos não eram previstos



**Figura 3.1.** (a) Pintura Interna Corroída; (b) Vazamento de Produto nos Furos Laterais. Fonte:[VLI, 2018].

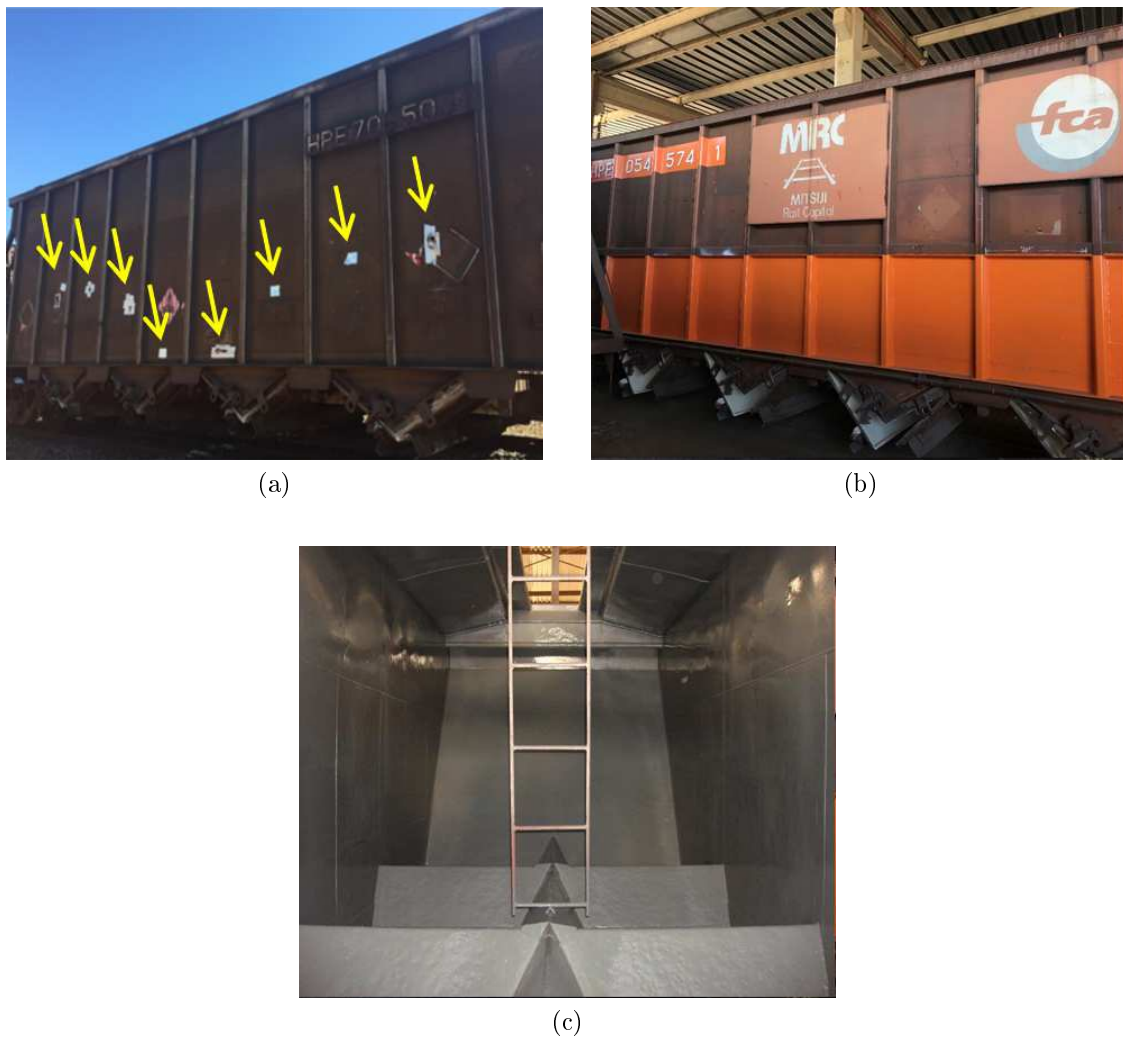
e não foram planejados com antecedência. Mediante a estratégia financeira da companhia, este tipo de intervenção é caracterizado como investimento, devido ao caráter atípico, e é amortizado em um horizonte de planejamento de dez anos, em razão do alto impacto agregado no caixa da companhia.

Para tanto, são definidos quatro escopos para a recuperação da superestrutura dos vagões HPE da VLI, que visam a estabelecer medidas preventivas direcionadas ao tratamento das anomalias de corrosão dos painéis laterais, teto e pintura interna, conforme pode ser observado na Figura 3.2, sendo detalhados a seguir:

- I **Nenhuma Intervenção** – não realizar nenhuma intervenção devido ao orçamento anual não ser suficiente;
- II **Tapa-Buraco** – aplicação do selante de poliuretano (PU) + chapa de zinco, para tapar os furos;
- III **Substituição da Chaparia** – substituição da chaparia de aço patinável A-242;
- IV **Revestimento Interno** – substituição da chaparia de aço carbono A36 + tratamento da superfície + revestimento de poliureia.

Quanto maior o nível do plano de recuperação, mais caro é o seu custo de intervenção e menor é sua probabilidade em falhar, ou seja, menor é o risco exposto.

O risco refere-se à probabilidade de o ativo falhar durante o processo produtivo e, por consequência, gerar custos operacionais não programados, que afetam diretamente



**Figura 3.2.** Planos de Recuperação: (a) Tapa-Buraco; (b) Substituição de Chapa e (c) Revestimento Interno. Fonte:[VLI, 2018].

as margens de lucro da empresa. Estes impactos podem ser observados na Figura 3.3 e são detalhados a seguir:

**Retenção** – a indisponibilidade do ativo por motivos de manutenção gera perda do volume por não ter vagão para transportar;

**Multa** – autuações por vazamento de carga e contaminação do meio ambiente.

Entretanto, cada vagão possui suas próprias características inerentes ao seu histórico de aquisição e tempo de vida. Assim, os vagões possuem um limite de vida útil quando completam 30 anos e ficam depreciados, entrando em desuso. Desse modo, a execução de um plano de manutenção, que dure mais que o tempo de vida estipulado para o ativo, gera custos desnecessários.



**Figura 3.3.** Riscos: (a) Vagão Retido na Oficina; (b) Vazamento de Produto.  
Fonte:[VLI, 2018]

O desafio é potencializado dados o grande número de ativos e o cenário econômico desafiador enfrentado pela empresa, em que não há orçamento disponível para executar a política de manutenção mais duradoura em todos os vagões.

Neste contexto, analisar todos os possíveis cenários para cada um dos vagões, atendendo a todas as restrições operacionais e orçamentárias, é uma tarefa complexa e exaustiva, uma vez que a avaliação de cada cenário caracteriza um problema de análise combinatória de grandeza exponencial. Com isso, torna-se necessário o estudo das melhores práticas de planejamento de manutenção e gestão de ativos a fim de minimizar os custos e maximizar a confiabilidade dos vagões.

## 3.2 Modelo Matemático

O problema proposto foi modelado como um problema de otimização bi-objetivo: a primeira função-objetivo é responsável pela minimização dos custos das intervenções a serem realizadas nos vagões em cada um dos anos e a segunda função-objetivo é responsável pela minimização dos custos associados aos riscos aos quais os vagões estão expostos para cada um dos anos. Ambas podem ser vistas nas Equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

O custo do risco é definido na Equação (3.3) pelo cálculo do custo da retenção multiplicado pela probabilidade de falha da intervenção  $k$  do vagão  $j$  no ano  $i$ , somado ao custo da multa multiplicado pela probabilidade de falha da intervenção  $k$  do vagão

$j$  no ano  $i$ .

$$\min \sum_{i=1}^{nAno} \sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CI_k \cdot X_{ijk} \quad (3.1)$$

$$\min \sum_{i=1}^{nAno} \sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CR_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (3.2)$$

$$CR_{ijk} = PF_{ijk} \cdot (CM + CD) \quad (3.3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=N}^{N+T-(1 \cdot \max(1, N+T-nAno))} \sum_{l=1}^4 X_{ijl} \leq (T-1)(1 - X_{Njk}) + 1 \quad (3.4)$$

$\forall j \in nVag, k = 3, \forall N \in \{1, \dots, 9\}, T = 2$

$$\sum_{i=N}^{N+T-(1 \cdot \max(1, N+T-nAno))} \sum_{l=1}^4 X_{ijl} \leq (T-1)(1 - X_{Njk}) + 1 \quad (3.5)$$

$\forall j \in nVag, k = 4 \mid \forall N \in \{1, \dots, 9\}, T = 6$

$$X_{ij5} \leq X_{(i-1)j3} + \sum_{m=\max(1, i-5)}^{i-1} X_{mj4} \quad \forall j \in nVag \quad (3.6)$$

$$X_{0j5} = 0 \quad \forall j \in nVag \quad (3.7)$$

$$X_{ij1} = 1 \forall i, j \mid i + TV_j > VU \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CI_k \cdot X_{ijk} \leq Or\zeta_i \quad \forall i \in nAnos \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=1}^5 X_{ijk} = 1 \quad \forall i, \forall j \quad (3.10)$$

$$X_{i,j} \begin{cases} 0 & \text{n\~{o} est\~{a} no plano} \\ 1 & \text{est\~{a} no plano} \end{cases} \quad (3.11)$$

Tendo como parâmetros de entrada do algoritmo:

$nAno$ : número de anos;

$nVag$ : número de vagões;

$nInt$ : número de intervenções;

$CM$ : custo da multa;

$CD$ : custo da indisponibilidade de vagão;

$PF_{ijk}$ : probabilidade de falha da intervenção  $k$ ;

$VU$ : vida útil dos vagões;

$Orç_i$ : orçamento do ano  $i$ .

Parâmetros calculados pelo algoritmo:

$CI_k$ : custo da intervenção  $k$ ;

$CR_{ijk}$ : custo do risco da intervenção  $k$ ;

$TV_j$ : tempo de vida do vagão  $j$ ;

$T$ : tempo de duração da intervenção;

$N$  e  $l$ : variáveis auxiliares que satisfazem as Restrições (3.4) e (3.5);

$m$ : variável auxiliar que satisfaz a Restrição (3.6).

Variáveis calculadas pelo modelo:

$X_{ijk}$ : variável de decisão da intervenção  $k$  no vagão  $j$  no ano  $i$ .

As restrições (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11) garantem que:

(3.4) e (3.5) – garantem que a execução da intervenção III não se repita a cada dois anos e a intervenção IV não se repita a cada quatro anos;

(3.6) – garante que a execução da intervenção V (não executar após intervenções III e IV) no  $i + 1$  após a intervenção III e no  $i + 1$ ,  $i + 2$  e  $i + 3$  após a intervenção IV;

(3.7) – não permite o vagão  $j$  iniciar com a intervenção  $V$  (não executar após intervenções III e IV);

(3.8) – garante a execução da intervenção I (nenhuma intervenção) sempre que o tempo de vida do vagão  $j$  + a duração da intervenção  $i$  for maior que a vida útil;

(3.9) – garante que o custo total das intervenções no ano  $i$  seja menor ou igual ao orçamento do ano  $i$ ;

(3.10) – garante que uma única política de intervenção seja atribuída a cada vagão em cada ano;

(3.11) – variável binária que indica a aplicação ou não da intervenção  $k$  ao vagão  $j$  no ano  $i$ .

Foi necessária a criação da intervenção  $V$  – “Não executar após intervenções III e IV”, em coerência ao modelo matemático proposto. O que difere a intervenção  $I$  da intervenção  $V$  é o valor da probabilidade de falha, que será detalhado na Subseção 3.3.2.

**V Não executar após intervenções III e IV** – condição do algoritmo.

### 3.3 Implementação

Resta, conhecendo todas essas variáveis, a decisão de escolher qual a melhor intervenção executar para cada um dos vagões, em um horizonte de tempo de dez anos, de modo a minimizar os custos e riscos associados às recuperações, não extrapolando os limites orçamentários e não alocando custos em vagões que entrarão em desuso.

Normalmente, o horizonte de planejamento das intervenções que serão realizadas em cada um dos vagões é definido anualmente, com base no conhecimento e na experiência de empregados, sem qualquer tipo de abordagem baseada em confiabilidade ou nas consequências que os riscos podem causar, atendendo apenas às restrições orçamentárias.

No entanto, corre-se o risco de essas recomendações não serem condizentes com o melhor cenário dentre as opções disponíveis, uma vez que este problema é de natureza combinatória e a avaliação de cada um dos inúmeros cenários e restrições é humanamente inviável. Dessa forma, grandes oportunidades de redução de custos passam despercebidas.

Em vista desta fragilidade, é fácil perceber a dificuldade em determinar o planejamento individualizado dos vagões, que otimiza os custos de ambos os objetivos de minimização dos custos e riscos associados à manutenção da superestrutura de vagões, em um horizonte de dez anos. Dentre os principais problemas, destacam-se:

- Grande número de ativos, o que dificulta uma análise individualizada por vagão;
- Alta complexidade para a alocação ótima dos custos de manutenção em um horizonte de dez anos, considerando as restrições de orçamento e vida útil;
- Dificuldade em associar os custos de manutenção e as consequências que os riscos podem causar.

Esta situação demonstra a alta complexidade do problema desta categoria e a necessidade em se desenvolver uma ferramenta computacional de otimização para suporte à tomada de decisão. Desta forma, a metodologia adotada neste trabalho pode ser estruturada e resumida em três etapas, descritas abaixo:

- Definição dos dados;
- Análise da confiabilidade;
- Ferramenta proposta.

### 3.3.1 Dados

Os dados utilizados na execução do algoritmo são referentes ao planejamento estratégico de 2018 da empresa sob análise. Para tanto, foram utilizados os seguintes dados para a otimização:

- **Quantidade de ativos** – 985 vagões HPE com sinais de deterioração na superestrutura;
- **Período planejado** – 10 anos, conforme estratégia de investimentos;
- **Vida útil dos vagões** – idade limite de 30 anos para qualquer tipo de vagão, conforme o regulamento patrimonial;
- **Idade dos vagões** – característica de cada um dos vagões de acordo com o lote de fabricação (dado de entrada por vagão).

A fim de preservar as informações sensíveis da empresa, os custos contidos neste trabalho foram padronizados na unidade de medida TB (Tapa-Buraco), dividindo-se os valores reais pelo menor valor das políticas de manutenção. Desta forma, a proporção entre os custos não é afetada e pode ser analisada sem a exposição de dados internos.

Desta maneira, foram definidos os valores dos custos das intervenções e a sua durabilidade esperada, conforme listado a seguir:

- I **Nenhuma Intervenção** – custo de **0TB** e um tempo de **12 meses**;
- II **Tapa-Buraco** – custo de **1TB** e duração de **6 meses**;
- III **Substituição da Chaparia** – custo de **14TB** e duração de **24 meses**;
- IV **Revestimento Interno** – custo de **40TB** e duração de **72 meses**;
- V **Não executar após intervenções III e IV** – custo de **0TB** e duração de **12 meses** (condição do algoritmo).

Em sequência, foram definidos os custos associados aos riscos, utilizando a mesma unidade de medida do menor custo de intervenção, que é o TB (Tapa-Buraco), conforme listado a seguir:

- **Retenção** – custo de **100TB** (para todas as intervenções);
- **Multa** – custo de **1.200TB** (para todas as intervenções).

Por fim, foi definido o custo limite do orçamento anual:

- **Orçamento Anual** – custo de **8.000TB** para todos os anos.

As funções de distribuição da probabilidade de falha foram pré-processadas para cada uma das intervenções e obtidas no *software* Minitab por meio do método de Máxima Verossimilhança, que estima os parâmetros de um modelo estatístico, considerando que as falhas se comportam conforme a distribuição de probabilidade que melhor se adeque ao comportamento dos dados de sobrevivência. Esta etapa é detalhada na sequência.

### 3.3.2 Análise de Confiabilidade

Conforme o comportamento dos dados de falhas dos vagões da empresa estudada, deseja-se determinar o modelo estatístico que melhor se adeque ao comportamento das

intervenções. Desse modo, foi utilizado o *software* Minitab, versão 16, para validar e estimar os modelos de distribuição estatística.

Para tanto, a análise da confiabilidade realizada neste trabalho foi elaborada conforme os passos abaixo:

- **Tratamento dos Dados** – retirar as falhas prematuras e tabular os dados censurados;
- **Teste de Anderson-Darling** – especificar a distribuição de probabilidade que melhor se adeque ao comportamento dos dados;
- **Método de Máximo Verossimilhança** – estimar os parâmetros que melhor representem a amostra de dados;
- **Probabilidade de Falha** – calcular a probabilidade de falha.

O processo de tratamento dos dados iniciou-se a partir da coleta das informações no sistema de gestão da manutenção, considerando o tempo até a falha *Time-To-Fail* (TTF), após a última intervenção realizada no processo de recuperação dos vagões, no período produtivo de 2017 e 2018. As variáveis quantitativas foram tabuladas e estruturadas em uma matriz em *Microsoft Excel* no formato ".csv" para facilitar a comunicação com a linguagem de programação do algoritmo.

Uma análise preliminar dos dados foi realizada de forma a retirar os dados com falhas prematuras com a finalidade de não poluir as amostras e, conseqüentemente, enviesar os modelos estatísticos. Os eventos prematuros ocorrem em intervalos de tempo precoce, podendo vir a ser falhas humanas no processo de execução da manutenção, ou seja, são eventos atípicos considerados como "*outliers*". Deste modo, foram removidos os dados com intervalos de tempo menores ou igual a 5% da duração da intervenção.

Os dados de sobrevivência são censurados à direita, dado que alguns vagões não apresentaram falhas até o período de observação definido e foram tabulados conforme a Equação (2.1) a fim de atender às condições para análise de dados censurados do Minitab.

Visto que a análise estatística aqui desenvolvida é caracterizada como probabilística, uma vez que os valores das variáveis não são conhecidos, busca-se especificar a distribuição de probabilidade que melhor se adeque ao comportamento dos dados por meio do teste de Anderson-Darling (AD), que mede o quão bem os dados seguem uma distribuição específica, sendo que, quanto menor o valor da estatística AD, melhor a distribuição ajusta-se aos dados. Os resultados são apresentados na Figura 3.4 e des-

tacam as distribuições selecionadas a partir dos gráficos probabilísticos para cada uma das intervenções.

Intervenção (II): Tapa-Buraco		Intervenção (III): Substituição da Chaparia		Intervenção (IV): Revestimento Interno	
Distribuição	Anderson-Darling	Distribuição	Anderson-Darling	Distribuição	Anderson-Darling
Weibull	13,371	Weibull	508,114	Weibull	947,068
Lognormal	14,746	Lognormal	508,119	Lognormal	947,663
Exponential	18,582	Exponential	508,110	Exponential	947,611
Loglogistic	14,196	Loglogistic	508,118	Loglogistic	947,053
3-Parameter Weibull	13,444	3-Parameter Weibull	508,108	3-Parameter Weibull	946,056
3-Parameter Lognormal	13,676	3-Parameter Lognormal	508,110	3-Parameter Lognormal	946,142
2-Parameter Exponential	17,113	2-Parameter Exponential	508,109	2-Parameter Exponential	946,317
3-Parameter Loglogistic	14,023	3-Parameter Loglogistic	508,110	3-Parameter Loglogistic	946,067
Smallest Extreme Value	15,558	Smallest Extreme Value	508,158	Smallest Extreme Value	947,915
Normal	14,293	Normal	508,159	Normal	947,294
Logistic	14,400	Logistic	508,161	Logistic	947,249

**Figura 3.4.** Resultados do Teste de Anderson-Darling (AD) para as Intervenções.

Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Figura 3.4, todas as intervenções se ajustam suficientemente bem à distribuição de Weibull.

Após determinar os modelos probabilísticos para cada uma das intervenções, realizou-se a análise para determinar os parâmetros de estimação que têm maior probabilidade de produzir os dados observados, considerando a distribuição de Weibull como modelo. Os ajustes da ferramenta levaram em consideração o teste de estimativa da Máxima Verossimilhança e um intervalo de confiança de 95%.

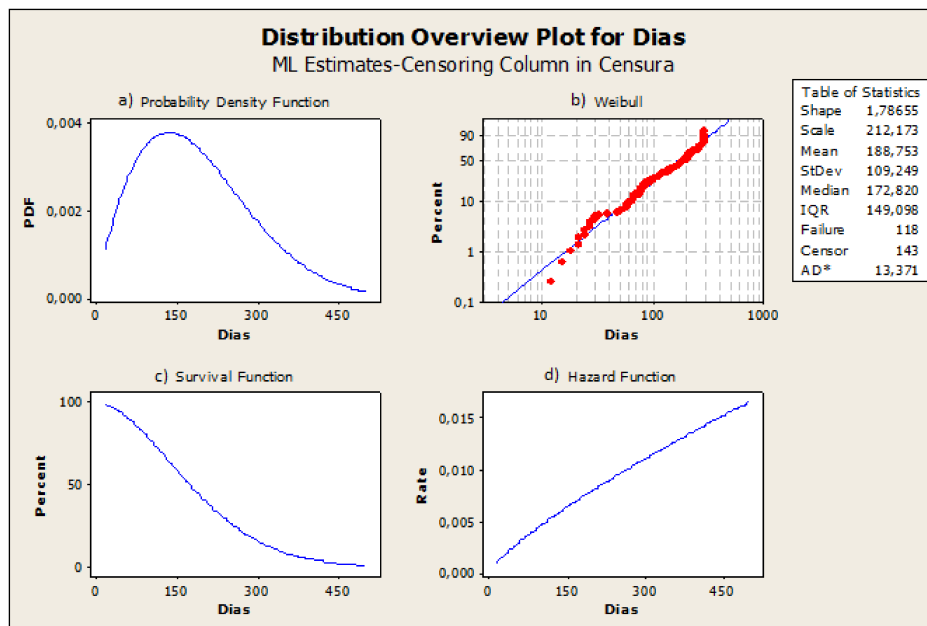
Por meio da Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7, podem-se observar os parâmetros estimados da distribuição de Weibull para as intervenções (II) Tapa-Buraco, (III) Substituição de Chaparia e (IV) Revestimento Interno, respectivamente. De posse dos parâmetros, podem-se obter todas as propriedades da distribuição, como as funções de confiabilidade  $f(t)$ ,  $R(t)$ ,  $F(t)$  e  $\lambda(t)$  para as intervenções em estudo.

É possível observar, no gráfico b) que os dados se ajustam satisfatoriamente à distribuição de Weibull, o que confirma a suposição do modelo ser adequado para a análise dos dados de vida do desgaste por corrosão dos vagões.

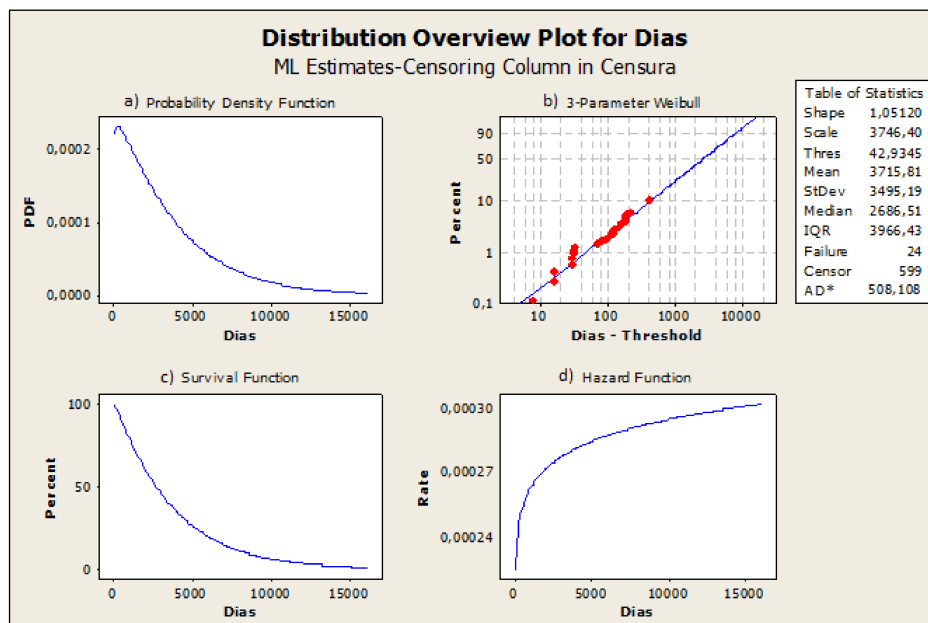
Ao analisar o estágio de vida útil em que se encontram as falhas das intervenções, nota-se que todos se encontram na fase final da curva da banheira ( $\beta > 1$ ), caracterizando os modos de falhas por desgaste ou morte senil.

A partir do cálculo da probabilidade de falha do modelo Weibull, é calculada a probabilidade de falha para cada uma das intervenções conforme as suas durações estipuladas na Subseção 3.3.1. As probabilidades de falha para cada uma das intervenções encontram-se abaixo e podem ser observadas na Figura 3.8.

**II Tapa Buraco (6 meses)** – probabilidade de **52,5%** de falha;



**Figura 3.5.** Funções de Weibull para a Intervenção (II) Tapa-Buraco. Fonte: Autor.

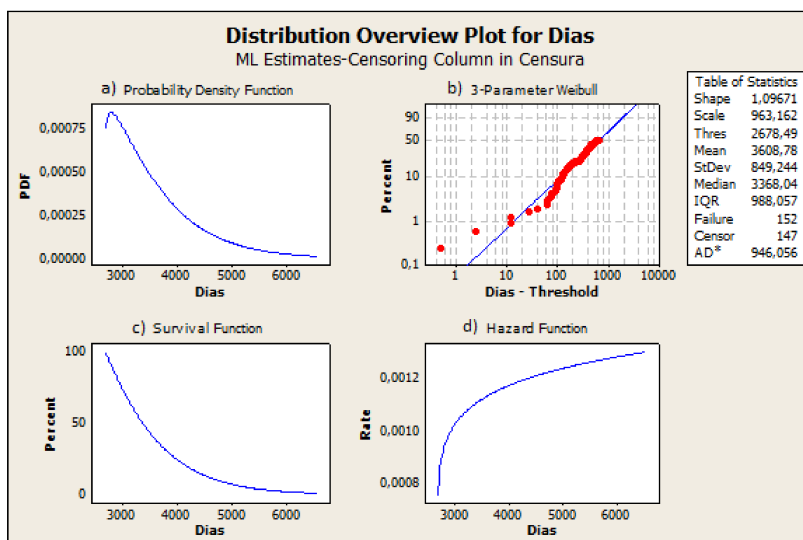


**Figura 3.6.** Funções de Weibull 3 parâmetros para a Intervenção (III) Substituição da Chaparia. Fonte: Autor.

III Substituição da Chaparia (2 anos) – probabilidade de 20,6% de falha;

IV Revestimento Interno (6 anos) – probabilidade de 0,95% de falha.

Visto que no plano *I* – “Nenhuma Intervenção”, o vagão já apresenta falha e



**Figura 3.7.** Funções de Weibull 3 parâmetros para a Intervenção (IV) Revestimento Interno. Fonte: Autor.

a criação do plano V – “Não executar após intervenções III e IV” foi necessária em coerência ao modelo matemático proposto, o que difere os dois planos, são os valores da probabilidade de falha conforme descrito abaixo:

I **Nenhuma Intervenção** – probabilidade de **100%** de falha;

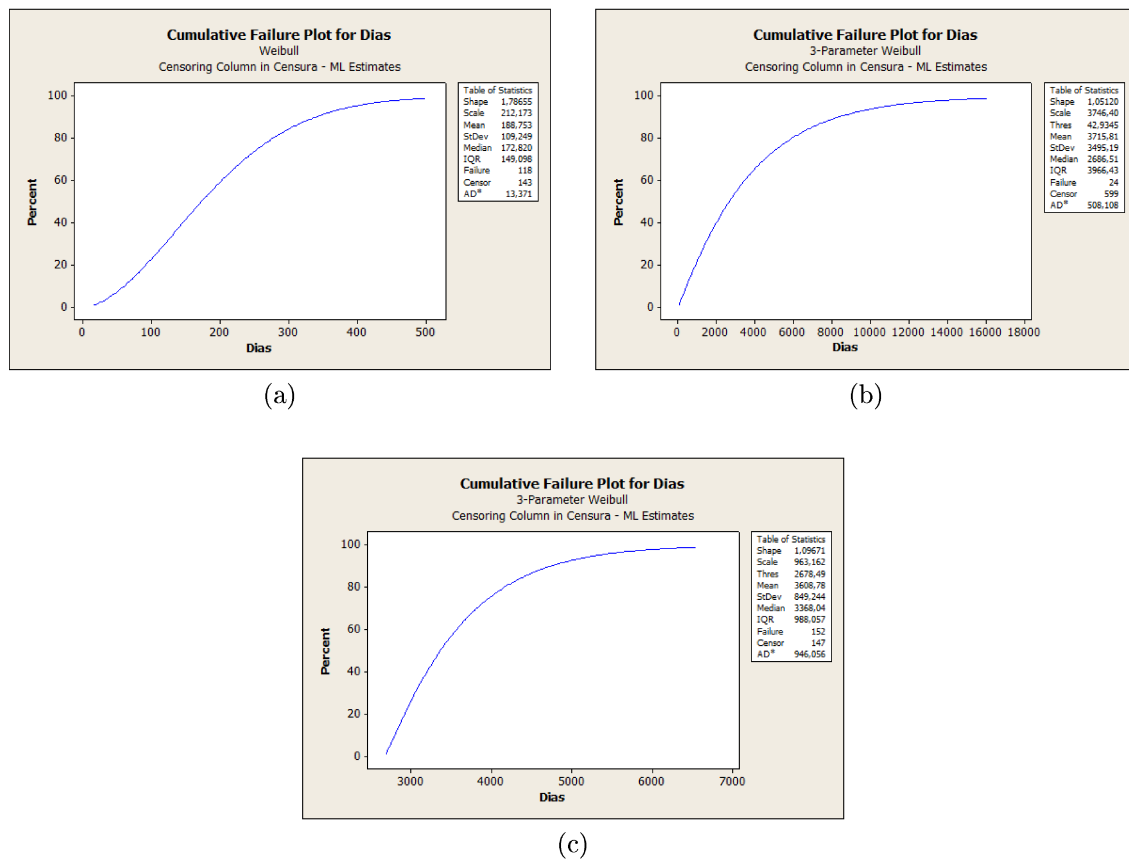
V **Não executar após intervenções III e IV** – probabilidade de **0%** de falha (condição do algoritmo).

### 3.3.3 Ferramenta Proposta

Para a resolução do problema de programação linear inteira, foi proposto o desenvolvimento de um algoritmo baseado na utilização do *solver* GUROBI integrado com a linguagem de programação C#, visto que são ferramentas utilizadas e autorizadas da empresa. Além destas ferramentas, também foi utilizado o *Microsoft Excel* para efetuar o *input* dos dados de entrada.

Por se tratar de um problema bi-objetivo, utilizou-se o método do  $\epsilon$ -restrito [Arroyo, 2002], selecionando a Equação (3.2) como objetivo principal e transformando a outra função-objetivo como uma restrição do problema, conforme Equação (3.12):

$$\min \sum_{i=1}^{nAno} \sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CI_k \cdot X_{ijk} \leq \epsilon_k \quad (3.12)$$



**Figura 3.8.** Falha Acumulada. (a) II - Tapa-Buraco; (b) III - Substituição de Chaparia e (c) IV - Revestimento Interno. Fonte:[MINITAB, 2016].

Na equação (3.12), o termo  $\epsilon_k$  refere-se ao valor máximo que a restrição pode alcançar. Com isso, esse valor irá variar entre um valor mínimo e um valor máximo a serem definidos de acordo com o custo de cada um dos planos de manutenção, bem como a quantidade de vagões a serem analisados.

Para melhor visualização dos resultados, foi definida a exibição de apenas 21 soluções na fronteira Pareto-ótima, reduzindo, assim, o tempo de processamento das otimizações. A forma como que a quantidade de soluções e o espaçamento entre elas foram definidos será detalhada no Capítulo 4.

Com as ferramentas e métodos estabelecidos, foi possível executar o algoritmo e obter os resultados esperados. Todo o processo e a estrutura do algoritmo serão detalhados nas etapas a seguir.

**DADOS DE ENTRADA** – nesta etapa, os dados a serem processados no algoritmo são inseridos por meio de planilhas em Excel com a extensão *.csv*, sendo gerado quatro arquivos contendo as seguintes informações:

- I – lista com a quantidade de vagões, contendo seus números de série e suas respectivas idades;
- II – lista com a quantidade de intervenções, contendo os seus custos, periodicidade de duração e probabilidade de falha;
- III – lista com os custos dos riscos, ou seja, o custo de multa e retenção;
- IV – lista com o período de tempo definido com os limites de orçamento para cada ano.

**PRÉ-PROCESSAMENTO** – nesta etapa, é realizada a leitura dos dados de entrada a serem processados para a construção do modelo de programação linear inteira. Deste modo, é calculado o custo do risco, multiplicando-o pela probabilidade de falha de cada uma das intervenções;

**OTIMIZADOR** – após o pré-processado de dados, é criado o modelo a ser executado pelo *solver* GUROBI. Nesta etapa, são realizados a otimização dos objetivos e as restrições definidas no método de  $\epsilon$ -restrito;

**RESULTADOS** – nesta etapa, são verificadas as soluções encontradas pelo GUROBI, sendo armazenadas somente aquelas que são não dominadas. Após selecionar as soluções ótimas do Pareto, é realizado o armazenamento em um arquivo externo *.csv* contendo: os valores das funções-objetivos para uma destas soluções selecionadas e os dados de qual intervenção foi realizada em cada um dos vagões e anos;

**FRONTEIRA PARETO-ÓTIMO** – ao final, é apresentando o gráfico da fronteira Pareto-ótima, para a seleção do resultado que melhor satisfaça a relação de *trade-off* entre custo e risco.

Todos os resultados foram obtidos em sua otimalidade, com um tempo computacional aceitável para o cenário real da empresa estudada.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados do estudo proposto para os dados da empresa VLI, em um cenário onde fosse possível validar as soluções obtidas pela ferramenta. O esquema de otimização proposto foi utilizado para atribuir as políticas de manutenção aos 985 vagões atualmente operacionais da empresa. Foram consideradas cinco políticas de manutenção sob restrições operacionais e orçamentárias, descritas na Subseção 3.1.

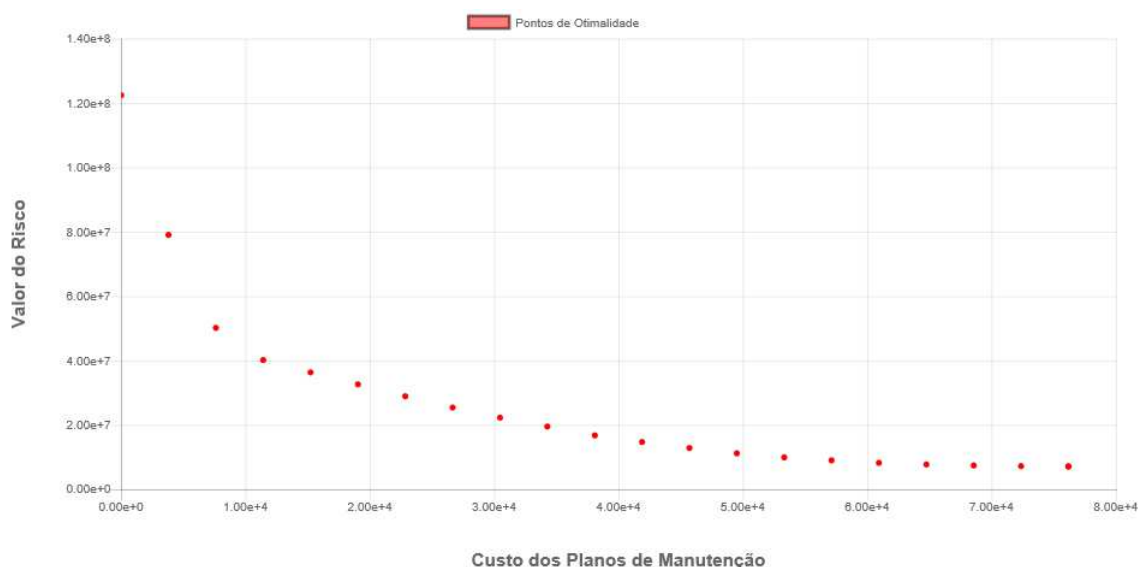
### 4.1 Resultados Computacionais

Os testes foram realizados utilizando-se um *notebook* com as seguintes configurações: sistema operacional *Windows 10 Pro*; processador *Intel Core I5-6300U* 2,5GHz; memória RAM de 8GB. O tempo computacional médio gasto para que a ferramenta encontrasse 21 soluções ótimas foi de 25 horas, perfeitamente compatível com a aplicação.

Conforme pode ser visto na Figura 4.1, a fronteira Pareto-ótima é formada por 21 soluções ótimas e cada ponto representa um cenário de aplicação das políticas de manutenção. O conjunto de soluções oferece uma quantidade significativa de cenários equilibrados para escolha, fornecendo, assim, boas informações para uma tomada de decisão clara e estratégica.

Conforme pode ser observado na Figura 4.1, a fronteira é bem regular e distribuída uniformemente. A fronteira Pareto obtida apresenta um conjunto de 21 soluções não dominadas, em que o controle do tamanho desse conjunto foi realizado por meio do ajuste do parâmetro  $\epsilon$  no modelo  $\epsilon$ -restrito, transformando a função-objetivo (3.12) em restrição.

Com a utilização da abordagem do  $\epsilon$ -restrito, foram definidos o valor mínimo e o valor máximo que pode ser atribuídos ao parâmetro  $\epsilon$ . Para a definição do valor



**Figura 4.1.** Fronteira Pareto-ótima com os 21 pontos selecionados.

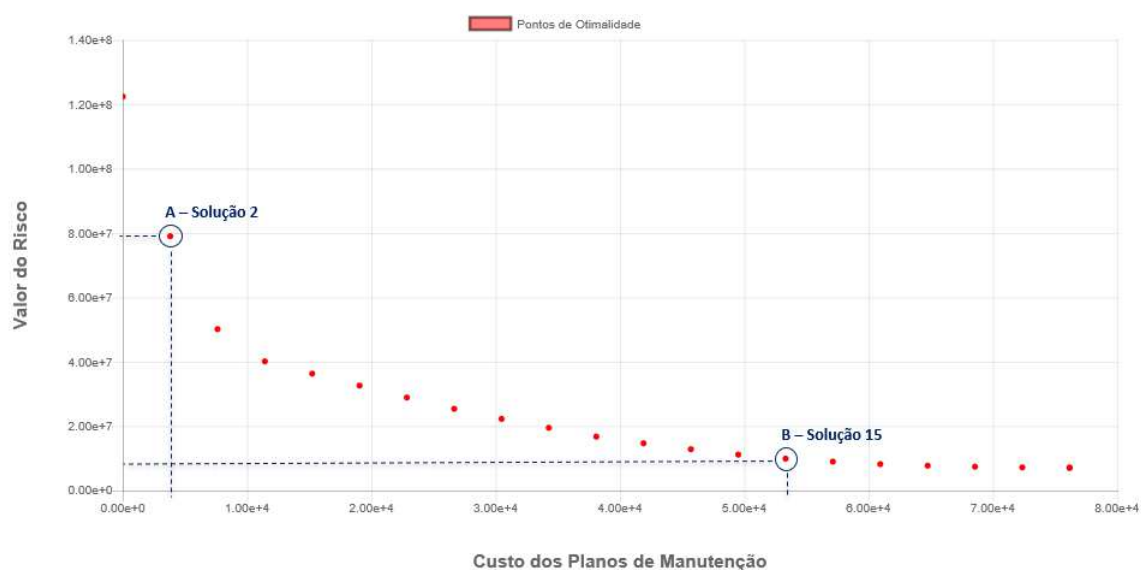
mínimo, foi considerado o menor valor possível para o custo de manutenção, assumindo a política de manutenção "I - Não Executar" em todos os vagões. Já a definição do valor máximo segue a mesma lógica, porém, assumindo a política de manutenção mais cara "IV - Revestimento Interno" para o máximo possível de vagões, de modo que não extrapole o limite de orçamento do ano.

Conforme pode ser observado na Figura 4.1, à medida que o custo de manutenção dos planos com maior confiabilidade é incrementado, há uma redução expressiva em relação ao custo do risco associado. Este comportamento pode ser observado na Tabela 4.1.

Ao considerar a classificação da primeira solução àquela que está mais à esquerda do gráfico da Figura 4.1, observa-se que, a partir da quarta solução, a redução do risco torna-se menos expressiva, mesmo com o aumento do custo de manutenção, e depois torna-se menos expressiva ainda na décima quinta solução. Esta condição ocorre devido ao grande número de vagões tratados com a política de manutenção "I - Nenhuma Intervenção", que não possui custo de manutenção, mas sua exposição ao risco é inevitável.

Foram examinadas duas soluções da fronteira Pareto-ótima denominadas A e B, a fim de se verificar a distribuição dos planos de manutenção e a variação do risco operacional associado. As soluções A e B podem ser observadas na Figura 4.2.

As duas soluções A e B estão detalhadas na Tabela 4.2, onde se pode observar a quantidade de políticas de manutenção classificadas para cada uma das soluções. Ao comparar as duas soluções, pode ser observado que a quantidade de manutenções do



**Figura 4.2.** Fronteira Pareto-ótima com soluções A e B.

Tipo "I – Nenhuma Intervenção" a serem executadas na solução A é bem superior à da solução B. Isso se dá devido à diferença entre o custo do risco associado para cada uma das intervenções ou a probabilidade de falhar.

Cada solução é representada por um vetor de 985 linhas e 10 colunas, onde cada linha representa um vagão e cada coluna representa um ano. Em cada posição, tem-se o valor 1, 2, 3, 4 ou 5, sendo que estes valores remetem às políticas de manutenção pré-definidas na Subseção 3.3.1. Na Figura 4.3, pode-se comparar a classificação do primeiro vagão até o vigésimo quinto das soluções A e B.

Pode-se observar que a restrição de não executar nenhuma intervenção caso a idade do vagão ultrapassar o limite da vida útil estipulado em 30 anos foi atendida para ambas as soluções. Os vagões de números 1, 2, 3, 4 e 5, possuem as idades 25, 26, 27, 28 e 29 anos, respectivamente. Desse modo, quando o vagão de número 1 completou 30 anos no ano seis, a intervenção classificada para ele, a partir daquele ano, foi sempre a política "I – Nenhuma Intervenção".

Percebe-se, também, que, na solução B, as restrições de executar a política "V – Não executar após as intervenções II e IV" foram atendidas. Como exemplo, o vagão de número 6, no ano quatro, foi classificado para realizar a intervenção "IV – Revestimento Interno" e os cinco próximos anos foram classificados como "V – Não executar após as intervenções II e IV".

Por fim, nota-se que, na Figura 4.4, a solução 21 confirma que a restrição de orçamento não foi extrapolada, limitando-se dentro do estipulado para os dez anos. O valor total apresentado de  $7,62e+4$  não ultrapassa a restrição orçamentária anual de

**Tabela 4.1.** Resultados da fronteira Pareto-ótima.

Solução	Custo Total da Manutenção	Custo Total do Risco
1	0	122.000.000
2	3.810	79.000.000
3	7.620	50.100.000
4	11.400	40.100.000
5	15.200	36.300.000
6	19.000	32.600.000
7	22.900	28.900.000
8	26.700	25.400.000
9	30.500	22.300.000
10	34.300	19.500.000
11	38.100	16.700.000
12	41.900	14.700.000
13	45.700	12.800.000
14	49.500	11.200.000
15	53.300	9.910.000
16	57.100	9.000.000
17	60.900	8.200.000
18	64.800	7.720.000
19	68.600	7.410.000
20	72.400	7.200.000
21	76.200	7.090.000

**Tabela 4.2.** Quantidade de manutenções classificadas nas soluções A e B.

	Plano I	Plano II	Plano III	Plano IV	Plano V
<b>Solução A</b>	6041	3809	0	0	0
<b>Solução B</b>	35	2681	3449	59	362

8.000TB, ou seja, 80.000TB ( $8,00e+4$ ) em um total de dez anos.

## 4.2 Validação da Metodologia

Para demonstrar a eficiência da metodologia aplicada, esta foi validada com os valores reais de custos da empresa no ano de 2019. Assim, foram coletados os dados reais de custos do ano de 2019 gastos na manutenção da superestrutura dos 985 vagões HPE, realizada dentro do limite de orçamento igual ao utilizado no algoritmo. Os resultados encontrados pela ferramenta podem ser vistos na Tabela 4.3.

A solução 0 representa o cenário Real de 2019 e as soluções de 1 a 21 representam as soluções Pareto-ótimas obtidas no algoritmo. Como pode ser observado, o custo de

Resultado: Solução A

Cód. Vagão	Ano.1	Ano.2	Ano.3	Ano.4	Ano.5	Ano.6	Ano.7	Ano.8	Ano.9	Ano.10
1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Resultado: Solução B

Cód. Vagão	Ano.1	Ano.2	Ano.3	Ano.4	Ano.5	Ano.6	Ano.7	Ano.8	Ano.9	Ano.10
1	2	3	5	3	5	1	1	1	1	1
2	3	5	3	5	1	1	1	1	1	1
3	2	3	5	1	1	1	1	1	1	1
4	3	5	1	1	1	1	1	1	1	1
5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	2	3	5	4	5	5	5	5	5	2
7	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
8	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
9	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2
10	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
11	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
12	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2
13	2	4	5	5	5	5	5	2	3	5
14	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2
15	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2
16	2	3	5	4	5	5	5	5	5	2
17	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
18	2	4	5	5	5	5	5	2	3	5
19	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
20	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2
21	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2
22	2	4	5	5	5	5	5	2	3	5
23	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
24	2	2	2	4	5	5	5	5	5	2
25	2	4	5	5	5	5	5	3	5	2

Figura 4.3. Classificação dos 25 primeiros vagões das Soluções A e B.

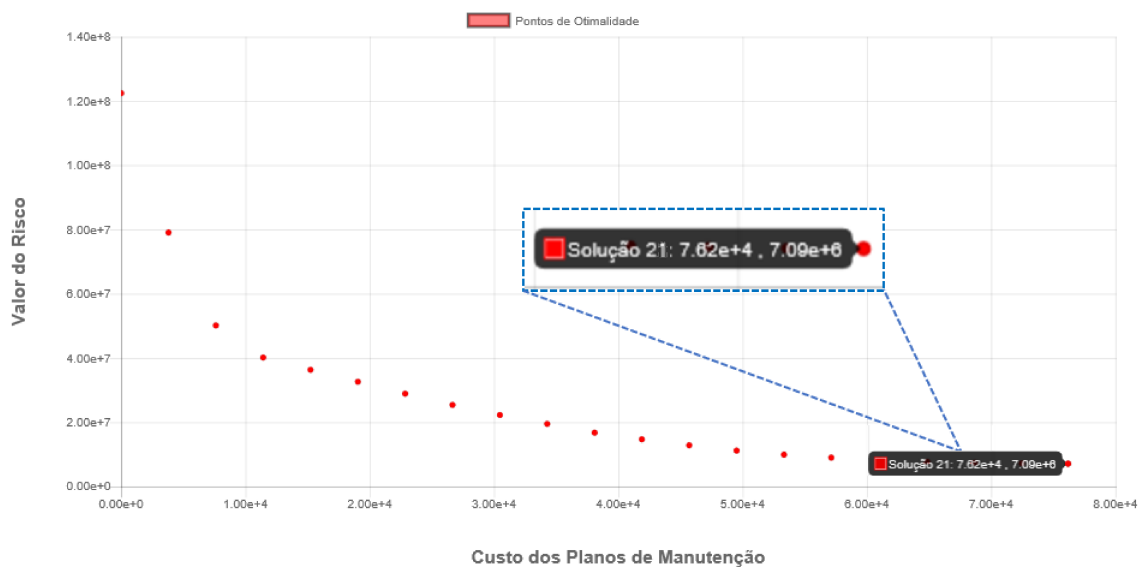


Figura 4.4. Custo do Risco e Custo de Manutenção da Solução 21.

manutenção do cenário real extrapolou levemente o limite de orçamento anual (8.047) e apresentou um alto valor de exposição ao risco (519.918).

Ao observar as soluções do algoritmo, a partir da solução 9, todas as soluções apresentam valores de intervenção bem próximos aos valores do cenário real (7.992),

**Tabela 4.3.** Custo do 1º ano real e do 1º ano das soluções do algoritmo.

Solução	Custo da Manutenção em 10 anos	Custo da Manutenção no 1º ano	Custo do Risco no 1º ano
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8.047</b>	<b>519.918</b>
1	0	0	1.182.000
2	3.810	404	859.909
3	7.620	819	529.049
4	11.400	2.766	380.268
5	15.200	1.635	390.271
6	19.000	3.208	376.137
7	22.900	5.093	358.853
8	26.700	3.754	371.160
9	30.500	7.992	325.294
10	34.300	7.992	313.982
11	38.100	7.992	301.140
12	41.900	7.979	300.749
13	45.700	7.979	300.444
14	49.500	7.992	301.752
15	53.300	7.992	300.223
16	57.100	7.992	299.917
17	60.900	7.992	299.917
18	64.800	7.992	300.835
19	68.600	7.992	300.529
20	72.400	7.992	304.198
21	76.200	7.992	306.032

porém, os valores em relação ao custo do risco são bem menores entre (325.294) e (306.032).

Tem-se, comparando os custos do cenário real com a solução 9 obtida pelo algoritmo, uma pequena redução de 0,7% em relação ao valor de manutenção e uma expressiva redução de 37,4% em relação ao valor do risco. Isto se dá devido ao fato de o cenário real (solução 0) ter optado por realizar uma quantidade considerável de manutenções do Tipo "I – Nenhuma intervenção", que expõe um alto risco à probabilidade de falhas, enquanto a solução 9 do algoritmo não classifica nenhuma manutenção deste Tipo. As duas soluções estão detalhadas na Tabela 4.4.

Ou seja, o algoritmo dispõe de soluções mais interessantes em relação ao cenário real realizado em 2019, mapeando soluções com o menor custo de manutenção e principalmente em relação à exposição ao risco.

Este comparativo mostra que existem oportunidades de melhoria nos processos da empresa e que a utilização da ferramenta gera uma economia considerável no pacote

**Tabela 4.4.** Quantidade de manutenções classificadas nas soluções 0 e 9 no 1º ano.

	Plano I	Plano II	Plano III	Plano IV	Plano V
<b>Solução 0 (Real)</b>	<b>309</b>	<b>121</b>	<b>549</b>	<b>6</b>	<b>0</b>
Solução 9 (algoritmo)	0	756	74	155	0

financeiro da companhia.



## Capítulo 5

# Conclusão e Trabalhos Futuros

Com a crescente demanda no setor produtivo, as empresas buscam maiores vantagens competitivas, em que os resultados estão diretamente interligados à confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Com isso, a estruturação de uma política de manutenção adequada, que garanta a segurança da operação com a melhor rentabilidade possível, está se tornando cada vez mais frequente nas ferrovias, uma vez que a falha do vagão durante o processo produtivo gera custos operacionais não programados que afetam diretamente as margens de lucro da empresa.

Neste contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor uma ferramenta para a otimização da política de manutenção, que determina uma alocação ótima de vagões para diferentes regimes de manutenção em um período de planejamento de longo prazo, sob restrições operacionais e orçamentárias. A metodologia desenvolvida fornece uma estrutura que integra tanto as perspectivas de manutenção quanto de planejamento, no sentido de estimar as probabilidades de falhas das políticas de manutenção, analisar os efeitos econômicos dessas falhas e definir um planejamento de longo prazo que minimize os custos associados à manutenção e aos riscos previstos de eventuais falhas.

Neste sentido, a ferramenta implementada apresentou resultados que possibilitaram identificar o custo do risco para cada um dos cenários da manutenção dos vagões, sendo possível saber o quanto se reduz em risco ao se investir em manutenções com menores probabilidades de falha. Com a fronteira Pareto-ótima apresentada, a tomada de decisão baseada no *trade-off* entre os custos de manutenção e risco torna-se muito mais simples para o usuário final. Além disso, a ferramenta apresenta uma lista contendo qual manutenção deve ser executada para cada um dos vagões em cada um dos anos do ciclo de investimentos.

Para validar a metodologia, foi realizada a execução em um conjunto de dados da

manutenção de vagões da empresa VLI. Esses dados coletados são referentes às políticas de manutenção utilizadas para o tratamento de falhas ocasionadas pela corrosão da superestrutura dos vagões que transportam enxofre. Eles representam o investimento de 985 vagões realizados no ano de 2019 para um horizonte de planejamento de dez anos. Foi feita então uma análise comparativa entre os resultados do primeiro ano de planejamento do cenário real de 2019 com as soluções apresentadas pela ferramenta. Com isso, foi constatado que os custos de manutenção foram bem próximos ao limite orçamentário, porém, houve uma diferença significativa nos custos associados aos riscos em que uma das soluções da ferramenta apresentou um ganho de 37,4%. Este comparativo mostra que existem oportunidades de melhoria nos processos da empresa e que a utilização da ferramenta gera uma economia considerável no pacote financeiro da companhia.

Por fim, conclui-se que as informações de confiabilidade dos ativos contribuem para o gerenciamento eficaz da manutenção, permitindo uma tomada de decisão que determine quando e quais recursos investir para a manutenção ideal dos vagões, tornando-a mais clara e compreensível para justificar eventuais solicitações do aumento de investimentos. Verificou-se, ainda, que a ferramenta desenvolvida apresentou resultados mais promissores quando comparados à metodologia usualmente praticada na empresa em estudo.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão, propõem-se os seguintes tópicos para a continuidade deste estudo:

- Expandir a aplicação da metodologia para outros modelos de vagões que possuem investimentos de manutenção na empresa de estudo;
- Aprimorar as funções de confiabilidade, incrementando, na base de dados, as falhas de 2019 e 2020;
- Implementar um módulo de auxílio à tomada de decisão que apoie o usuário na escolha da melhor solução.

## 5.2 Produção Bibliográfica

Oliveira, Breno Carvalho de; Almeida, Clayton Guimarães de; Silva, Breno Delgado; Carrano, Eduardo Gontijo;

**Proposta de Metodologia para Otimização dos Custos e Riscos Associados a Recuperação de Vagões de Enxofre;**

DOI 10.5151/2594-5327-33449;

74º Congresso Anual da ABM; vol. 74, num.74; 2019.

São Paulo: Editora Blucher, p-1487-1499.



**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS E RISCOS ASSOCIADOS A RECUPERAÇÃO DE VAGÕES DE ENXOFRE\***

*Breno Carvalho de Oliveira<sup>1</sup>  
Clayton Guimarães de Almeida<sup>2</sup>  
Breno Delgado Silva<sup>3</sup>  
Eduardo Gontijo Carrano<sup>4</sup>*

**Resumo**

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia para a análise multiobjetivo aplicada ao planejamento estratégico da intervenção de vagões de enxofre. A instância de teste é composta por 400 vagões HPE de propriedade da empresa VLI Logística SA, que foram deteriorados pelo alto nível de corrosão do produto transportado. Deste modo, tem como objetivo a minimização dos custos de recuperação e riscos para um horizonte de planejamento de 10 anos. O problema foi modelado através de programação linear inteira e implementou-se um algoritmo para a tratativa do problema utilizando a abordagem  $\epsilon$ -Restrito, para obtenção das soluções pareto ótimo e posterior tomada de decisão. Por fim, através de uma simulação prévia e seleção de uma solução conservadora, obteve-se como resultado a redução de 20% de custos para o ciclo orçamentário de 10 anos. Mostrando a eficiência da metodologia.

**Palavras-chave:** Otimização Multiobjetivo; Minimização de Custos, Vagões de Enxofre; Engenharia de Manutenção.



# Referências Bibliográficas

- ABNT (1994). Nbr 5462 - confiabilidade e manutenibilidade. Norma, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2015). Nbr 11691 - vagão ferroviário - classificação, identificação e marcação. Norma, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ANTT (2013). Investimentos e projetos associados. Norma, Agência Nacional de Transportes Ferroviários, Brasília.
- Arroyo, J. E. C. (2002). *Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Colosimo, E. A. & Giolo, S. R. (2006). *Análise de Sobrevivência Aplicada*. Blucher, first edição.
- Costa, E. M. (2018). Análise estrutural de um vagão graneleiro em compósitos. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.
- Dias, T. M. S.; Costa, F. A.; Cassemiro, S.; Martelli, D.; Machado, B. & Guimarães, G. V. (2015). Manutenção centrada na confiabilidade em ferrovias de cargas em Área urbana.
- Dong, Y. & Frangopol, D. M. (2015). Risk-informed life-cycle optimum inspection and maintenance of ship structures considering corrosion and fatigue. *Ocean Engineering, Elsevier*, 101. ISSN 0029-8018.
- dos Santos, S. (2011). *Transporte ferroviário: história e técnicas*. Cengage Learning, first edição.
- Fogliato, F. & Ribeiro, J. (2009). Confiabilidade e manutenção industrial. *Elsevier Editora Ltda*, 1. ISSN 9788535233537.

- Kardec, A. & Nascif, J. (2012). *Manutenção – Função Estratégica*. São Paulo, fourth edição.
- Li, Y.; Yeddapanudi, S.; McCalley, J. D.; Chowdhury, A. A. & Jewell, W. (2006). Resource management for distribution system maintenance using optimized risk reduction. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 09. ISSN 978-91-7178-585-5.
- MINITAB (2016). Statistical software data analysis. Versão 16.
- Miranda, M. (2018). Análises de dados de vida e conceitos fundamentais da engenharia da confiabilidade. Notas de aula, Instituto de Ensino Superior Alberth Einstein, São Paulo.
- Miwa, M. & Oyama, T. (2017). An optimal track maintenance scheduling model analysis taking the risk of accidents into consideration. *International Transactions Operational Research*, 25. ISSN 1475-3995.
- Moubray, J. (2000). *Reliability-centred Maintenance*. Industrial Press, Inc, second edição.
- Podofillini, L.; Zio, E. & Vatn, J. (2006). Risk-informed optimisation of railway tracks inspection and maintenance procedures. *Reliability Engineering e System Safety*, 91. ISSN 0951-8320.
- Reliasoft (2006). Manutenção centrada em confiabilidade. Notas de aula, Reliasoft Brasil, São Paulo.
- Reliawiki (2020). The weibull distribution. Acessado em maio 2020.
- Rezvanizani, S. M.; Barabady, J.; Valibeigloo, M.; Ashghari, M. & Kumar, U. (2009). Reliability analysis of the rolling stock industry: A case study. 5. ISSN 0973-1318.
- Rodriguez, T. F. O. (2018). Contribuições ao modelo de manutenção preventiva “piggy-back” pela abordagem multicritério e de gestão de sobressalentes. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- RRVW, R. C. (2020). Repair. Acessado em maio 2020.
- Siementkowski, N. F. (2016). Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

- Siqueira, I. P. (2005). *Manutenção Centrada na Confiabilidade*. Qualitymark, first edição.
- Souza, R. D. (2008). Análise da gestão da manutenção: estudo de caso mrs logística. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Spiroiu, M. A. (2015). Reliability analysis of railway freight wagon wheelset. *Applied Mechanics and Materials*, 809-810. ISSN 1662-7482.
- van der Westhuizen, N. J. & Gräbe, P. J. (2013). The integration of railway asset management information to ensure maintenance effectiveness. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 55. ISSN 2309-8775.
- VLI (2018). *Manual Técnico de Vagões*. VLI Logística, Belo Horizonte.
- Wendland, L. S. & Tauchen, J. (2010). Gestão estratégica da manutenção. *FAHOR*.
- Zvolensky, P.; Stuchly, V.; Grecik, J. & Poprocky, R. (2014). Evolution of maintenance systems of passenger and freight wagons from the ecm certification point of view. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 16. ISSN 2585-7878.