



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



THALES LEONARDO SANTOS

**APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DMAIC NA MANUTENÇÃO
PREVENTIVA DE CAMINHÕES BASCULANTES DE TRAÇÃO 8X4: O
CASO DE UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2025

THALES LEONARDO SANTOS
thales.leonardo@aluno.ufop.edu.br

**APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DMAIC NA MANUTENÇÃO
PREVENTIVA DE CAMINHÕES BASCULANTES DE TRAÇÃO 8X4: O
CASO DE UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito para a obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Washington Luís Vieira da Silva

OURO PRETO – MG
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Thales Leonardo.

Aplicação da ferramenta DMAIC na manutenção preventiva de caminhões basculantes de tração 8x4 [manuscrito]: o caso de uma empresa de mineração. / Thales Leonardo Santos. - 2025.
121 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Washington Luís Vieira da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Administração - Ferramenta DMAIC. 2. Manutenção - Manutenção Preventiva. 3. Minas e recursos minerais. 4. Caminhões - Caminhões basculantes. I. Silva, Washington Luís Vieira da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thales Leonardo Santos

Aplicação da ferramenta DMAIC na manutenção preventiva de caminhões basculantes de tração 8x4: o caso de uma empresa de mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 13 de Agosto de 2025

Membros da banca

DSc. Washington Luis Vieira da Siva - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Washington Luís Vieira da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2025, às 07:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0965624** e o código CRC **4B5BD83F**.

À minha mãe e minha irmã, por serem meu porto seguro em todos os momentos.

Aos amigos que Ouro Preto me deu, pelas risadas, pelos silêncios confortáveis e por todo apoio.

Ao meu orientador, pela paciência, orientação e confiança ao longo de todo processo.

E àquela voz que tocava nos fones quando tudo parecia demais.

AGRADECIMENTO

À minha mãe, pelo amor incondicional, força e exemplo que me guiaram em cada etapa desta jornada.

À minha irmã, pela parceria constante, conselhos certos e apoio em todos os momentos.

Ao meu pai, pela presença em minha trajetória e por tudo que me ensinou, mesmo nas entrelinhas.

Aos amigos que Ouro Preto me deu, pelas risadas, pelas conversas sinceras, pelo companheirismo e por tornarem a caminhada mais leve.

Ao meu orientador, Washington, pela orientação cuidadosa, paciência e confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, por suas valiosas contribuições ao meu aprendizado e à construção deste projeto.

E à Miley Cyrus, por meio de suas músicas, que trouxeram força e alívio em momentos difíceis, sendo uma companhia silenciosa, mas essencial.

“Torna-te quem tu és”.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O presente trabalho aborda o problema das paradas prematuras de caminhões basculantes GX00 de tração 8x4 após a realização de manutenções preventivas em uma mineradora. Justifica-se o estudo pela importância da manutenção preventiva na mineração, bem como pela necessidade de aprimorar continuamente os processos de manutenção diante das demandas por maior eficiência e redução de desperdícios. O objetivo do trabalho consistiu em aplicar a ferramenta DMAIC na análise de causas de falhas para propor soluções que melhorem a performance da manutenção preventiva dos equipamentos. Trata-se de uma pesquisa exploratória, com abordagem mista, que integra análises qualitativas para interpretar as causas e contextos das falhas e quantitativas para examinar métricas de desempenho. Foram utilizados procedimentos técnicos bibliográficos, documentais e um estudo de caso com dados coletados entre dezembro de 2023 e maio de 2024. Na fase definir, foram realizados o mapeamento do processo, o contrato do projeto para formalização do escopo e definida a meta com base em análise estatística. Em medir, estratificaram-se os dados de falhas em modos de falha e componentes, além do cálculo do nível sigma, indicador de desempenho do processo. A fase analisar possibilitou identificar e priorizar as causas raízes por meio de ferramentas como o diagrama de causa e efeito, matriz de priorização e método dos Porquês. Em melhorar, foram propostas ações de correção, como a revisão dos planos de manutenção, ajustes nos procedimentos operacionais e reforço no treinamento das equipes. Por fim, na fase controlar, elaborou-se um plano de sustentabilidade, com definição dos pontos de monitoramento e do acompanhamento do indicador PFPP. Conclui-se que o estudo atingiu seus objetivos ao diagnosticar as causas dos problemas e estruturar propostas voltadas para a melhoria da performance da manutenção preventiva dos caminhões, oferecendo base para futuras aplicações práticas.

Palavras-chave: DMAIC. Manutenção preventiva. Mineração. Caminhões GX00. Melhoria contínua.

ABSTRACT

This study addresses the problem of premature stoppages of GX00 8x4 haul trucks after preventive maintenance in a mining company. The research is justified by the importance of preventive maintenance in mining, as well as the need to continuously improve maintenance processes in response to demands for greater efficiency and waste reduction. The objective of the work was to apply the DMAIC methodology to analyze the causes of failures and propose solutions to improve the performance of preventive maintenance of the equipment. It is an exploratory research, with a mixed approach, integrating qualitative analyses to interpret the causes and contexts of failures and quantitative analyses to examine performance metrics. The technical procedures adopted included bibliographic and documentary research, as well as a case study with data collected between December 2023 and May 2024. In the define phase, the process mapping, the project charter for scope formalization, and the statistical definition of the project goal were carried out. In measure, failure data were stratified into failure modes and components, in addition to the calculation of the sigma level, an indicator of process performance. The analyze phase enabled the identification and prioritization of root causes using tools such as the cause-and-effect diagram, prioritization matrix, and the 5 Whys method. In improve, corrective actions were proposed, such as the revision of maintenance plans, adjustments to operational procedures, and reinforcement of team training. Finally, in the control phase, a sustainability plan was developed, with the definition of monitoring points and the tracking of the PFPP indicator. It is concluded that the study achieved its objectives by diagnosing the causes of the problems and structuring proposals aimed at improving the performance of preventive maintenance of the trucks, while also providing a foundation for future practical applications.

Key-words: DMAIC. Preventive maintenance. Mining. GX00 trucks. Continuous improvement.

LISTA DE SIGLAS

5S – *Seiri* (Senso de utilização), *Seiton* (Senso de ordenação), *Seiso* (Senso de limpeza), *Seiketsu* (Senso de padronização), *Shitsuke* (Senso de disciplina)

5W2H – *What* (O quê), *Who* (Quem), *When* (Quando), *Where* (Onde), *Why* (Por quê?), *How* (Como) e *How Much* (Quanto)

AGPL – Aguardando Planejamento

AGPR – Aguardando Programação

DMAIC – *Define* (Definir), *Measure* (Medir), *Analyse* (Analisar), *Improve* (Melhorar) e *Control* (Controlar)

DPMO – Defeitos Por Milhões de Oportunidades

ELC – *Extended Life Coolant* (Fluido de Arrefecimento de Longa Vida)

EXCT – Executado

FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos)

FTA – *Fault Tree Analysis* (Análise da Árvore de Falhas)

IQR – Intervalo interquartil

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

PDCA – *Plan* (Planejar), *Do* (Fazer), *Check* (Checar) e *Act* (Agir)

PFPP – Primeira Falha Após Manutenção Preventiva

PROG – Programado

SIPOC – *Suppliers* (Fornecedores), *Inputs* (Entradas), *Process* (Processo), *Outputs* (Saídas), *Customers* (Consumidores)

TI – Tecnologia da Informação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Questões que orientam a adoção da manutenção corretiva planejada.	8
Figura 2 - Carta de Controle para os valores da viscosidade das produções do último trimestre de 2011.	15
Figura 3 - Exemplo de Project Charter.	16
Figura 4 - Gráfico de pareto para tipos de acidentes de trabalho.	18
Figura 5 - Diagrama de causa e efeito ou espinha de peixe.	19
Figura 6 - Estratificação de roupas danificadas em uma lavanderia.	20
Figura 7 - Exemplo de matriz de priorização.	21
Figura 8 - Exemplo de uso do método dos porquês.	23
Figura 9 - Exemplo de plano de ação 5W2H.	24
Figura 10 - Tabela parcial de conversão de DPMO para nível sigma.	25
Figura 11 – Diagrama SIPOC da Encomenda à Entrega da AutoRec.	27
Figura 12 - Componentes de um <i>boxplot</i>	28
Figura 13 - Atividades e ferramentas da etapa “Definir”.	30
Figura 14 - Atividades e ferramentas da etapa "Medir".	32
Figura 15 - Atividades e ferramentas da etapa "Analisar".	34
Figura 16 - Atividades e ferramentas da etapa "Melhorar".	36
Figura 17 - Atividades e ferramentas da etapa "Controlar".	38
Figura 18 - Metodologia proposta em um fluxograma.	41
Figura 19 - Estrutura organizacional da empresa estudada.	47
Figura 20 - Caminhão da frota Scania G500.	50
Figura 21 - Motor H13.	50
Figura 22 - Engrenagens de distribuição do motor H13.	51
Figura 23 - Árvore de transmissão do caminhão.	52
Figura 24 - Caixa de mudanças do caminhão.	52
Figura 25 - Suporte dianteiro do chassi do caminhão.	53

Figura 26 - Para-choque do caminhão.	53
Figura 27 - Teto da cabine do caminhão.	54
Figura 28 - Assoalho da cabine.	55
Figura 29 - Feixe de molas do eixo dianteiro.	56
Figura 30 - Detalhes do eixo dianteiro do equipamento.	57
Figura 31 - Carcaça do eixo traseiro.	58
Figura 32 - Roda de disco do freio a tambor.	59
Figura 33 - Sapata do freio a tambor.	60
Figura 34 - Motor de partida do equipamento.	61
Figura 35 - Alternador do equipamento.	61
Figura 36 - Bateria do caminhão.	62
Figura 37 - Volante de direção.	63
Figura 38 - Radiador do equipamento.	64
Figura 39 - Esquema representativo do indicador PFPP.	65
Figura 40 - Dados do indicador PFPP e dados das falhas após manutenção preventiva planilhados no excel.	65
Figura 41 – Carta controle do PFPP para todas as frotas.	66
Figura 42 – Carta controle do PFPP para as frotas SKT-00 e SKT-01.	67
Figura 43 – Carta controle do PFPP para as frotas GX00 e GX01.	68
Figura 44 – Carta controle do PFPP para a frota GX01.	69
Figura 45 – Carta controle do PFPP para a Frota GX00.	69
Figura 46 - Indicador do PFPP [h] por semana para a frota GX00.	74
Figura 47 - Boxplot do indicador PFPP da frota GX00 por semana.	75
Figura 48 - Contrato de projeto.	76
Figura 49 - Estratificação das falhas após manutenção preventiva.	78
Figura 50 - Pareto de modos de falha.	79

Figura 51 - Pareto para o tipo de fluido que foi complementado.	80
Figura 52 - Pareto do tipo de fluido em vazamentos.	81
Figura 53 - Pareto de componentes que mais falharam no sistema elétrico.	83
Figura 54 - Pareto de componentes estruturais que mais falharam.	84
Figura 55 - Diagrama de Ishikawa para a parada precoce dos caminhões após manutenção preventiva.	87
Figura 56 - Boxplot de pontuação da matriz de priorização.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.	44
Tabela 2 - Média de PFPP em horas para as diferentes configurações de frotas estudadas.....	70
Tabela 3 - Mapeamento do processo no SIPOC.....	71
Tabela 4 - Matriz de priorização das causas levantadas no diagrama de Ishikawa.....	89
Tabela 5 - Plano de ação 5W2H.....	96
Tabela 6 - Plano de sustentabilidade do projeto.....	100

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Manutenção	5
2.2	Tipos de manutenção	6
2.3	Metodologia Seis Sigma.....	14
2.3.1	Ferramentas do Seis Sigma.....	14
2.4	DMAIC.....	29
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	Tipos de pesquisa.....	40
3.2	Materiais e Métodos	41
3.3	Variáveis e indicadores.....	43
3.4	Instrumento de coleta.....	44
3.5	Tabulação dos dados.....	44
3.6	Considerações finais	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Caracterização da empresa	46
4.2	Descrição dos equipamentos	48
4.3	Processo de seleção do equipamento.....	64
4.4	Definir.....	70
4.5	Medir	77
4.6	Analisar.....	86
4.7	Melhorar	94
4.8	Controlar.....	99
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	102
5.1	Conclusão	102

5.2	Recomendações	103
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....		104

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

As empresas dependem de funções organizacionais integradas, como produção, vendas e manutenção, para alcançar seus objetivos estratégicos. Cada uma dessas áreas contribui de maneira essencial para o funcionamento eficiente da organização. Nesse contexto, a manutenção se destaca como um dos pilares que sustentam a continuidade operacional e o desempenho produtivo.

A norma NBR ISO 5462 (1994, p.6) define a manutenção como “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

Dentre os tipos de manutenção, uma que se destaca é a manutenção preventiva devido à sua atuação proativa na identificação prematura de possíveis falhas. Essa abordagem garante que os ativos mantenham sua funcionalidade e segurança operacional, minimizando interrupções e otimizando o uso eficiente dos recursos disponíveis (ALMEIDA, 2014).

Para Xenos (1998), a manutenção preventiva envolve atividades como inspeções, reformas e substituições de peças antes que atinjam seus limites de vida útil. Essa prática reduz a ocorrência de falhas inesperadas, aumenta a disponibilidade dos equipamentos e proporciona maior controle sobre as paradas, muitas vezes resultando em economia ao longo do tempo, mesmo com custos iniciais mais elevados (XENOS, 1998).

Dessa forma, a manutenção desempenha um papel crucial nos resultados. No entanto, à medida que as demandas por maior produtividade e redução de custos aumentam, torna-se necessário implementar melhorias contínuas nos processos de manutenção. Nesse cenário, a cultura do *Lean* Seis Sigma se apresenta como uma abordagem eficaz para identificar problemas e otimizar processos.

Segundo, Brenig-Jones e Dowdall (2023), o pensamento *Lean* busca aumentar o valor para o cliente ao melhorar o fluxo dos processos e eliminar desperdícios. Inspirado nas ideias de Henry Ford, foi aprimorado pela Toyota com o Sistema Toyota de Produção, que adaptou a produção de alto volume e baixa variedade para alta variedade e baixo volume. Embora inicialmente associado à manufatura, o *Lean* também incorporou práticas de serviços, como o *just in time* e o sistema visual, inspirado em um supermercado norte-americano visitado por Kiichiro Toyoda e Taiichi Ohno (BRENIG-JONES e DOWDALL, 2023).

Dentro da abordagem *Lean*, o DMAIC destaca-se como uma ferramenta essencial para estruturar iniciativas de melhoria contínua. Suas etapas oferecem um método sistemático para identificar problemas, analisar suas causas e implementar soluções que promovam maior eficiência e alinhamento com os princípios enxutos (WERKEMA, 2021).

Para Werkema (2021, p.87):

O método DMAIC é constituído por 5 etapas: D – *Define* (Definir): Definir com precisão o escopo do projeto; M – *Measure* (Medir): Determinar a localização ou foco do problema; A – *Analyze* (Analisar): Determinar as causas de cada problema prioritário; I – *Improve* (Melhorar): Propor, avaliar e implementar soluções para cada problema prioritário; C – *Control* (Controlar): Garantir que o alcance da meta seja mantido a longo prazo.

A metodologia DMAIC é amplamente utilizada para otimizar processos e ativos, buscando maior eficiência e redução de custos. No setor de mineração, essa abordagem permite o planejamento estruturado das etapas necessárias para alcançar os objetivos propostos. A empresa estudada utiliza o DMAIC para orientar melhorias que aprimorem seus resultados operacionais e estratégicos, gerando resultados expressivos e otimizando continuamente os recursos.

O estudo presente tem como objetivo aplicar as fases da ferramenta DMAIC para a possibilidade de melhoria na performance de caminhões de uma empresa do setor de mineração, no processo de manutenção preventiva. O foco é identificar modos de falha que afetam a disponibilidade e o desempenho dos caminhões. Por meio das etapas do DMAIC, busca-se analisar as causas dessas falhas e propor soluções que otimizem a operação.

Diante do contexto, tem-se a seguinte problemática:

Como aplicar a ferramenta DMAIC para a manutenção preventiva de caminhões basculantes de tração 8x4 em uma empresa de mineração?

1.2 Justificativa

A manutenção desempenha um papel essencial para evitar falhas que comprometam o sistema produtivo, seja por desgaste de peças, falhas no sistema ou superaquecimento. Segundo Seleme (2015), as vantagens da manutenção justificam sua implementação tanto em instalações quanto em equipamentos industriais, podendo oferecer benefícios como a melhoria na confiabilidade, aumento da segurança, elevação da qualidade, redução de custos operacionais, maior vida útil dos ativos e valorização dos equipamentos.

A manutenção preventiva tem se mostrado uma estratégia fundamental para garantir a eficiência operacional e a continuidade das operações em diversos setores industriais (ALMEIDA, 2014). Neste contexto, para Almeida (2014), ao realizar manutenções preventivas de forma adequada, é possível se obter vantagens como a otimização da utilização de recursos humanos, diminuição do tempo de espera por materiais, aumento da confiabilidade de prazos da produção, contribuição para a satisfação do cliente e atuação na gestão ambiental prevenindo vazamentos e excesso de emissões.

Segundo Pande *et al* (2021), a abordagem DMAIC tem sua metodologia focada em dados e melhoria contínua. Dessa forma, a sua aplicação busca um caminho sistemático para entender as falhas que ocorrem após a manutenção preventiva, de modo a propor soluções para os problemas que podem interferir na confiabilidade e no desempenho dos caminhões basculantes de tração 8x4 na mineração.

Na empresa estudada, observou-se uma parada prematura dos caminhões após a realização da manutenção preventiva, o que pode ocasionar em impactos diretos na produtividade e nos custos operacionais. A identificação das causas desse fenômeno e a proposição de soluções eficazes são essenciais para aprimorar os processos de manutenção e garantir que os ativos operacionais operem de maneira mais eficiente. O estudo da aplicação da ferramenta DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) se justifica por sua possibilidade de estruturar a análise e melhoria dos processos de manutenção, focando na identificação das causas raízes dos problemas e na definição de soluções sustentáveis.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Aplicar a ferramenta DMAIC no processo de manutenção preventiva de caminhões de médio porte em uma empresa de mineração.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver estudo teórico sobre: manutenção, métodos de manutenção, metodologia Seis Sigma e DMAIC;
- Elaborar procedimento metodológico para entendimento do problema e aplicação da metodologia Seis Sigma e a ferramenta DMAIC;

- Planejar as fases do procedimento DMAIC para o equipamento estudado;
- Executar as fases do DMAIC para o equipamento estudado.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentados a formulação do problema, a justificativa da pesquisa e os objetivos geral e específicos do estudo.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, que inclui os conceitos fundamentais sobre manutenção, os tipos de manutenção, a metodologia Seis Sigma e a ferramenta DMAIC, fornecendo o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, detalhando os procedimentos e etapas que orientaram a aplicação da ferramenta DMAIC na análise das causas de falhas e na proposição das soluções para aumento da performance dos caminhões.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia DMAIC, com a identificação das causas de falhas, a elaboração das ações de melhoria e o desenvolvimento do plano de sustentabilidade e controle do indicador.

Finalmente, o quinto capítulo traz as conclusões do trabalho, respondendo à problemática inicialmente proposta, bem como recomendações para trabalhos futuros que possibilitem a continuidade e o aprofundamento da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção

Derivada do latim *manus tenere*, que significa "manter o que se tem", a manutenção acompanha a humanidade desde os primórdios da utilização de ferramentas e equipamentos (VIANA, 2002). Com o advento da Revolução Industrial no século XVIII, a manutenção tornou-se ainda mais relevante, evoluindo de práticas artesanais para métodos sistemáticos e tecnológicos (VIANA, 2002).

Segundo Kardec e Nascif (2001), inicialmente, a manutenção era reativa, focada em reparos após falhas, mas, com o tempo, surgiram abordagens mais estratégicas, como a manutenção preventiva e preditiva, visando evitar interrupções não planejadas.

A evolução da manutenção pode ser dividida em gerações, a primeira geração, anterior à Segunda Guerra Mundial, era caracterizada por reparos corretivos não programados (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). A segunda geração, entre 1950 e 1970, introduziu a manutenção preventiva, enquanto a terceira geração, a partir dos anos 1970, trouxe a manutenção preditiva, impulsionada pelo avanço tecnológico (KARDEC e NASCIF, 2001). Ainda segundo Gregório e Silveira (2018), atualmente, a quarta e quinta gerações focam na gestão de ativos, minimizando falhas e maximizando a produtividade.

O objetivo principal da manutenção é garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações, assegurando que cumpram suas funções com segurança, qualidade e custo adequado (XENOS, 1998). Segundo Xavier (1989), a manutenção moderna não se limita a restaurar as condições originais dos equipamentos, mas busca manter sua função operacional, evitando paradas não planejadas e garantindo a continuidade do processo produtivo. Almeida (2014) complementa que a manutenção também atua na fase de concepção de projetos, garantindo que a disposição de peças e acessibilidade dos conjuntos facilitem futuras intervenções.

A importância da manutenção é evidenciada em diversos setores, como na indústria marítima e aeronáutica, onde a confiabilidade e a segurança são críticas (XAVIER, 1989). Para Seleme (2015), em ambientes industriais, a manutenção adequada reduz custos operacionais, aumenta a vida útil dos equipamentos e melhora a qualidade dos produtos. Além disso, a manutenção contribui para a preservação ambiental, evitando vazamentos, emissões e outros impactos negativos (KARDEC e NASCIF, 2001).

Para Seleme (2015), entre os benefícios da manutenção, destaca-se o aumento da confiabilidade, pois equipamentos bem mantidos apresentam menos falhas e interrupções, garantindo maior disponibilidade e produtividade. A melhoria da segurança também é um benefício significativo, já que instalações bem conservadas reduzem riscos de acidentes e falhas catastróficas (SELEME, 2015).

A implementação de programas de manutenção eficazes enfrenta desafios, como custos iniciais elevados e a necessidade de treinamento especializado (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Para superar esses obstáculos, é essencial adotar uma cultura de mudança, onde a melhoria contínua e a inovação sejam priorizadas (KARDEC e NASCIF, 2001). A integração entre os departamentos de manutenção e produção também é crucial, pois permite planejar intervenções que minimizem impactos no processo produtivo (SELEME, 2015). Almeida (2014) reforça que a manutenção deve ser vista como uma atividade estratégica, que contribui para a competitividade e sustentabilidade das organizações.

2.2 Tipos de manutenção

Kardec e Nascif (2001) identificam seis tipos principais de manutenção: corretiva não planejada, corretiva planejada, preventiva, preditiva, detectiva e engenharia da manutenção. De forma semelhante, Viana (2020) destaca a existência de diferentes abordagens e denominações para os métodos de manutenção, mas alega que algumas variações são irrelevantes, para ele, há essencialmente dois tipos principais: a manutenção corretiva e a manutenção preventiva.

Xenos (1998) argumenta que existem diversas formas de categorizar os métodos de manutenção, sua abordagem considera cinco tipos principais: corretiva, preventiva, preditiva, melhoria dos equipamentos e prevenção da manutenção. Já Almeida (2014) propõe uma classificação composta por cinco categorias: corretiva, preventiva, preditiva, manutenção produtiva total e manutenção centrada na confiabilidade.

Para Gregório e Silveira (2018), os modelos mais adequados são a manutenção corretiva, preventiva, preditiva e manutenção detectiva em situações específicas. De maneira similar, Seleme (2015) classifica a manutenção em três tipos essenciais: corretiva, que pode ser planejada ou não planejada, preventiva e preditiva.

Segundo Xenos (1998), a escolha da melhor estratégia deve levar em conta a natureza e a criticidade dos equipamentos, abandonando a discussão sobre qual método seria superior.

Essa visão é reforçada por Viana *apud* Gregório e Silveira (2018) que destaca que a definição da estratégia ideal de manutenção depende de diversos fatores como: recomendações do fabricante, segurança do trabalho e meio ambiente, características do equipamento e fatores econômicos. A tendência global é a adoção de um modelo híbrido, no qual diferentes métodos são combinados para garantir eficiência e viabilidade econômica (XENOS, 1998).

- **Manutenção corretiva**

A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restabelecer o funcionamento do equipamento (XENOS, 1998). Segundo Seleme (2015), a manutenção corretiva, quando bem executada, pode ser uma alternativa viável, especialmente em situações onde a prevenção não é economicamente justificável. Essa abordagem é frequentemente adotada quando o custo de reparo é menor do que o de ações preventivas, mas é preciso considerar os impactos das paradas na produção (XENOS, 1998).

A norma NBR ISO 5462 (1994, p.7) define a manutenção corretiva como a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”.

Gregório e Silveira (2018) destacam que a manutenção corretiva pode ser classificada em dois tipos: a não programada, que ocorre imediatamente após a falha, e a programada, que é planejada para uma data posterior.

A manutenção corretiva não programada, também chamada de emergencial, é caracterizada pela atuação imediata e sem preparação, o que pode resultar em custos elevados devido a paradas inesperadas (KARDEC e NASCIF, 2001). Almeida (2014) reforça que essa prática pode levar a prejuízos como atrasos na produção e riscos de acidentes, já que a equipe de manutenção age sob pressão. Para minimizar esses impactos, é essencial ter peças de reposição, mão de obra qualificada e ferramentas adequadas disponíveis (XENOS, 1998).

Já a manutenção corretiva programada ocorre quando há conhecimento prévio da falha, permitindo que a intervenção seja planejada (VIANA, 2020). Kardec e Nascif (2001) complementam que este tipo de manutenção permite maior organização, com a preparação de recursos humanos e materiais, reduzindo os custos e os tempos de parada. Essa abordagem é viável em situações onde a falha não causa impactos imediatos na produção, como em sistemas com redundâncias (VIANA, 2020). A adoção dessa política pode advir de fatores como a compatibilização com os interesses da produção, a segurança, a disponibilidade de sobressalentes e a existência de recursos humanos qualificados (KARDEC e NASCIF, 2001).

A figura 1 apresenta questões que orientam na aplicação da manutenção corretiva programada.



Figura 1 - Questões que orientam a adoção da manutenção corretiva planejada.
Fonte: Gregório e Silveira (2018)

A Figura 1 apresenta um conjunto de questões que orientam a decisão de adoção da manutenção corretiva planejada, organizadas em quatro eixos principais: (1) o risco da falha, que avalia os impactos potenciais para pessoas, meio ambiente e instalações; (2) a disponibilidade de recursos, questionando se há peças, mão de obra e ferramentas necessárias para realizar o reparo quando necessário; (3) os custos, comparando o custo de reparar após a falha com o custo de parar e reparar antes que a falha ocorra; e (4) o impacto na produção, analisando como a falha pode afetar a operação, considerando possíveis paradas e perdas.

Gregório e Silveira (2018) ressaltam que, independentemente do tipo de corretiva adotado, é fundamental que os profissionais conheçam o conceito utilizado em sua organização, garantindo uma comunicação assertiva entre os envolvidos no processo de manutenção.

Seleme (2015) descreve que o processo de manutenção corretiva envolve cinco etapas principais: identificação da falha, localização da falha, diagnóstico, correção e verificação final. Além disso, Seleme (2015) detalha os principais componentes de tempo da manutenção corretiva, que incluem o tempo efetivo de manutenção, o tempo administrativo e logístico, e os atrasos que subdividem-se em tempo de preparação, localização da falha, obtenção de peças de reposição, correção da falha, ajuste e calibração, e liberação do equipamento. Esses

elementos são fundamentais para entender e otimizar o processo de manutenção corretiva, reduzindo os tempos de parada e os custos associados (SELEME, 2015).

Por fim, mesmo quando a manutenção corretiva é adotada, é fundamental investigar as causas das falhas para evitar sua reincidência (XENOS, 1998). A escolha entre corretiva e preventiva deve sempre considerar o equilíbrio entre custos, segurança e impactos na produção (VIANA, 2020).

- **Manutenção preventiva**

A manutenção preventiva é definida como um conjunto de atividades planejadas e controladas, realizadas em intervalos predeterminados ou conforme critérios específicos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falhas ou a degradação do funcionamento de um equipamento (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Diferente da manutenção corretiva, que age após a ocorrência de uma falha, a preventiva busca antecipar-se aos problemas, evitando paradas inesperadas e garantindo a continuidade da produção (XENOS, 1998).

A norma NBR ISO 5462 (1994, p.7) define a manutenção preventiva como a “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

A manutenção preventiva oferece diversas vantagens, como o aumento da vida útil dos equipamentos e a redução de custos a curto prazo (SELEME, 2015). Segundo Almeida (2014), essa abordagem permite equilibrar a utilização de recursos humanos, eliminando tempos ociosos e garantindo um ritmo de trabalho constante. Além disso, a manutenção preventiva contribui para a confiabilidade dos prazos de produção, evitando atrasos causados por quebras inesperadas (ALMEIDA, 2014).

Xenos (1998) complementa que, embora a manutenção preventiva tenha um custo inicial mais alto, ela reduz a frequência de falhas e aumenta a disponibilidade dos equipamentos, o que pode resultar em uma redução do custo total a longo prazo. A satisfação do cliente também é beneficiada, já que as máquinas mantidas em bom estado garantem a qualidade dos produtos e o respeito aos prazos de entrega (ALMEIDA, 2014).

Apesar dos benefícios, a manutenção preventiva também apresenta desvantagens. Gregório e Silveira (2018) alertam que a substituição de peças antes do fim de sua vida útil pode gerar custos desnecessários. Além disso, defeitos podem ser introduzidos no equipamento devido a falhas humanas ou danos durante partidas e paradas (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018).

Kardec e Nascif (2001) reforçam que, em alguns casos, a manutenção preventiva pode levar à substituição prematura de componentes, especialmente quando as condições operacionais e ambientais não são consideradas adequadamente. A necessidade de paradas programadas também pode ser um inconveniente em plantas onde a produção é contínua (KARDEC e NASCIF, 2001).

A manutenção preventiva pode ser realizada com base em diferentes critérios, como tempo, horas de funcionamento ou produtividade (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Viana (2020) classifica a manutenção preventiva em dois grupos principais: a manutenção sistemática, que segue intervalos predeterminados, e a manutenção sob condição, que é acionada com base no monitoramento do estado do equipamento.

A manutenção sistemática oferece uma série de vantagens, como a redução de falhas e a possibilidade de um planejamento mais eficiente dos recursos (VIANA, 2020). Já a manutenção sob condição, que inclui técnicas como inspeções sensitivas e preditivas, permite intervir apenas quando necessário, maximizando a vida útil dos componentes (VIANA, 2020).

Para a implantação de um sistema de manutenção preventiva eficaz, é essencial contar com informações como o histórico do equipamento e recomendações do fabricante (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Seleme (2015) destaca a importância de elaborar um plano detalhado, que inclua inspeções, lubrificação, calibração e substituição de peças, além de garantir o apoio da gerência e a qualificação da equipe.

Almeida (2014) reforça que a documentação é um elemento chave, com a elaboração de cronogramas, fichas de lubrificação e registros de manutenção, que permitem o controle e a execução das atividades de forma organizada. Xenos (1998) alerta, no entanto, que a falta de padrões e procedimentos claros, assim como a insuficiência de conhecimento técnico, podem comprometer a eficácia da manutenção preventiva.

Por fim, a manutenção preventiva é uma estratégia essencial para garantir a confiabilidade dos equipamentos e a eficiência operacional, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade dos ativos (XENOS, 1998). No entanto, sua implementação requer planejamento, recursos adequados e o comprometimento de todos os envolvidos, desde a equipe de manutenção até a gerência (SELEME, 2015). Quando bem executada, a manutenção preventiva não apenas evita falhas, mas também contribui para a segurança, a qualidade e a sustentabilidade das operações industriais (VIANA, 2020).

- **Manutenção preditiva**

A manutenção preditiva, também conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento, tem como objetivo principal realizar intervenções apenas quando necessário, aproveitando ao máximo a vida útil dos componentes e reduzindo a necessidade de manutenções corretivas ou preventivas (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). De acordo com Kardec e Nascif (2001), essa abordagem permite monitorar parâmetros de condição ou desempenho, predizendo quando uma falha pode ocorrer e intervindo de forma planejada.

A norma NBR ISO 5462 (1994, p.7) define a manutenção preditiva como a “manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

Para Kardec e Nascif (2001) o propósito da manutenção preditiva é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas, permitindo que operem continuamente pelo maior tempo possível. Almeida (2014) complementa que essa modalidade de manutenção se baseia em inspeções periódicas, utilizando instrumentos específicos para monitorar fenômenos como vibração, temperatura e ruídos excessivos, o que possibilita o acompanhamento da evolução de defeitos e o planejamento de intervenções.

A manutenção preditiva pode ser realizada por meio de monitoramento subjetivo, que depende da experiência do operador, ou monitoramento objetivo, que utiliza instrumentos e técnicas específicas para medir parâmetros como vibração, temperatura e contaminação de óleos (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Almeida (2014) ressalta que técnicas como análise de vibração, termografia e ensaios de óleo são amplamente utilizadas para detectar anomalias e prever falhas.

Kardec e Nascif (2001) reforçam que a manutenção preditiva só é viável quando o equipamento ou sistema permite algum tipo de monitoramento e quando as falhas podem ser acompanhadas em sua progressão. Xavier (1989) complementa que, durante a operação, o equipamento emite informações codificadas que refletem o estado real de seus componentes e que com a coleta e análise desses dados é possível determinar o momento adequado para a intervenção, evitando panes inesperadas.

A manutenção preditiva oferece diversas vantagens, como a redução do número de falhas, o aumento da vida útil dos equipamentos e a diminuição do tempo de parada (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Para Almeida (2014), essa abordagem permite o planejamento de intervenções, evitando emergências e transtornos causados por paradas imprevistas.

De acordo com Kardec e Nascif (2001), a manutenção preditiva também contribui para a segurança pessoal e operacional, reduzindo acidentes causados por falhas catastróficas. Xavier (1989) ressalta que, ao prever falhas e intervir no momento adequado, a manutenção preditiva garante resultados economicamente vantajosos, equilibrando custos e benefícios.

Apesar dos benefícios, a manutenção preditiva apresenta alguns desafios. Gregório e Silveira (2018) alertam que os custos iniciais podem ser elevados, especialmente com a aquisição de equipamentos sofisticados e a necessidade de treinamento especializado para a equipe. Além disso, a incapacidade dos gestores em implementar mudanças culturais necessárias pode comprometer o sucesso do programa (SELEME, 2015).

Segundo Xavier (1989), a manutenção preditiva exige um estudo cuidadoso das condições operacionais e ambientais, bem como do processo de envelhecimento dos componentes. Para a implantação eficaz da manutenção preditiva, é necessário contar com o apoio da gerência superior, funcionários dedicados e procedimentos de coleta e análise de dados bem definidos (SELEME, 2015). Almeida (2014) reforça a importância de um banco de dados viável, que permita o registro e a análise das informações coletadas durante as inspeções.

Xavier (1989) sugere que o programa de manutenção preditiva deve ser estabelecido com base em parâmetros específicos, como vibração, temperatura e desgaste, que variam conforme o equipamento e as condições de operação. Para Kardec e Nascif (2001), a manutenção preditiva deve ser integrada ao planejamento da manutenção preventiva, pois ambas se complementam.

- **Manutenção detectiva**

A Manutenção Detectiva, mencionada na literatura a partir da década de 90, tem como objetivo principal detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção, atuando especificamente em sistemas de proteção (KARDEC e NASCIF, 2001).

A detecção de falhas ocultas é realizada por profissionais especializados, que verificam o funcionamento de sistemas sem interromper a operação, como no caso de testes em lâmpadas de sinalização e alarmes em painéis (KARDEC e NASCIF, 2001).

De acordo com Kardec e Nascif (2001), a Manutenção Detectiva é crucial para evitar dois problemas principais em sistemas de proteção: a não-atuação e a atuação indevida. A não-atuação pode resultar em falhas graves, como o aumento rápido da temperatura de mancais em máquinas rotativas, enquanto a atuação indevida causa paradas não programadas, afetando a produção (KARDEC e NASCIF, 2001).

- **Prevenção da manutenção**

A Prevenção da Manutenção consiste em atividades realizadas com o fabricante desde a fase de projeto, visando reduzir o volume de serviços de manutenção durante a operação (XENOS, 1998). Esse método busca prevenir falhas e aumentar a manutenibilidade dos equipamentos, já que 95% dos serviços de manutenção são definidos na fase de projeto, segundo Blanchard (XENOS, 1998).

Um exemplo é o caso de um gerador de energia mal especificado, onde apenas a manutenção não resolve o problema, sendo necessária a instalação de um equipamento com maior capacidade (XENOS, 1998). Segundo Xenos (1998), a prevenção da manutenção evita que a produção se adapte às limitações do equipamento, garantindo que os sistemas atendam às expectativas operacionais. Além disso, problemas entre as equipes de manutenção e produção podem surgir quando os equipamentos não atendem às demandas, causando falhas frequentes (XENOS, 1998).

- **Melhoria de equipamentos**

A melhoria de equipamentos, ou "*kaizen*", é um método essencial na manutenção, com foco em aprimoramentos contínuos e graduais (XENOS, 1998). Ainda segundo Xenos (1998), o *kaizen* vai além de restaurar equipamentos às suas condições originais, buscando melhorar projetos, padrões de operação e manutenção. Isso exige uma investigação profunda das causas das falhas, algo ainda pouco praticado no Brasil, onde muitas empresas se limitam a corrigir sintomas sem eliminar as causas raízes (XENOS, 1998).

Além de evitar falhas recorrentes, o *kaizen* estabelece metas como redução de custos, estoques e tempos de manutenção (XENOS, 1998). Para Xenos (1998), essa abordagem depende de métodos gerenciais eficazes, conhecimento técnico e habilidades específicas, visando otimizar continuamente o desempenho dos equipamentos.

2.3 Metodologia Seis Sigma

Segundo Carvalho e Paladini *et al* (2012), o Seis Sigma tem como característica fundamental a aplicação estruturada do pensamento estatístico, utilizando intensivamente ferramentas de análise para controlar a variabilidade dos processos, e tem seu nome derivado do conceito de seis desvios padrão, que representa um nível de desempenho no qual ocorrem apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades, garantindo alta precisão operacional.

Para Werkema (2024), o Seis Sigma surgiu na Motorola em 1987 com o objetivo de aumentar a competitividade da empresa diante de concorrentes estrangeiros, seu sucesso é comprovado quando a empresa recebeu o Prêmio Nacional de Qualidade Malcolm Baldrige em 1988 e obteve ganhos de 2,2 bilhões de dólares com a metodologia. Harry e Schroeder *apud* Werkema (2024) destacam que, diferentemente de programas anteriores, o Seis Sigma permitiu que a empresa focasse simultaneamente na lucratividade, por meio da redução de custos, e na melhoria dos produtos, otimizando estoques e diminuindo tempos de ciclo.

Pande *et al* (2001) destaca que o sucesso da Motorola impulsionou a adoção do Seis Sigma por outras empresas, como a *General Electric* que obteve retornos financeiros expressivos, ganhos de bilhões de dólares e novos recordes das margens operacionais, que estavam estagnadas. Eckes (2001) ressalta sua importância na melhoria de processos e na otimização dos recursos, o que permitiu avanços como a redução do tempo de exames médicos e a ampliação da produção de materiais plásticos, fazendo com que, Jack Welch, então presidente da GE, atribuísse o sucesso da empresa ao Seis Sigma.

Além dos ganhos financeiros, Carvalho e Paladini *et al* (2012) ressaltam que o diferencial do Seis Sigma está na sua integração com a gestão por processos e diretrizes voltadas à satisfação do cliente e à obtenção de resultados expressivos. Pande *et al* (2001) reforçam essa visão ao destacar que a metodologia proporciona diversos benefícios comprovados, como redução de custos e defeitos, aumento da produtividade, retenção de clientes e melhoria do tempo de ciclo, além de impulsionar mudanças culturais e o desenvolvimento de novos produtos e serviços.

2.3.1 Ferramentas do Seis Sigma

- **Carta de controle**

As cartas de controle são ferramentas essenciais para monitorar a estabilidade de processos e identificar variações ao longo do tempo (MONTGOMERY, 2016). Eckes

(2001) complementa que, no método Seis Sigma, as cartas de controle são especialmente úteis nas fases de Medição e Controle do DMAIC, pois ajudam a validar se as melhorias implementadas estão gerando resultados consistentes. Ademais, essas ferramentas são fundamentais para garantir que os processos operem dentro de limites aceitáveis de variação (ECKES, 2001).

Werkema (2012) destaca que as cartas de controle são uma das ferramentas básicas da qualidade, amplamente utilizadas em processos industriais. Sua simplicidade e eficácia as tornam ideais para monitorar a estabilidade de processos e identificar oportunidades de melhoria contínua (WERKEMA, 2012). Por fim, Montgomery (2012) reforça que, além de manter processos sob controle, as cartas de controle fornecem insights valiosos sobre tendências e padrões, permitindo que as equipes tomem decisões mais informadas.

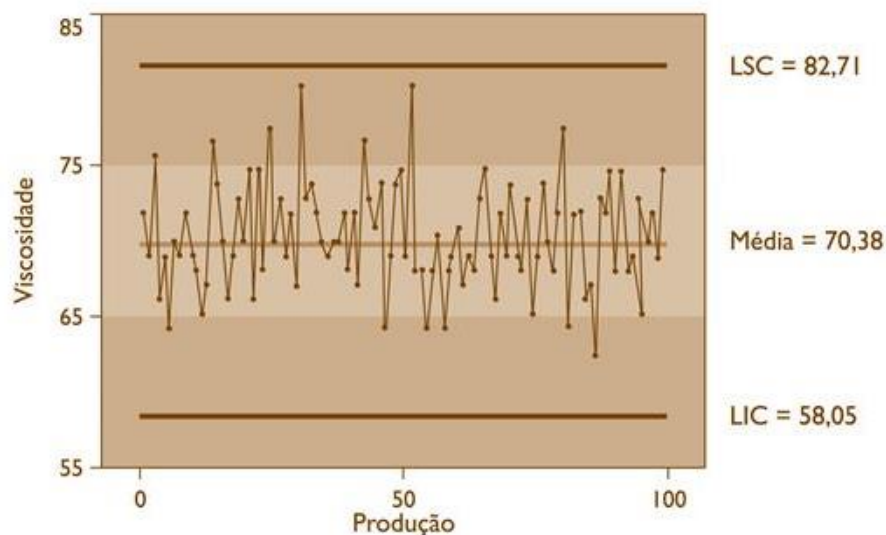


Figura 2 - Carta de Controle para os valores da viscosidade das produções do último trimestre de 2011.

Fonte: Werkema (2021).

A Figura 2 apresenta um gráfico de controle no qual todos os pontos estão dentro dos limites estabelecidos, sem a presença de padrões não aleatórios. Com base nessa análise, conclui-se que as produções com viscosidade igual ou superior a 75 e menor que 82,71 centipoises são decorrentes da variação natural do processo produtivo.

- **Project charter**

Para Werkema (2024), o contrato de projeto define o escopo, os objetivos e os recursos necessários para o projeto, servindo como um contrato entre a equipe e as partes interessadas. Ele também estabelece os critérios de sucesso e os principais indicadores de desempenho, garantindo que todos estejam alinhados desde o início (WERKEMA,

2024). Pande *et al* (2001) complementam essa visão, destacando que o *Project Charter* é crucial na fase de definição do método DMAIC, pois ajuda a identificar o problema central, as metas a serem alcançadas e os benefícios esperados para a organização.

Além disso, Eckes (2001) ressalta que o *Project Charter* é uma ferramenta estratégica para engajar as partes interessadas e assegurar o comprometimento com o projeto. Ele enfatiza que um contrato bem elaborado evita mal-entendidos e garante que o projeto tenha direção clara e foco nos resultados desejados (ECKES, 2001).

A Figura 3 apresenta um exemplo de *Project Charter*.

Redução das perdas de produção por parada de linha na Fábrica I.	
Descrição do problema	Na Fábrica I, as paradas de linha são apontadas pela área de manufatura como um dos maiores problemas na rotina de trabalho, invalidando o planejamento para as operações diárias. No ano 2011, o valor médio mensal das perdas de produção decorrentes das paradas de linha foi muito alto e, além disso, o problema vem apresentando uma tendência crescente. As principais perdas econômicas resultantes do problema em 2011 foram as perdas de faturamento por produtos não entregues aos clientes no prazo previsto (R\$ 1.100.000,00) e os gastos com horas extras, transporte e alimentação dos funcionários para recuperação da produção (R\$ 335.000,00).
Definição da meta	Reduzir em 50% as perdas de produção por parada de linha na Fábrica I, até 30/12/2012.
Avaliação do histórico do problema	Anexo I
Restrições e suposições	Os membros da equipe de trabalho deverão dedicar 50% de seu tempo ao desenvolvimento do projeto. Será necessário o suporte de um especialista do departamento de manutenção. Os gastos do projeto deverão ser debitados do centro de custo 01/PCP20, após autorização do "Champion" (de acordo com o procedimento WIZ).
Equipe de trabalho	Membros da equipe: Axel Mahayana (Black Belt – líder da equipe), Denise Sampaio (montagem), Marlon Oliveira (engenharia industrial), Sandra Barbosa (PCP) e Arthur Santos (manutenção). "Champion": Otávio Cerqueira (gerente da Fábrica I) Especialistas para suporte técnico: Marcos Siqueira (manutenção) e Victoria Ryan (controladoria).
Responsabilidades dos membros e logística da equipe	Anexo II
Cronograma preliminar	Define: 28/02/2012, Measure: 15/04/2012, Analyze: 30/06/2012, Improve: 30/08/2012 e Control: 30/12/2012.

Figura 3 - Exemplo de Project Charter.
Fonte: Werkema (2024).

A Figura 3 apresenta um *Project Charter* voltado para a redução das perdas de produção causadas por paradas de linha na Fábrica I. O documento descreve o problema, que envolve paradas frequentes na linha de produção, impactando o planejamento operacional e gerando perdas financeiras significativas. A meta estabelecida é reduzir em 50% essas perdas até 30/12/2012.

O contrato de projeto também detalha as restrições e suposições do projeto, como a necessidade de dedicação de 50% do tempo dos membros da equipe e o suporte de um especialista em manutenção. O cronograma preliminar segue as etapas do método DMAIC, com prazos definidos para cada fase, desde a definição do problema até a implementação das melhorias e controle dos resultados. Esse documento serve como um guia para alinhar expectativas, recursos e responsabilidades, garantindo o foco no objetivo principal de redução das perdas.

- **Gráfico de pareto**

Pande *et al* (2001) destacam que o gráfico de pareto é útil para categorizar dados como tipos de defeitos, reclamações de clientes ou períodos de ocorrência de problemas, ajudando a visualizar e priorizar as áreas críticas de um processo. Eckes (2001) corrobora, destacando que esse conceito foi introduzido na área da qualidade por Joseph Juran, que o utilizou para separar os "poucos vitais" dos "muitos triviais", sendo amplamente adotado em sessões de brainstorming e análises colaborativas.

Wekerma (2021) descreve o Gráfico de Pareto como informações em barras verticais ordenadas de forma decrescente, o que facilita a visualização das categorias mais relevantes e o estabelecimento de metas viáveis. Essa estrutura visual é complementada, conforme Brenig-Jones e Jo Dowdall (2023), pela linha de porcentagem cumulativa, que ajuda a identificar a contribuição de cada categoria em relação ao total analisado.

Eckes (2001) também aponta que o princípio de Pareto, originalmente formulado pelo economista Vilfredo Pareto no século XIX, demonstrava que 80% da riqueza estava concentrada em 20% da população. Nesse sentido, Pande *et al* (2001), destaca que o gráfico de pareto é uma ferramenta utilizada para organizar dados categóricos em ordem decrescente, permitindo identificar as causas mais frequentes de problemas e, assim, priorizar ações corretivas, fundamentado na "Regra 80/20", que sugere que 80% dos problemas resultam de apenas 20% das causas.

Brenig-Jones e Jo Dowdall (2023) ressaltam que o Gráfico de Pareto pode ser ajustado conforme o critério de análise, como frequência ou custo, oferecendo diferentes perspectivas que apoiam a tomada de decisão. Por fim, Wekerma (2021) reforça que sua simplicidade visual e capacidade de sintetizar informações complexas fazem dele uma ferramenta indispensável na análise e melhoria de processos.

A Figura 4 apresenta um exemplo de gráfico de pareto.



Figura 4 - Gráfico de pareto para tipos de acidentes de trabalho.
Fonte: Wekerma (2021).

A Figura 4 é uma representação do Gráfico de Pareto, utilizado para identificar e priorizar os tipos de acidentes de trabalho com base em sua frequência de ocorrência. A disposição das barras segue uma ordem decrescente, permitindo que os problemas mais críticos sejam visualizados com maior facilidade. O eixo vertical à esquerda exibe a frequência das ocorrências, enquanto o eixo vertical à direita indica a porcentagem acumulada, fornecendo uma visão clara da contribuição de cada categoria ao total de acidentes registrados.

De acordo com os dados apresentados, os acidentes envolvendo as mãos são os mais frequentes, destacando-se como a maior parcela do total de 80 ocorrências registradas. Em seguida, estão os acidentes que envolvem as pernas, seguidos pelos que afetam os olhos e, por fim, aqueles classificados como outros. A linha que atravessa o gráfico representa a porcentagem acumulada, que atinge 100% ao final, após a soma de todas as categorias.

- **Diagrama de causa e efeito**

O diagrama de causa e efeito, também chamado de espinha de peixe, é amplamente utilizado para identificar as possíveis causas de um problema ou resultado desejado, sendo considerado uma ferramenta eficaz para organizar as ideias levantadas em sessões de brainstorming (ECKES, 2001). Sua principal função é estruturar as causas em categorias específicas, possibilitando uma visão mais ampla e detalhada do problema (PANDE *et al*, 2001).

A estrutura do diagrama parte de uma pergunta central, que descreve o efeito ou resultado analisado, como por exemplo: “Por que existem atrasos nas entregas?” ou “Quais fatores causam os erros nas faturas?” (BRENING-JONES E DOWDALL, 2023). Além disso,

o modelo geralmente utiliza categorias como Pessoas, Método, Material, Meio Ambiente, Máquina e Medição, conhecidas como os "5M e 1P" (PANDE *et al*, 2001).

Segundo Eckes (2001) e Wekerma (2021), essa ferramenta permite que as equipes explorem múltiplas perspectivas de forma organizada, tendo como principal objetivo gerar o máximo de hipóteses possíveis sobre as causas de um problema, promovendo uma análise sistemática. A técnica dos "5 porquês" é frequentemente utilizada para aprofundar cada causa listada no diagrama de causa e efeito, buscando identificar as razões principais que impactam o processo (BRENIG-JONES e DOWDALL, 2023).

O diagrama também auxilia na identificação de variações no processo, conectando fatores de entrada ao resultado final (PANDE *et al*, 2001). Ele facilita a priorização das causas mais relevantes e permite validar hipóteses com dados, garantindo que a análise seja eficaz e bem fundamentada (WEKERMA, 2021).

A Figura 5 apresenta um exemplo de diagrama de causa efeito.

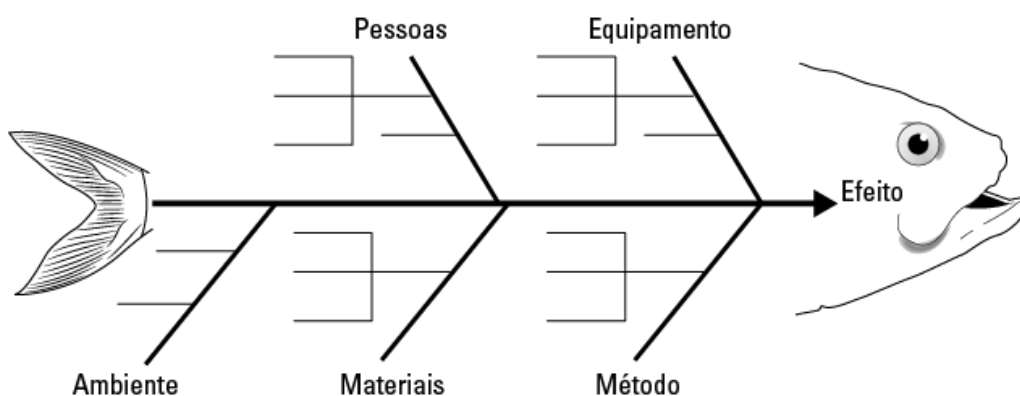


Figura 5 - Diagrama de causa e efeito ou espinha de peixe.
Fonte: Brenig-Jones e Jo Dowdall (2023)

Na Figura 5 o efeito está localizado na "cabeça" do peixe, enquanto as causas potenciais são organizadas ao longo das "espinhas" principais. As categorias principais de causas são:

- Pessoas: envolvem os operadores, sua capacitação, habilidades e desempenho;
- Equipamento: refere-se a máquinas, ferramentas ou tecnologias utilizadas no processo;
- Método: contempla os processos, instruções e normas aplicadas;
- Materiais: inclui a matéria-prima e insumos utilizados;
- Ambiente: engloba fatores ambientais e condições de trabalho.

Cada uma destas categorias deverá ser preenchida com possíveis causas para o problema (efeito).

- **Estratificação**

A estratificação é uma técnica essencial para a análise de dados em projetos de melhoria contínua, permitindo a divisão de informações em subgrupos homogêneos para identificar padrões e causas raízes de problemas (PANDE *et al*, 2001). Segundo Werkema (2022), essa abordagem é uma das Sete Ferramentas da Qualidade e deve ser aplicada com base em fatores como insumos, métodos, pessoas e condições ambientais.

A estratificação é especialmente útil nas etapas de análise do PDCA, permitindo identificar variações no desempenho de processos ao longo do tempo, entre diferentes locais ou em função de variáveis como fornecedores ou operadores (WERKEMA, 2022). Pande (2001) destaca que a estratificação ajuda a "fatiar e picar" os dados, respondendo a perguntas como: "De onde vêm as devoluções?" ou "Quais sistemas apresentam mais falhas?". No entanto, para que a técnica seja eficaz, é crucial planejar a coleta de dados com antecedência, definindo os fatores de estratificação mais relevantes, como equipamentos, operadores ou turnos de trabalho (PANDE *et al*, 2001).

Complementando essa visão, Montgomery (2016) enfatiza que a estratificação é fundamental para evitar conclusões equivocadas em análises estatísticas, já que dados agregados podem mascarar variações críticas entre subgrupos. Por fim, Werkema (2022) reforça que a estratificação não apenas facilita a identificação de causas raízes, mas também apoia a priorização de ações corretivas e a padronização de processos. Essa técnica, quando bem aplicada, permite que as equipes foquem nos fatores mais impactantes, promovendo melhorias contínuas e sustentáveis (WERKEMA, 2022).

A Figura 6 apresenta um exemplo de estratificação.

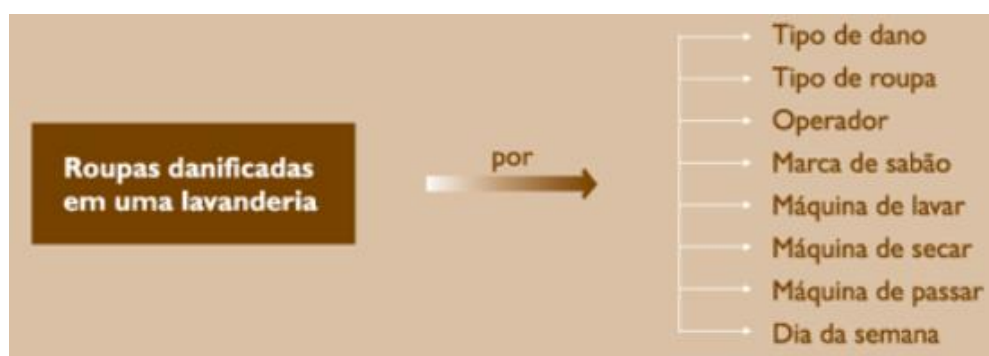


Figura 6 - Estratificação de roupas danificadas em uma lavanderia.
Fonte: Werkema (2021)

A Figura 6 apresenta uma estratificação para analisar o problema de roupas danificadas em uma lavanderia com vários fatores que podem ser utilizados para investigar as causas do problema. Esses fatores incluem: tipo de dano, tipo de roupa, operador, marca de sabão, máquina de lavar, máquina de secar, máquina de passar e dia da semana. Ao analisar os dados estratificados, é possível descobrir, por exemplo, se os danos estão relacionados a um operador específico, uma máquina defeituosa ou um produto de limpeza inadequado.

• Matriz de priorização

A matriz de priorização é uma ferramenta essencial para organizar e classificar problemas ou ações com base em critérios como impacto, custo e complexidade (WERKEMA, 2024). Segundo Werkema (2024), ela ajuda a direcionar esforços para os problemas que oferecem maior retorno, garantindo que os recursos sejam alocados de forma eficiente.

Para Pande *et al* (2001), no contexto do método Seis Sigma, a matriz de priorização é fundamental para identificar e focar nas causas raízes que geram maior impacto nos processos. Eckes (2001) ressalta que a matriz de priorização é uma ferramenta estratégica para a tomada de decisões em projetos de melhoria. Por fim, Werkema (2024) destaca que a matriz de priorização é especialmente útil em ambientes industriais, onde a quantidade de problemas pode ser grande e os recursos limitados.

A Figura 7 apresenta um exemplo de matriz de priorização.

		Problema prioritário			Total
		Atraso no tempo entre a chegada do material ao porto e o desembarço, decorrente da variação natural do processo de importação de polímeros por transporte marítimo.	Atraso no tempo entre a emissão do pedido e o embarque, decorrente da variação natural do processo de importação de polímeros por transporte marítimo.	Falta de ordem de fabricação de reagentes.	
Peso (5 a 10)		9	8	10	
Causa potencial	Tempo elevado de preparação da carga pelos fornecedores.	0	5	0	40
	Mudanças frequentes no roteiro de viagem feitas pelos fornecedores, sem comunicar à empresa.	5	5	0	85
	Deficiências do software utilizado na programação da produção.	1	0	5	59
	Falta de treinamento das pessoas que trabalham em áreas administrativas da empresa.	3	0	3	57
	Falhas nos registros de controle de estoques de matérias-primas usadas na fabricação de reagentes.	0	0	5	50
Legenda: 5 - Correlação forte 3 - Correlação moderada 1 - Correlação fraca 0 - Correlação ausente					

Figura 7 - Exemplo de matriz de priorização.
Fonte: Werkema (2024).

A Figura 7 apresenta uma matriz de priorização utilizada para identificar e classificar causas com base em sua relevância, para posteriormente investigar as causas de maior impacto. A matriz lista cinco causas principais, como: tempo elevado de preparação da carga pelos fornecedores, mudanças frequentes no roteiro de viagem, deficiência do software, falta de treinamento e falhas nos registros e os relaciona a três problemas prioritários, como atrasos no desembarço de materiais e falta de ordem de fabricação de reagentes. Cada causa potencial é avaliada com base em sua correlação com os problemas prioritários, utilizando pesos de 0 (ausência de correlação) a 5 (correlação forte).

- **Método dos porquês**

Segundo Brenig-Jones e Dowdall (2023), fazer a pergunta "Por quê?" repetidamente ajuda a ir além da superfície do problema, explorando suas camadas mais profundas. Embora cinco perguntas sejam geralmente suficientes, o número pode variar dependendo da complexidade do problema (BRENIG-JONES e DOWDALL, 2023).

Eckes (2001) ressalta que o método dos porquês é eficaz porque força as equipes a questionar suposições e explorar múltiplas perspectivas sobre um problema. Essa técnica é especialmente útil para garantir que as ações corretivas sejam direcionadas às causas reais, e não apenas aos sintomas (ECKES, 2001). Por fim, Xenos (1998) alerta que, sem o uso do método dos porquês, a busca pela causa de uma falha tende a ser superficial, e as causas fundamentais podem não ser identificadas. A Figura 8 apresenta um exemplo de uso do método dos porquês apresentado por Xenos.

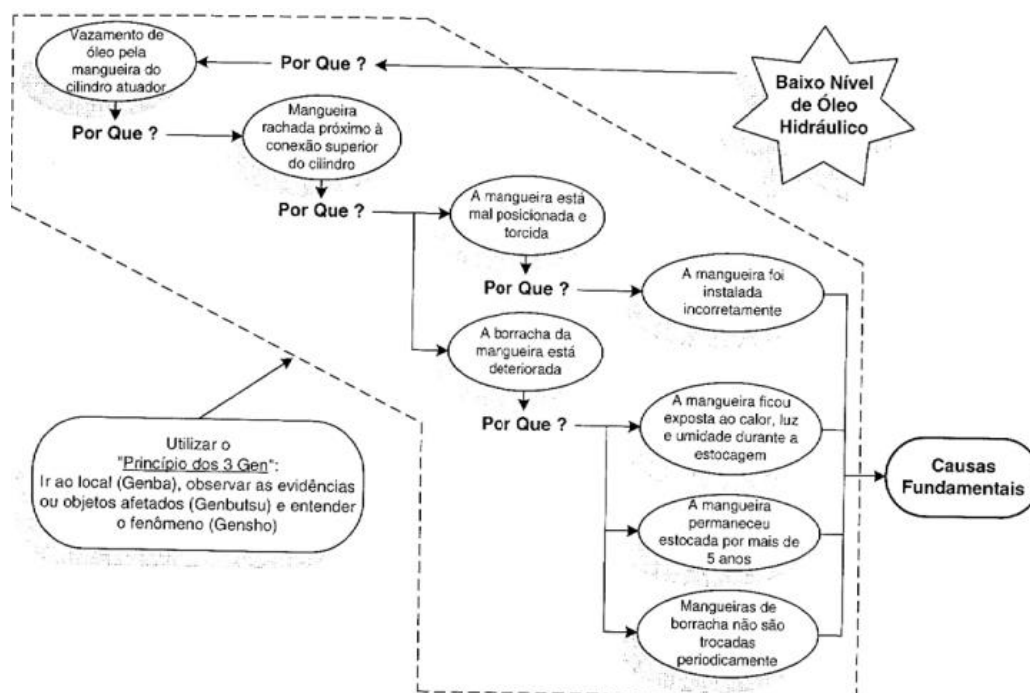


Figura 8 - Exemplo de uso do método dos porquês.

Fonte: Xenos (1998)

A Figura 8 apresenta a aplicação do Método dos Porquês, uma técnica utilizada para identificar as causas raízes de um problema. O exemplo dado é o vazamento de óleo pela mangueira do cilindro atuador. Através de uma série de perguntas "Por quê?", são identificadas as causas subsequentes: a mangueira está rachada próximo à conexão superior do cilindro porque está mal posicionada e torcida, o que ocorreu devido à deterioração da braçadeira da mangueira.

A análise continua, revelando que a mangueira foi instalada incorretamente, ficou exposta ao calor, luz e umidade durante a estocagem, e permaneceu estocada por mais de cinco anos. Além disso, é destacado que mangueiras de borracha não são trocadas periodicamente. O método sugere a utilização do "Princípio dos 3 Gen": ir ao local (*Genba*), observar as evidências ou objetos afetados (*Genbutsu*) e entender o fenômeno (*Gensho*). Essa abordagem sistemática permite identificar as causas fundamentais do problema, facilitando a implementação de soluções efetivas.

- **Plano de ação 5W2H**

A ferramenta 5W2H tem como finalidade definir, de forma clara e elaborada, os elementos essenciais de uma estratégia de ação (WERKEMA, 2024). Segundo Werkema (2024), ela responde a sete perguntas fundamentais: o que será feito (*What*), quando será feito

(*When*), quem fará (*Who*), onde será feito (*Where*), por que será feito (*Why*), como será feito (*How*) e quanto custará (*How much*).

Chiavenato *apud* Moura (2023) ressalta que os planos possuem um objetivo comum, que é organizar, prever e coordenar uma série de eventos de maneira lógica, com o intuito de alcançar os resultados desejados quando implementados com sucesso.

A Figura 9 apresenta um exemplo de plano de ação 5W2H.

O quê?	Quando?	Onde?	Por quê?	Quem?	Como?	Quanto Custará?
Providência a ser tomada	Data/ Período	Lugar	Motivo pelo qual será feito	Executor/ Encarregado	Estágios/Etapas	Valores
Diminuir o uso de copos descartáveis na empresa	A partir de 01/12/2023	Star Ltda.	Adoção de métodos sustentáveis	Setor de Suprimentos	Disponibilização de garrafas/ copos personalizados pela empresa	Valor a calcular

Figura 9 - Exemplo de plano de ação 5W2H.
Fonte: Melônio (2023).

A Figura 9 apresenta um plano de ação utilizando a metodologia 5W2H, que é uma ferramenta de gestão para planejamento e execução de projetos. O plano tem como objetivo diminuir o uso de copos descartáveis na empresa StarLtda, a partir de 1º de dezembro de 2023. A iniciativa visa adotar métodos sustentáveis, sendo executada pelo Setor de Suprimentos. A estratégia inclui a disponibilização de garrafas e copos personalizados pela empresa, com o custo ainda a ser calculado. Esse plano detalha o que será feito, quando, onde, por que, quem será responsável e como será implementado, além de considerar o custo envolvido. Essa abordagem sistemática ajuda a garantir que todas as etapas do projeto sejam claramente definidas e monitoradas.

- **Capacidade sigma**

De acordo com Carvalho e Paladini *et al* (2012), a capacidade Seis Sigma é um indicador que mede a variação do processo em relação aos limites de especificação, permitindo identificar oportunidades de melhoria e reduzir falhas. Nesse sentido, Brenig-Jones e Dowdall (2023) destacam que o cálculo do nível Sigma incentiva a consideração das necessidades dos clientes, garantindo que os processos atendam aos requisitos de desempenho esperados.

Segundo Wekerma (2024), a Escala Sigma converte a quantidade de defeitos por milhão em um valor padronizado, facilitando a análise da qualidade. Brenig-Jones e Dowdall (2023) corroboram ao afirmarem que o nível Sigma possibilita a comparação objetiva entre diferentes processos, uma vez que estabelece uma métrica padronizada de qualidade, evitando distorções causadas pelo uso de indicadores distintos, tornando mais eficiente a priorização de melhorias.

Carvalho e Paladini *et al* (2012) afirmam que quanto maior o nível Sigma, menor a probabilidade de ocorrência de defeitos, o que reduz custos de não conformidade e aumenta a confiabilidade dos produtos e serviços. Wekerma (2024) enfatiza que um alto nível Sigma está diretamente relacionado à excelência operacional, pois indica um processo mais previsível e com menor incidência de falhas.

A aplicação do Seis Sigma não apenas melhora a eficiência operacional, mas também garante que os processos atendam aos critérios críticos de qualidade (CARVALHO e PALADINI *et al*, 2012). Brenig-Jones e Dowdall (2023) acrescentam que os níveis Sigma são expressos em defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), o que evidencia a necessidade de um desempenho elevado.

A Figura 10 apresenta a tabela de conversão de DPMO para nível sigma.

Rendimento a longo prazo (%)	Defeitos por milhão de oportunidades	Sigma
99,99966	3,4	6
99,99995	5	5,9
99,9992	8	5,8
99,999	10	5,7
99,998	20	5,6
99,997	30	5,5
99,996	40	5,4
99,993	70	5,3
99,99	100	5,2
99,985	150	5,1
99,977	230	5,0
99,967	330	4,9
99,952	480	4,8
99,932	680	4,7
99,904	960	4,6
99,865	1.350	4,5
99,814	1.860	4,4
99,745	2.550	4,3
99,654	3.460	4,2
99,534	4.660	4,1
99,379	6.210	4,0
69,20	308.000	2,0
65,60	344.000	1,9

Figura 10 - Tabela parcial de conversão de DPMO para nível sigma.
Fonte: Eckes (2001).

A Figura 10 apresenta uma tabela de conversão que relaciona três métricas importantes: rendimento a longo prazo, defeitos por milhão de oportunidades (DPMO) e nível Sigma. O rendimento a longo prazo indica a porcentagem de produtos ou serviços sem defeitos ao longo do tempo. Por exemplo, um rendimento de 99,99966% significa que apenas

0,00034% dos produtos têm defeitos. O DPMO quantifica o número de defeitos por milhão de oportunidades, como 3,4 DPMO, que significa 3,4 defeitos a cada milhão de oportunidades. O nível Sigma mede a eficiência do processo, com níveis mais altos indicando menos defeitos.

A Figura 10 mostra que, à medida que o nível Sigma aumenta, o rendimento melhora e o DPMO diminui. Por exemplo, um nível Sigma 6 corresponde a 99,99966% de rendimento e 3,4 DPMO, indicando um processo altamente eficiente. Já um nível Sigma 4 tem 99,379% de rendimento e 6.210 DPMO, mostrando um processo menos eficiente. Essa figura é útil para empresas que desejam melhorar a qualidade de seus processos, permitindo que identifiquem o nível Sigma atual e estabeleçam metas para alcançar padrões mais altos de qualidade.

- **SIPOC**

Na etapa Define do ciclo DMAIC, o uso do diagrama SIPOC desempenha um papel essencial para a definição do principal processo envolvido no projeto, além de facilitar a visualização clara do escopo do trabalho (WEKERMA, 2024). O SIPOC é composto por cinco elementos principais: fornecedores (*Suppliers*), insumos (*Inputs*), processo (*Process*), produtos (*Outputs*) e consumidores (*Customers*), permitindo uma compreensão geral das interações que ocorrem dentro do fluxo de trabalho (PANDE *et al*, 2001).

De acordo com Wekerma (2024), o SIPOC promove a padronização da forma como o escopo do projeto é visualizado por todos os envolvidos, como a equipe, os *Champions* e os gestores, alinhando as expectativas e garantindo que o foco esteja no processo central. Pande *et al* (2001) complementam ao afirmar que o SIPOC fornece uma visão ampla e integrada dos processos, permitindo mapear de maneira clara os responsáveis por cada etapa do sistema.

Por outro lado, Wekerma (2024) reforça que o SIPOC não deve incluir detalhes específicos do processo, já que estes não são úteis para a definição inicial, indicando que esse nível de detalhamento deve ser abordado posteriormente com o uso de outras ferramentas. Essa abordagem, conforme apontado por Pande *et al* (2001), é fundamental para garantir que o SIPOC sirva como uma ferramenta de alto nível, promovendo alinhamento e clareza no início de projetos de melhoria contínua. A Figura 11 é um exemplo de um Diagrama SIPOC.

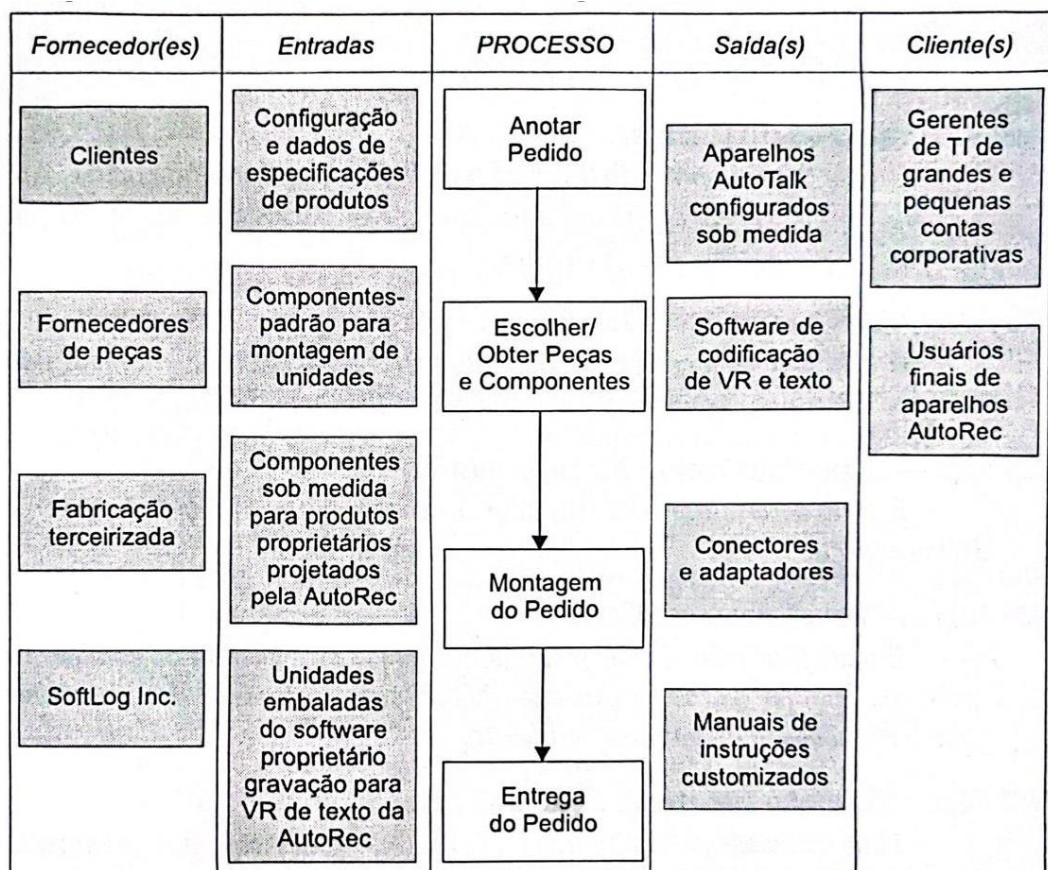


Figura 11 – Diagrama SIPOC da Encomenda à Entrega da AutoRec.
 Fonte: Pande *et al* (2001).

O diagrama SIPOC apresentado na Figura 11, descreve o fluxo do processo "Encomenda à Entrega" da AutoRec, fornecendo uma visão abrangente dos elementos principais envolvidos na cadeia de valor. Este modelo destaca cinco componentes fundamentais: Fornecedores, Entradas, Processo, Saídas e Clientes.

Em fornecedores foram listados os principais responsáveis pelo fornecimento de recursos para cada etapa do processo, incluindo clientes, fornecedores de peças, fabricantes terceirizados e parceiros logísticos, como a SoftLog Inc.

As entradas compreendem todos os recursos e informações necessários para iniciar e conduzir o processo, como configurações de produtos, componentes padrão, peças sob medida e unidades embaladas para *software* proprietário.

O processo representa o conjunto de atividades que transformam as entradas em saídas com valor agregado. Neste caso, o processo é dividido em etapas sequenciais: anotação do pedido, seleção e obtenção de peças e componentes, montagem do pedido e entrega.

As saídas incluem os produtos finais gerados pelo processo, como aparelhos configurados sob medida, *software* de codificação, conectores, adaptadores e manuais de instruções personalizados.

Por fim, os clientes descrevem os destinatários finais das saídas do processo, incluindo gerentes de TI de grandes empresas e pequenos negócios, além dos usuários finais de aparelhos AutoRec.

- **Boxplot**

O diagrama de caixa – *boxplot* é uma ferramenta gráfica que resume a distribuição de dados por meio de quartis, destacando a mediana e a variabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Segundo Montgomery e Runger (2009), o terceiro quartil (Q3) representa o valor abaixo do qual estão 75% dos dados ordenados, marcando o limite superior da caixa no gráfico.

Ferreira *et al* (2021) complementa que o *boxplot* utiliza cinco medidas-resumo: valor mínimo, primeiro quartil (Q1), mediana, terceiro quartil (Q3) e valor máximo, sendo o intervalo interquartil (Q3 - Q1) essencial para identificar valores atípicos. O *boxplot* é uma ferramenta eficaz para visualizar a simetria dos dados e detectar *outliers* de forma imediata (MONTGOMERY; RUNGER, 2009; FERREIRA *et al*, 2021). Na Figura 12 é possível observar os componentes de um *boxplot*.

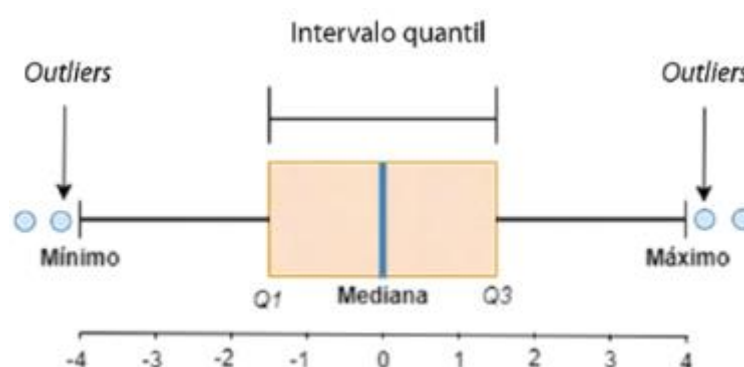


Figura 12 - Componentes de um *boxplot*.
Fonte: Ferreira *et al* (2021).

Na Figura 12 são evidenciados os componentes de um *boxplot*, que representa graficamente a distribuição de dados através de quartis e valores extremos. No centro, uma caixa ilustra o intervalo interquartil (IQR), delimitado pelo primeiro quartil (Q1) à esquerda e pelo terceiro quartil (Q3) à direita, com a mediana indicada por uma linha interna. Linhas estendidas (*whiskers*) conectam a caixa aos valores mínimo e máximo dentro do limite de

$1,5 \times \text{IQR}$, enquanto pontos isolados marcam os *outliers* - observações que ultrapassam esse intervalo. A escala numérica abaixo varia de -4 a 4, permitindo visualizar a simetria ou assimetria dos dados.

2.4 DMAIC

Segundo Pande *et al* (2001), a estratégia Seis Sigma utiliza um ciclo estruturado de cinco fases conhecido como DMAIC — Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, derivada do ciclo PDCA. Essa metodologia pode ser aplicada tanto para melhorias em processos existentes quanto para o desenvolvimento de novos projetos, possibilitando a identificação de falhas e a implementação de soluções baseadas em dados, garantindo maior eficiência e controle dos resultados (PANDE *et al* 2001).

Carvalho e Paladini *et al* (2012) reforçam que o DMAIC é um método que emprega diversas ferramentas estatísticas para alcançar os objetivos estratégicos da organização, além de ressaltar que a seleção adequada dos processos a serem aprimorados e o treinamento das equipes são fatores essenciais para o sucesso da metodologia. Werkema (2024) complementa ao destacar que o uso sistemático dessas ferramentas integradas ao DMAIC permite uma abordagem estruturada e baseada em dados, otimizando os processos e assegurando a melhoria contínua da qualidade.

- **Definir**

Para Pande *et al* (2001), essa etapa consiste em identificar problemas específicos ou amplos, definir requisitos, estabelecer metas e esclarecer o escopo e as exigências do cliente. Carvalho e Paladini *et al* (2012) complementam que, nessa fase, é fundamental traduzir a voz do cliente em características críticas para a qualidade, permitindo que a equipe identifique os processos problemáticos e seus impactos, como custos elevados, baixa qualidade e reclamações.

Werkema (2024) destaca que essa etapa deve responder algumas questões fundamentais, que garantem que o projeto tenha um direcionamento preciso, aumentando as chances de sucesso:

- Qual é o problema a ser abordado?
- Qual a meta a ser atingida?
- Quem são os clientes afetados?

- Qual processo está relacionado ao problema?
- Qual o impacto econômico do projeto?

A Figura 13 apresenta as principais atividades executadas nessa etapa, bem como as ferramentas utilizadas para a realização destas:



Figura 13 - Atividades e ferramentas da etapa “Definir”.
Fonte: Werkema (2024)

A Figura 13 descreve o fluxo que deve ser seguido na etapa de definição do DMAIC. O primeiro passo é a criação do mapa de raciocínio que deverá ser atualizado ao longo do projeto com todas as informações importantes, em seguida deve-se descrever o problema e definir a meta, utilizando o *Project Charter* para documentar as informações essenciais. Em seguida, analisa-se o histórico do problema, considerando impactos econômicos, clientes e estratégias da empresa.

Para isso, são utilizadas ferramentas como Métricas do Seis Sigma (capacidade sigma), Gráfico Sequencial, Carta de Controle e Análise de Séries Temporais. Além disso, a Análise Econômica, com suporte da área financeira, permite mensurar o impacto monetário. Após essa análise, verifica-se se o projeto é prioritário e se terá apoio da liderança; caso contrário, um novo projeto deve ser selecionado. Se aprovado, define-se a equipe, suas funções e o cronograma inicial, novamente registrando tudo no *Project Charter*.

Outro passo essencial é identificar as necessidades dos principais clientes envolvidos no processo, utilizando a Voz do Cliente para coletar expectativas e garantir o alinhamento com o mercado. Por fim, define-se o processo principal do projeto, aplicando SIPOC ou Mapeamento do Fluxo de Valor para estruturar o fluxo.

- **Medir**

Carvalho e Paladini *et al* (2012) ressaltam que a fase de medir tem como propósito quantificar o desempenho do processo, validar o problema identificado anteriormente com base em dados concretos e realizar o mapeamento do processo, para isso, a equipe coleta dados representativos por meio de um sistema de medição confiável, possibilitando a avaliação dos índices de capacidade do processo no curto e longo prazo.

Além disso, Pande *et al* (2001) apontam que essa etapa inclui a redefinição do problema, caso necessário, além da medição do desempenho do processo em relação às exigências estabelecidas. Eckes (2001) enfatiza a importância de traduzir essas métricas para o conceito sigma, permitindo uma análise mais precisa da eficiência e eficácia do processo. Werkema (2024) complementa essa abordagem destacando que, nesta etapa, é essencial responder às seguintes questões:

- Que resultados devem ser medidos para a obtenção de dados úteis à focalização do problema?
- Quais são os focos prioritários do problema?

A Figura 14 demonstra as principais atividades e ferramentas utilizadas na realização desta etapa.

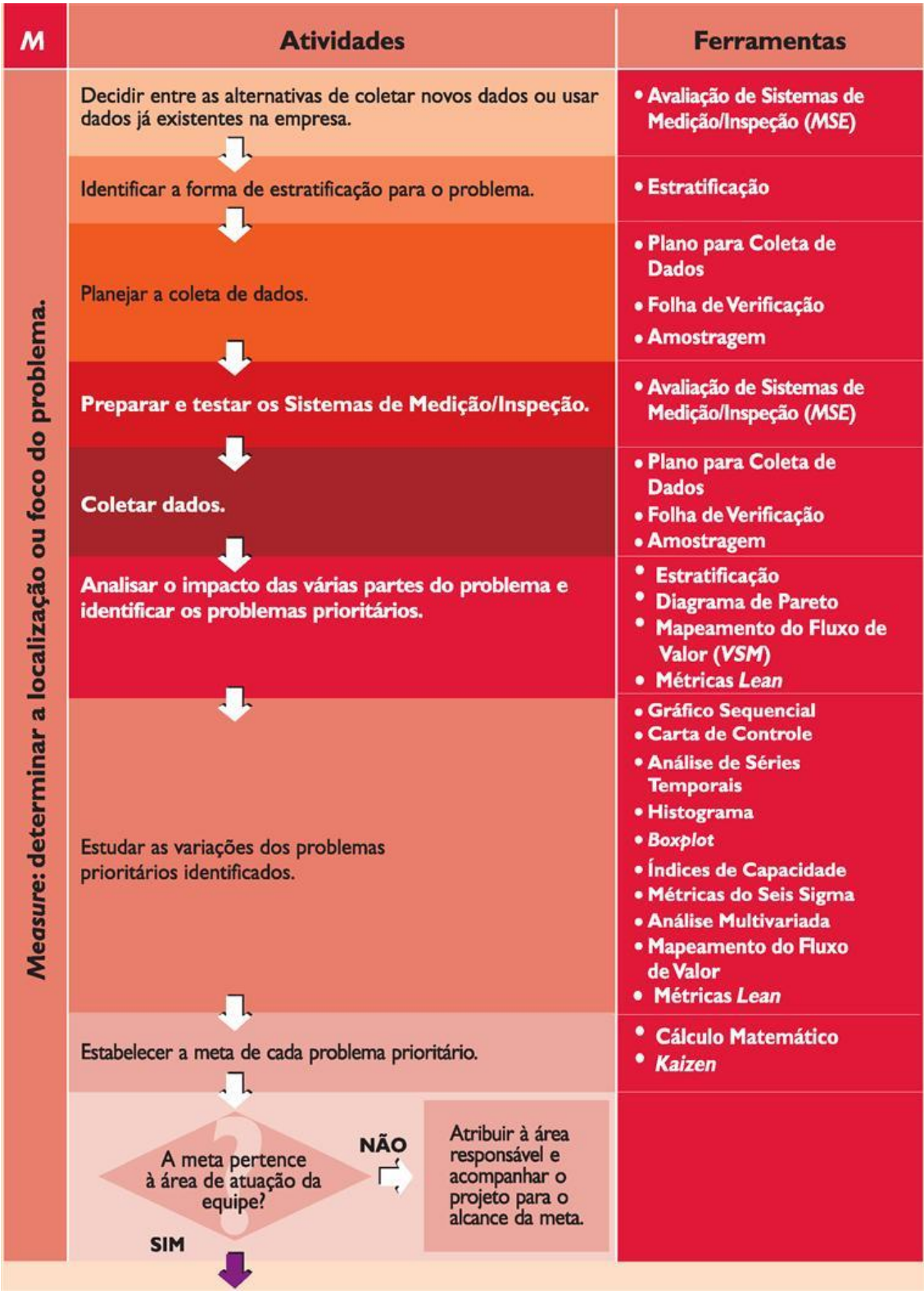


Figura 14 - Atividades e ferramentas da etapa "Medir".
Fonte: Werkema (2024)

A Figura 14 descreve o fluxo que deve ser seguido na etapa de medição do DMAIC. O processo começa decidindo se serão utilizados dados existentes ou se será necessária uma nova coleta, utilizando a Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção. Em seguida, define-se a forma de estratificação do problema e se planeja a coleta, aplicando ferramentas como Plano para Coleta de Dados, Folha de Verificação e Amostragem. Antes da coleta efetiva, é essencial testar os sistemas de medição para garantir a precisão das informações. Com os dados coletados, realiza-se uma análise para identificar as áreas mais críticas do problema, utilizando Estratificação, Diagrama de Pareto, Mapeamento do Fluxo de Valor e Métricas do Seis Sigma.

Após essa análise, estudam-se as variações dos problemas prioritários por meio de ferramentas estatísticas como Gráfico Sequencial, Carta de Controle, Análise de Séries Temporais, Histogramas, *Boxplot* e Índices de Capacidade. Com isso, estabelece-se a meta de melhoria para cada problema identificado, utilizando cálculos matemáticos e a metodologia Kaizen. Caso a meta esteja dentro da área de atuação da equipe, o trabalho segue; caso contrário, a responsabilidade é atribuída à área competente.

- **Analisar**

Eckes (2001) aponta que nesta fase o foco está na identificação das causas fundamentais do problema, possibilitando a compreensão dos fatores que impactam negativamente o processo e permitindo à equipe determinar as razões que necessitam de melhoria, enquanto Pande *et al* (2001) enfatizam a importância do desenvolvimento e validação de hipóteses, identificação das causas raízes e redefinição das exigências do processo.

Carvalho e Paladini *et al* (2012) ressaltam que essa etapa se diferencia pelo uso intensivo de ferramentas estatísticas, além das tradicionais ferramentas da qualidade, permitindo a identificação tanto das causas óbvias quanto das não óbvias, para isso, softwares estatísticos são amplamente utilizados, pois facilitam a análise de dados, o desenho de gráficos e a identificação das variações do processo. Werkema (2024) complementa essa abordagem ao destacar que essa fase responde à pergunta essencial que permite que as ações corretivas sejam direcionadas de maneira eficaz: Por que o problema prioritário existe?

A Figura 15 indica as principais atividades e ferramentas utilizadas na realização desta etapa.

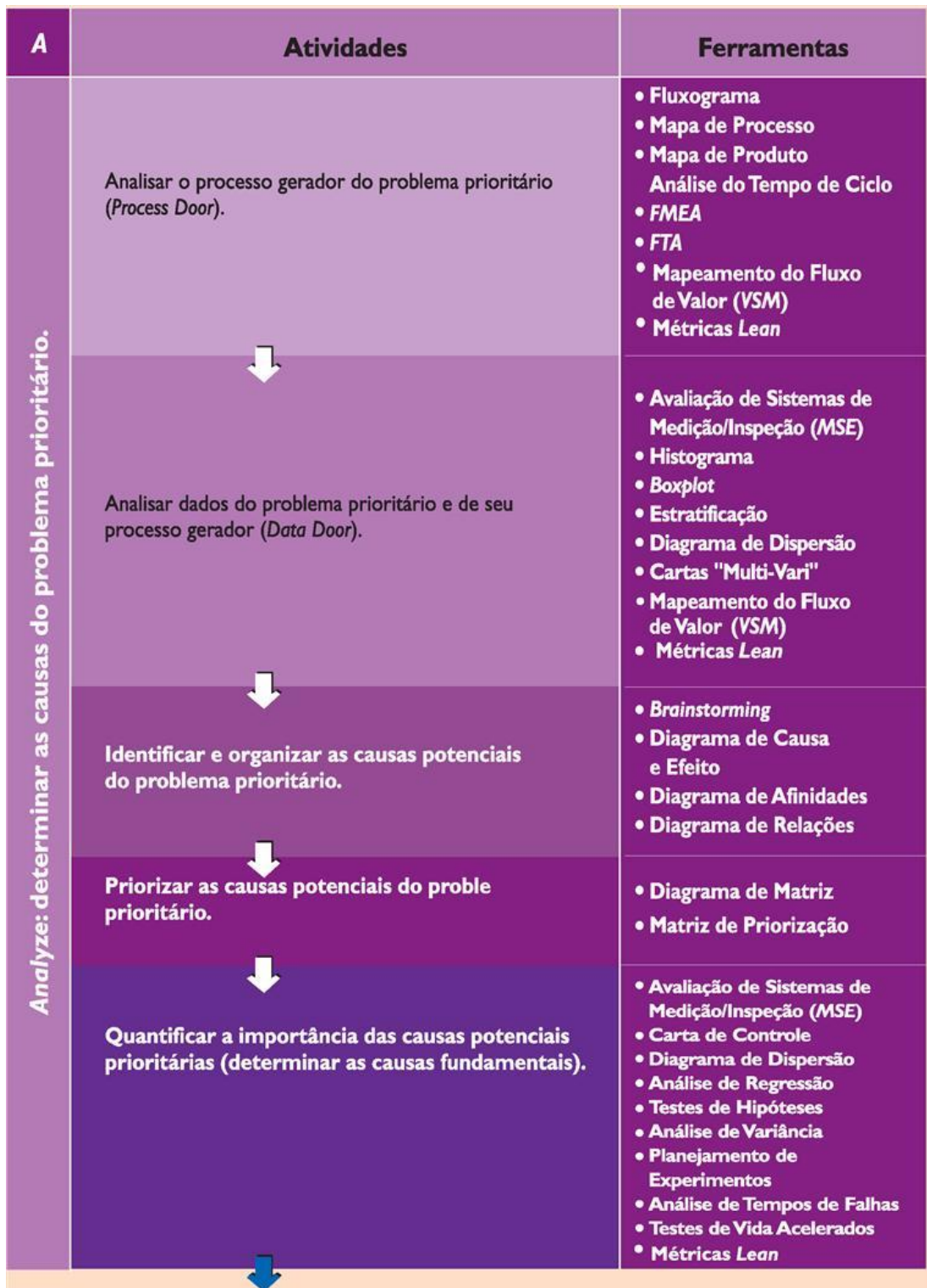


Figura 15 - Atividades e ferramentas da etapa "Analisar".
Fonte: Werkema (2024)

A Figura 15 descreve o fluxo que deve ser seguido na etapa de análise do DMAIC. O processo inicia-se com a análise do processo gerador do problema, utilizando ferramentas como Fluxograma, Mapa de Processo, Análise do Tempo de Ciclo, FMEA, FTA, Mapeamento do Fluxo de Valor e Métricas *Lean*. Em seguida, são analisados os dados do

problema e de seu processo gerador, utilizando Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção, Histogramas, *Boxplot*, Estratificação e Diagramas de Dispersão.

Após essa análise inicial, identificam-se e organizam-se as possíveis causas do problema por meio de *Brainstorming*, Diagramas de Causa e Efeito, Diagramas de Afinidades e Diagramas de Relações. Com as causas levantadas, a priorização é realizada utilizando Diagramas de Matriz e Matriz de Priorização. Por fim, quantifica-se a importância das causas prioritárias para determinar as causas fundamentais, aplicando Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção, Carta de Controle, Diagramas de Dispersão, Análise de Regressão, Testes de Hipóteses, Análise de Variância, Planejamento de Experimentos e Testes de Vida Acelerados.

- **Melhorar**

Segundo Eckes (2001), nesta fase a equipe busca eliminar as causas fundamentais identificadas, com a geração, seleção e aplicação das melhorias propostas. Pande *et al* (2001) reforçam que esse processo inclui o desenvolvimento de ideias para eliminar as causas raízes, a realização de testes para validar as soluções, a padronização das melhorias e a medição dos resultados obtidos.

Werkema (2024) destaca a importância de um *brainstorming* estruturado para levantar ideias de solução e avaliar quais sugestões podem ser implementadas com maior eficiência e menor custo, além de definir formas de testar as soluções escolhidas. Carvalho *et al* (2012) complementam que essa fase é essencial para a materialização das melhorias, envolvendo a equipe operacional na implementação das mudanças e garantindo que os ajustes realizados impactem positivamente as características críticas para a qualidade e os resultados financeiros e de desempenho do processo.

A Figura 16 indica as principais atividades e ferramentas utilizadas na realização desta etapa.

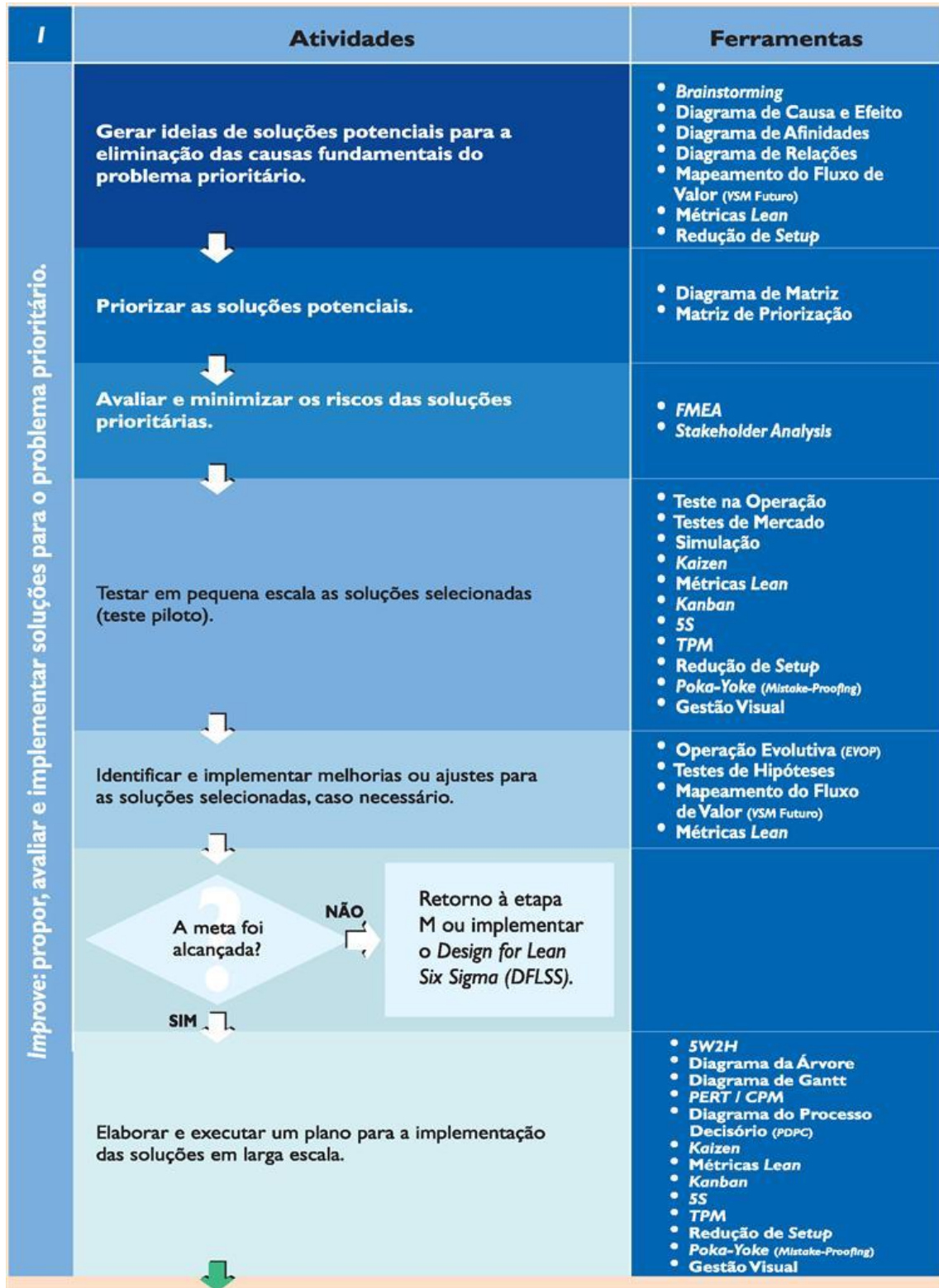


Figura 16 - Atividades e ferramentas da etapa "Melhorar".
Fonte: Werkema (2022)

A Figura 16 descreve o fluxo que deve ser seguido na etapa de melhoria do DMAIC. Inicialmente, geram-se ideias para eliminar as causas fundamentais por meio de ferramentas como *Brainstorming*, Diagramas de Causa e Efeito, de Afinidades e de Relações,

Mapeamento do Fluxo de Valor e Métricas *Lean*. Em seguida, as soluções potenciais são priorizadas com Diagramas de Matriz e Matriz de Priorização. Após essa seleção, avaliam-se os riscos das soluções por meio do FMEA e *Stakeholder Analysis*, garantindo que possíveis impactos negativos sejam mitigados antes da implementação.

A próxima fase envolve a realização de testes pilotos em pequena escala, aplicando Testes na Operação, Testes de Mercado, Simulações e metodologias como *Kaizen*, *Kanban*, 5S e manutenção produtiva total. Se necessário, ajustes são feitos utilizando Operação Evolutiva (EVOP), Testes de Hipóteses e Mapeamento do Fluxo de Valor. Caso a meta não seja alcançada, retorna-se à etapa de medição ou implementa-se o *Design for Lean Six Sigma*. Se os resultados forem satisfatórios, executa-se um plano para a implementação em larga escala, empregando ferramentas como 5W2H, Diagrama de Gantt e PDCA, consolidando as melhorias de forma estruturada e sustentável.

- **Controlar**

Segundo Eckes (2001), a fase final tem como principal objetivo garantir a sustentação das melhorias implementadas, evitando que os processos retornem aos níveis anteriores de desempenho, sendo esta a mais importante. Werkema (2024) destaca que a primeira etapa dessa fase consiste na avaliação do alcance da meta em larga escala com a comparação dos resultados obtidos antes e depois da implementação das soluções, utilizando dados concretos para verificar se o sucesso foi de fato alcançado.

Carvalho *et al* (2012) reforça essa necessidade ao apontar que qualquer sistema tende à desordem caso não seja devidamente controlado, mostrando a importância da definição de como será feito o monitoramento contínuo do processo.

É possível observar na Figura 17 as principais atividades e ferramentas utilizadas na realização desta etapa.

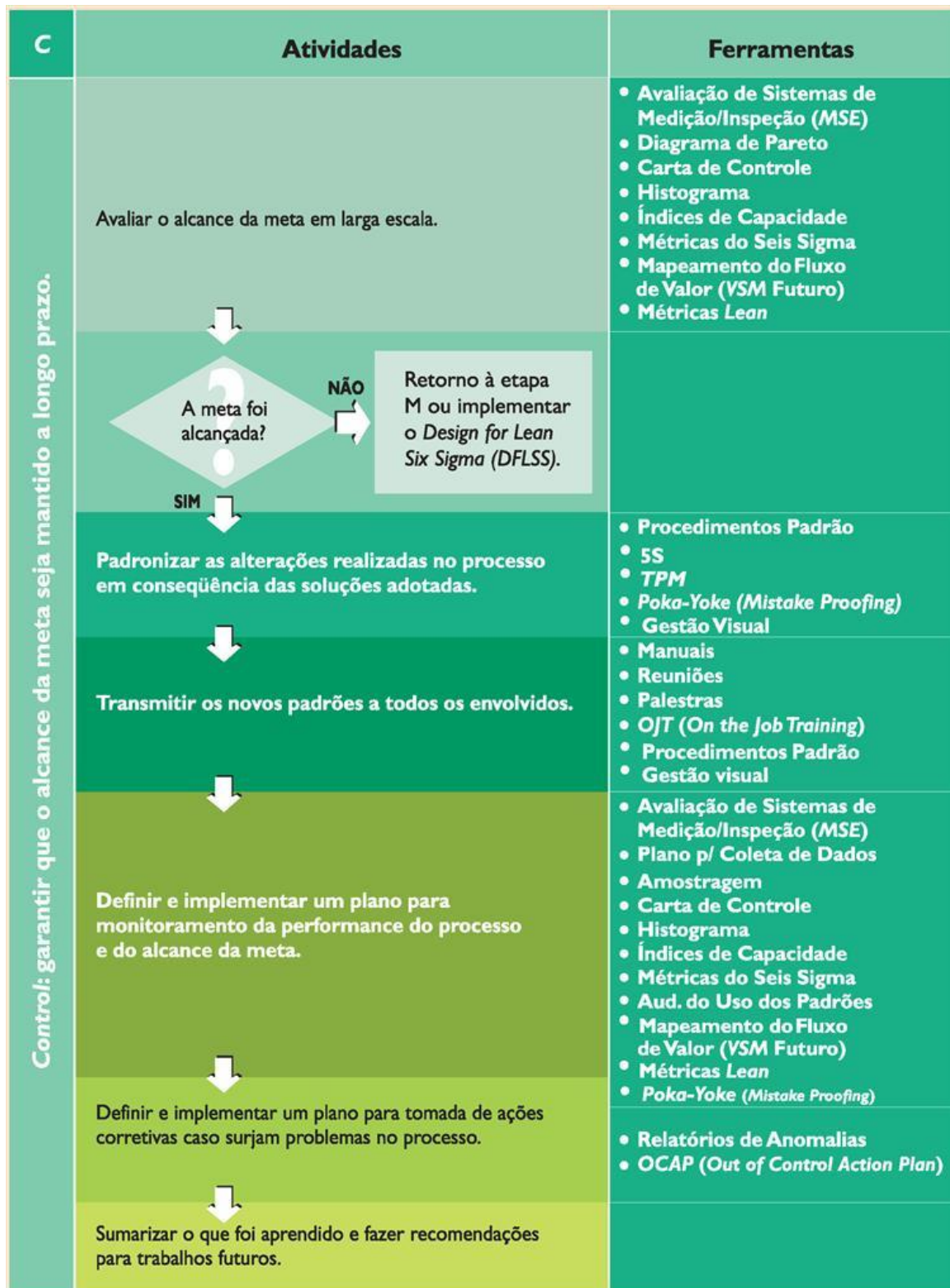


Figura 17 - Atividades e ferramentas da etapa "Controlar".
Fonte: Werkema (2024).

A Figura 17 descreve o fluxo que deve ser seguido na etapa de controle do DMAIC. Inicialmente, avalia-se o alcance da meta em larga escala utilizando ferramentas como Avaliação de Sistemas de Medição/Inspeção, Diagrama de Pareto, Carta de Controle,

Histograma, Índices de Capacidade, Métricas do Seis Sigma e Mapeamento do Fluxo de Valor.

Caso a meta não seja alcançada, retorna-se à etapa de medição ou implementa-se o *Design for Lean Six Sigma*. Se os resultados forem positivos, as alterações realizadas no processo são padronizadas por meio de Procedimentos Padrão, 5S, *Poka-Yoke* e Gestão Visual, garantindo que as mudanças sejam incorporadas à rotina operacional.

Em seguida, os novos padrões são disseminados entre os envolvidos por meio de manuais, reuniões e palestras, reforçando a adoção das práticas estabelecidas. Além disso, um plano de monitoramento contínuo é implementado utilizando ferramentas como Amostragem, Auditoria do Uso dos Padrões, Coleta de Dados, Testes de Hipóteses e Mapeamento do Fluxo de Valor.

Para lidar com possíveis desvios ou falhas, são definidos mecanismos de correção como Relatórios de Anomalias, permitindo ações rápidas para manter a estabilidade do processo. Por fim, realiza-se um sumário das lições aprendidas e recomendações para melhorias futuras, garantindo que o conhecimento adquirido seja aplicado em projetos subsequentes.

A revisão bibliográfica abordou os conceitos de manutenção, seus principais tipos, metodologia Seis Sigma e ferramenta DMAIC. Esse referencial teórico oferece a base necessária para a condução do estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de pesquisa

As pesquisas podem ser classificadas quanto aos seus objetivos em exploratórias, descritivas e explicativas. Segundo Gil (2024), as pesquisas exploratórias têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, com o objetivo de formular problemas mais precisos ou hipóteses a serem testadas em estudos posteriores. Elas são especialmente úteis quando o tema é pouco explorado, permitindo uma visão geral e aproximativa do problema (GIL, 2024).

No presente trabalho, a pesquisa é classificada como exploratória, pois busca investigar as causas das falhas após manutenção preventiva em caminhões de médio porte na mineração, um problema ainda pouco explorado na literatura.

Quanto à abordagem, as pesquisas podem ser quantitativas, qualitativas ou mistas. Conforme Lakatos e Marconi (2022), a pesquisa quantitativa utiliza dados numéricos e estatísticos para quantificar informações e analisar fenômenos de forma objetiva. Já a pesquisa qualitativa, segundo Gil (2017), busca interpretar fenômenos em seu ambiente natural, compreendendo significados e contextos por meio de descrições verbais.

Além disso, Lozada e Nunes (2018) destacam que as pesquisas mistas combinam elementos qualitativos e quantitativos, permitindo uma análise mais ampla e robusta dos fenômenos estudados.

No presente trabalho, a abordagem é mista, ou seja, combina elementos qualitativos e quantitativos. A abordagem qualitativa é utilizada para interpretar os dados coletados sobre as falhas, buscando compreender as causas e os contextos operacionais. Já a abordagem quantitativa é aplicada para analisar métricas de desempenho.

Os procedimentos técnicos mais comuns em pesquisas científicas incluem a pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, estudo de caso, pesquisa-ação e pesquisa participante. Conforme Gil (2017), a pesquisa bibliográfica é elaborada com base em material já publicado, como livros e artigos científicos, sendo fundamental para fornecer a base teórica do trabalho.

A pesquisa documental, segundo Fonseca (2002), utiliza fontes diversificadas, como relatórios e documentos internos, para análise de problemas específicos. Já a pesquisa

experimental, de acordo com Gil (2017), envolve a manipulação de variáveis para identificar relações de causa e efeito, sendo amplamente utilizada nas ciências naturais.

O estudo de caso, conforme Fonseca (2002), é uma modalidade de pesquisa que permite o estudo de uma instituição e visa entender seu “como” e os seus “porquês” acerca de um problema. A pesquisa-ação, segundo Gil (2017), é uma metodologia que combina pesquisa e ação prática, visando a resolução de problemas coletivos. Por fim, a pesquisa participante, de acordo com Fonseca (2002), envolve a participação ativa da comunidade estudada no processo de investigação.

No presente trabalho, os procedimentos técnicos utilizados são bibliográficos, documentais e estudo de caso. A pesquisa bibliográfica foi essencial para embasar teoricamente os conceitos de manutenção e seus tipos, Metodologia Seis Sigma e a ferramenta DMAIC. A pesquisa documental foi realizada por meio da análise de documentos da empresa, como relatórios e planos de manutenção e planilhas de controle de falhas. Por fim, o estudo de caso foi aplicado para investigar as falhas no processo de manutenção preventiva em caminhões de médio porte em uma empresa do setor de mineração.

3.2 Materiais e Métodos

A metodologia adotada neste estudo está descrita na Figura 18.

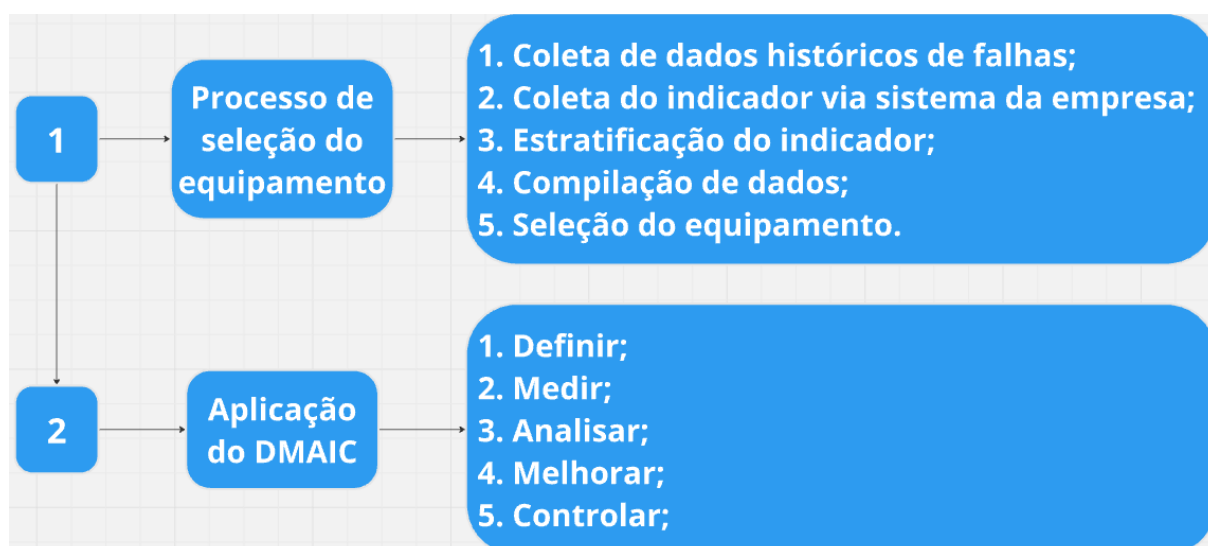


Figura 18 - Metodologia proposta em um fluxograma.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Para a realização do trabalho, foi seguido o procedimento ilustrado na Figura 18, o qual está dividido em duas etapas principais: o diagnóstico de falhas e a aplicação da metodologia DMAIC.

Na primeira etapa, denominada diagnóstico de falhas, são realizados levantamentos e análises preliminares com o intuito de identificar o equipamento mais crítico a ser estudado. Inicialmente, são coletados dados históricos de falhas dos caminhões de médio porte da empresa, com ênfase nas falhas que ocorrem na primeira semana após a realização da manutenção preventiva. Essas informações são obtidas diretamente do sistema corporativo de gestão da manutenção, que registra de forma cronológica tanto as intervenções preventivas quanto as corretivas. A partir desses dados, é calculado um indicador que mensura o tempo de operação entre a manutenção preventiva e a primeira intervenção corretiva subsequente. Esse indicador é, então, estratificado por fabricante e modelo dos caminhões, possibilitando uma análise comparativa entre as diferentes frotas. Na sequência, os dados estratificados são organizados e compilados em gráficos, o que facilita a visualização do desempenho de cada grupo de veículos. Com base nessa análise, é selecionado o equipamento ou a frota com o pior desempenho para ser o foco do estudo.

A segunda etapa do procedimento consiste na aplicação da metodologia DMAIC, estrutura fundamental do Seis Sigma, que organiza o processo de melhoria contínua em cinco fases: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar.

Na fase definir, é realizado o mapeamento do processo por meio da ferramenta SIPOC, que permite identificar os fornecedores, entradas, processos, saídas e clientes envolvidos no fluxo analisado. Também são definidos o escopo e as restrições do estudo, estabelecendo os limites da atuação e as variáveis críticas. A meta do projeto é definida com base no método estatístico do terceiro quartil que será obtido em um *boxplot*, e o alinhamento geral do projeto é formalizado por meio da elaboração do *Project Charter*, que documenta os objetivos, cronograma, responsáveis e impacto esperado.

Na fase medir, busca-se quantificar o desempenho atual do processo. Para isso, são estratificados os dados históricos de falhas utilizando gráficos de Pareto, de forma a evidenciar os modos de falha mais recorrentes e componentes ou sistemas mais afetados. Em seguida, é calculado o nível sigma do processo, indicador que permite avaliar a capacidade da manutenção preventiva em evitar falhas no curto prazo, em relação à meta estabelecida.

A fase analisar concentra-se na identificação das causas fundamentais dos problemas observados. Inicialmente, são levantadas possíveis causas utilizando o diagrama de causa e efeito (espinha de peixe). Essas causas são então priorizadas por meio de uma matriz de priorização, que leva em conta critérios como frequência, impacto e facilidade de intervenção. As causas mais relevantes são investigadas com maior profundidade utilizando o método dos Porquês, visando chegar às raízes dos problemas.

Na fase melhorar, são propostas soluções específicas para eliminar ou mitigar as causas raízes identificadas. As ideias de solução são levantadas em conjunto com a equipe de manutenção e posteriormente é elaborado um plano de ação estruturado.

Por fim, na fase controlar, é proposto um plano de sustentabilidade, que define os pontos de monitoramento contínuo do processo e os responsáveis pelo acompanhamento. Também é proposto um método de controle do indicador.

3.3 Variáveis e indicadores

Marconi e Lakatos (2022), definem variável como uma propriedade ou fator discernível em um objeto de estudo, passível de mensuração e que pode assumir diferentes valores.

Gil (2024) define um indicador como um elemento observável que permite definir e mensurar empiricamente um conceito.

A Tabela 1 apresenta as variáveis e indicadores para o trabalho proposto.

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Frota	- Especificação; - Quantidade de equipamentos; - Plano de manutenção; - Monitoramento;
Falhas	- Modos de falha; - Componentes; - Quantidades; - Tempo de operação até a falha.
DMAIC	- Fase 1: Definir; - Fase 2: Medir; - Fase 3: Analisar; - Fase 4: Melhorar; - Fase 5: Controlar;

Fonte: Pesquisa direta (2025).

3.4 Instrumento de coleta

A coleta dos dados utilizados neste trabalho foi realizada manualmente utilizando os sistemas da empresa, foram coletadas as informações relacionadas às manutenções preventivas dos equipamentos e as intervenções corretivas posteriores e após isso coletado o tempo de operação entre a manutenção preventiva e a primeira intervenção corretiva via sistema de horímetro da empresa.

3.5 Tabulação dos dados

Após procedimento realizado no item 3.4 os dados foram colocados manualmente em formato de planilhas no *software Microsoft Excel* e posteriormente foram exportados para o

Minitab para a realização de cartas de controle para facilitar a visualização dos dados. Além disso, foi utilizado o *software Microsoft Word* para registrar observações.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados os tipos de pesquisa, materiais e métodos utilizados, variáveis e indicadores adotados, bem como os instrumentos de coleta e tabulação dos dados.

No capítulo seguinte, são apresentadas e discutidas as análises dos resultados obtidos, com foco na performance dos caminhões de médio porte após a manutenção preventiva e nas melhorias propostas a partir da aplicação da metodologia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da empresa

A empresa em estudo pertence ao setor extrativo mineral, atuando especificamente na cadeia de mineração de ferro. Trata-se de uma organização de grande porte, verticalizada, com operações que englobam desde a extração do minério até o beneficiamento e a sua logística de escoamento para o mercado consumidor. O produto final é o minério de ferro em diferentes granulometrias, amplamente utilizado na indústria siderúrgica nacional e internacional.

O processo produtivo inicia-se com a lavra a céu aberto, envolvendo atividades como perfuração, desmonte, carregamento e transporte do minério bruto. Em seguida, o material é encaminhado para as plantas de beneficiamento, onde passa por processos físicos de britagem, peneiramento, classificação e, eventualmente, concentração, visando atingir especificações técnicas exigidas pelo mercado. Após o beneficiamento, o minério é transportado até os pátios de estocagem e, posteriormente, aos terminais portuários por meio de sistemas integrados de logística.

Na Figura 19 é possível observar a estrutura organizacional da empresa estudada.

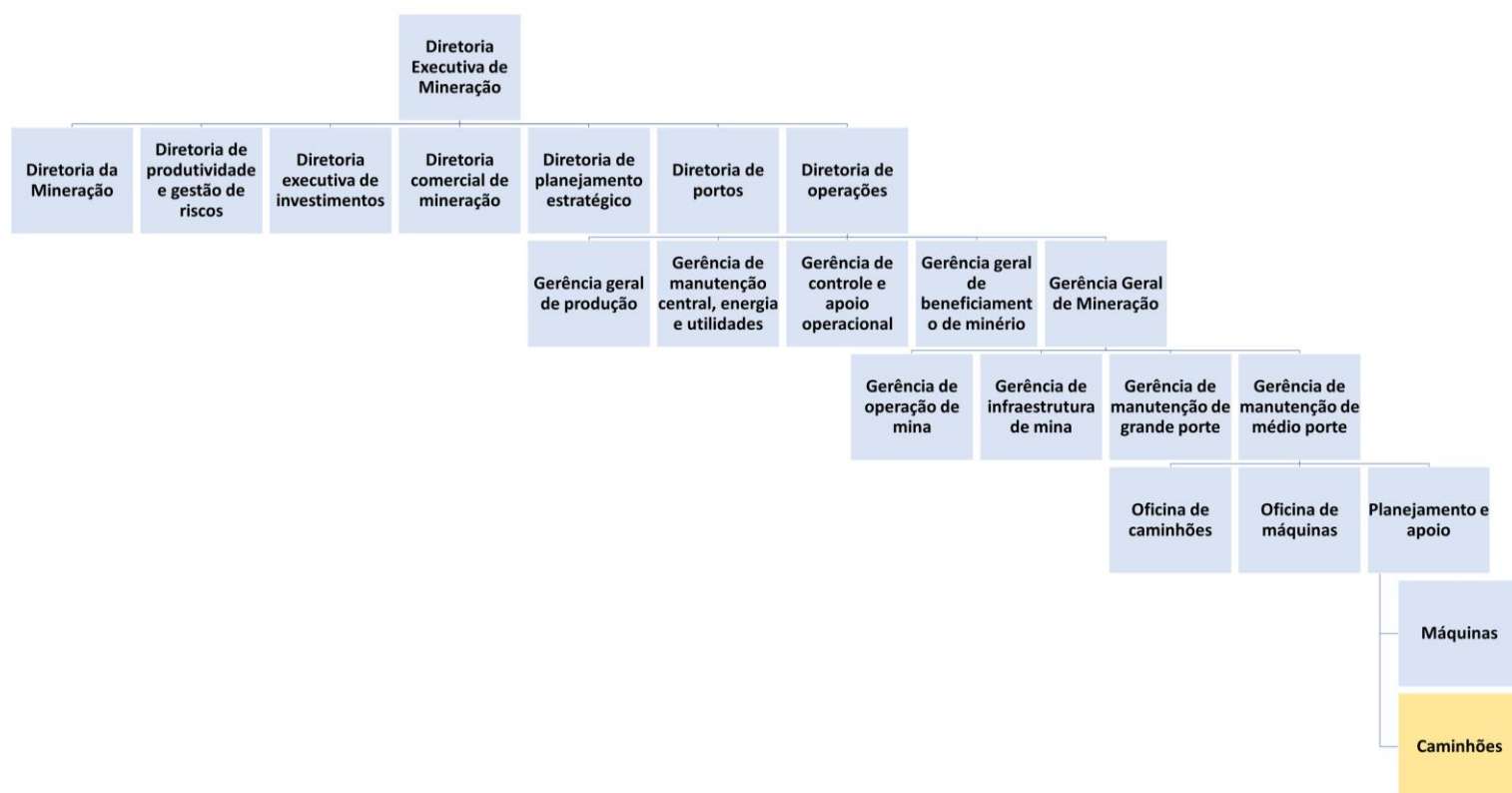


Figura 19 - Estrutura organizacional da empresa estudada.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A estrutura organizacional da empresa apresentada na Figura 19 é composta por múltiplas diretorias, cada uma responsável por uma área estratégica do negócio. Entre elas, destacam-se as diretorias de mineração, produtividade e gestão de riscos, planejamento estratégico, comercial, operações e portos. Tais diretorias estão subordinadas à Diretoria Executiva, que conduz a estratégia corporativa de forma integrada. No campo operacional, a cadeia produtiva conta com diversas gerências, como a de operação de mina, infraestrutura, beneficiamento, manutenção, energia e controle operacional.

Dentre essas divisões, a área responsável pelas manutenções de caminhões e máquinas de médio porte está inserida na Gerência de Manutenção de Médio Porte, que responde diretamente à Gerência Geral de Mineração. Esta gerência é composta por três principais frentes: a Oficina de Máquinas, a Oficina de Caminhões e a célula de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM).

O PCM desempenha papel fundamental na gestão estratégica da manutenção, que garante o alinhamento entre os recursos disponíveis, a demanda operacional e a confiabilidade dos ativos. Dentre suas funções estão o provisionamento de peças e materiais, o planejamento e a programação das manutenções, a gestão de backlog, a análise de indicadores de desempenho (como disponibilidade física e tempo médio entre falhas), além do controle de

intervenções preventivas e corretivas. Fazem parte do time os seguintes profissionais: analistas de frota, inspetores, diligenciadores de componentes, aprovacionadores e programadores de manutenção, todos atuando de forma sinérgica para assegurar a disponibilidade dos equipamentos.

Na Oficina de Caminhões são realizadas intervenções técnicas nos veículos de médio porte utilizados no transporte interno de minério, tais como os caminhões basculas. As manutenções seguem estratégias preventivas, corretivas e preditivas, com foco em garantir a continuidade das operações e minimizar paradas não programadas. Já a Oficina de Máquinas se dedica à manutenção de equipamentos auxiliares, como pás-carregadeiras, motoniveladoras e tratores.

As manutenções preventivas ocorrem em intervalos programados e envolvem inspeções, trocas de componentes desgastados e ajustes necessários para assegurar o funcionamento adequado dos ativos. As manutenções corretivas, por sua vez, são acionadas em resposta a falhas detectadas e visam restaurar a condição de operação dos equipamentos. Em ambos os casos, o planejamento detalhado e o controle rigoroso do PCM são determinantes para a eficiência do processo.

Essa estrutura organizacional permite à empresa manter altos níveis de controle e eficiência sobre suas operações de manutenção, atuando de forma preventiva e estratégica frente aos desafios impostos pelo ambiente de mineração. O alinhamento entre as áreas operacionais e de apoio técnico garante não apenas a continuidade das atividades extrativas, mas também a busca constante pela excelência operacional.

4.2 Descrição dos equipamentos

Para garantir a organização e o controle eficiente da operação dos caminhões basculantes utilizados na mina, é realizado o tagueamento (ou etiquetagem) padronizado dos equipamentos. Esse processo consiste na atribuição de códigos de identificação únicos, que facilitam a rastreabilidade, a gestão da manutenção e o monitoramento do desempenho de cada caminhão.

Atualmente, a frota de caminhões basculantes da unidade é composta por quatro grupos principais, classificados conforme o modelo e a configuração de cada veículo. A nomenclatura das frotas foi alterada para não expor o fornecedor. A seguir, são descritas as frotas e seus respectivos intervalos de identificação:

- Frota SKT-00 6x4: composta por veículos com tração 6x4, identificados pelas *tags* que vão de CB9001 até CB9040;
- Frota SKT-01 8x4: composta por veículos com tração 8x4, identificados pelas *tags* que vão de CB1101 até CB1130;
- Frota GX00 8x4: composta por veículos com tração 8x4, identificados pelas *tags* que vão de CB5001 até CB5040;
- Frota GX01 6x4: composta por veículos com tração 6x4, identificados pelas *tags* que vão de CB4501 até CB4520.

Esse sistema de identificação padronizado possibilita uma gestão mais eficiente, tanto para as atividades operacionais quanto para os processos de manutenção preventiva e corretiva, otimizando a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos. A frota de equipamentos escolhida é a de caminhões basculantes GX00 8x4, identificados pelos *tags* que vão de CB5001 até CB5040. Esta frota é composta por veículos destinados principalmente ao transporte de minério em operações de mineração, caracterizados pela robustez, alta capacidade de carga e eficiência operacional.

O modelo GX00 possui tração 8x4, ou seja, conta com quatro eixos, sendo dois direcionais e dois tracionados, o que proporciona maior aderência, estabilidade e segurança nas operações realizadas em terrenos irregulares e de difícil acesso, típicos de ambientes de mineração. A Figura 20 apresenta a imagem de um dos caminhões da frota GX00 8X4.



Figura 20 - Caminhão da frota Scania G500.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Este caminhão é equipado com motor H13, de 13 litros, que entrega uma potência máxima de 500 cavalos, garantindo elevada força para o transporte de cargas pesadas. Trata-se de um motor diesel de alta eficiência, com sistema de injeção eletrônica e tecnologia de redução catalítica seletiva (SCR), que visa reduzir as emissões de poluentes. Na Figura 21 é possível observar o motor H13.



Figura 21 - Motor H13.
Fonte: Fornecedor (2022).

A Figura 22 demonstra detalhadamente as engrenagens de distribuição do motor H13.

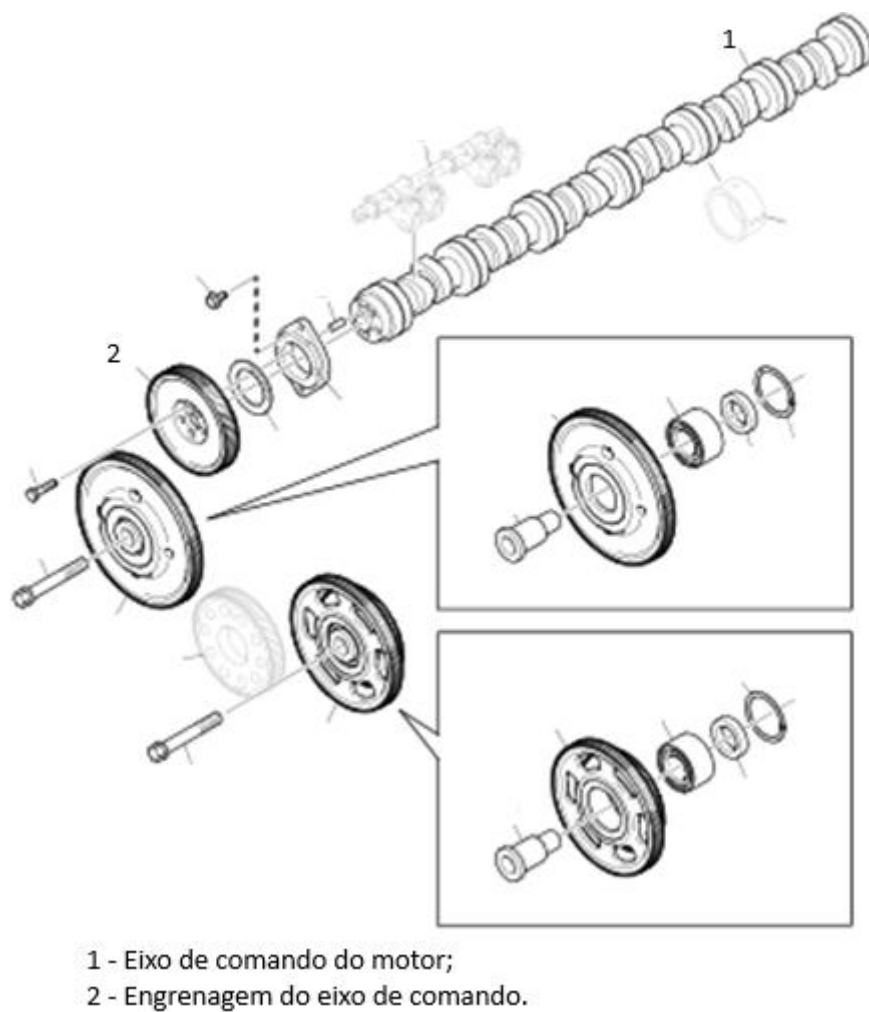


Figura 22 - Engrenagens de distribuição do motor H13.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O sistema de transmissão é automatizado, o que permite mudanças de marchas suaves e precisas, reduzindo o esforço do operador e o consumo de combustível. Esse sistema também contribui para o aumento da vida útil de componentes, como embreagem e diferenciais. A Figura 23 apresenta a árvore de transmissão desses caminhões, enquanto a Figura 24 apresenta a caixa de mudanças.

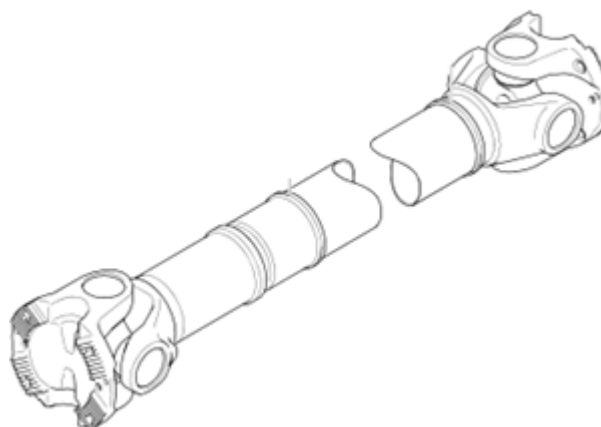


Figura 23 - Árvore de transmissão do caminhão.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

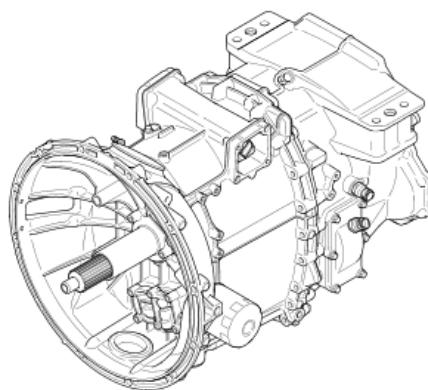


Figura 24 - Caixa de mudanças do caminhão.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O chassi reforçado, permite ao equipamento operar com eficiência mesmo sob condições severas, como aclives acentuados e vias não pavimentadas. Na Figura 25 é possível observar detalhadamente alguns componentes da fixação da parte dianteira do chassi do caminhão.

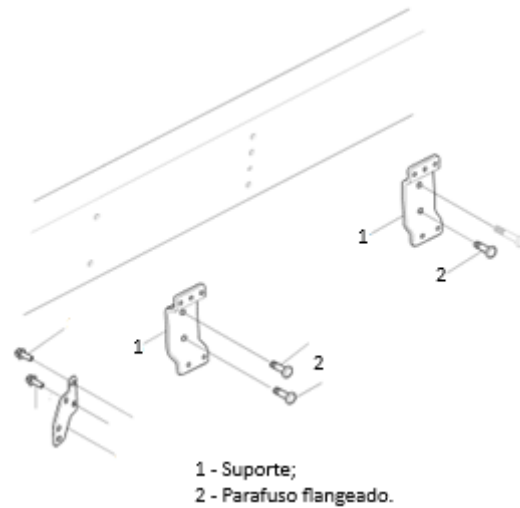


Figura 25 - Suporte dianteiro do chassi do caminhão.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

Já a Figura 26 apresenta as peças que compõem o para-choque do caminhão.

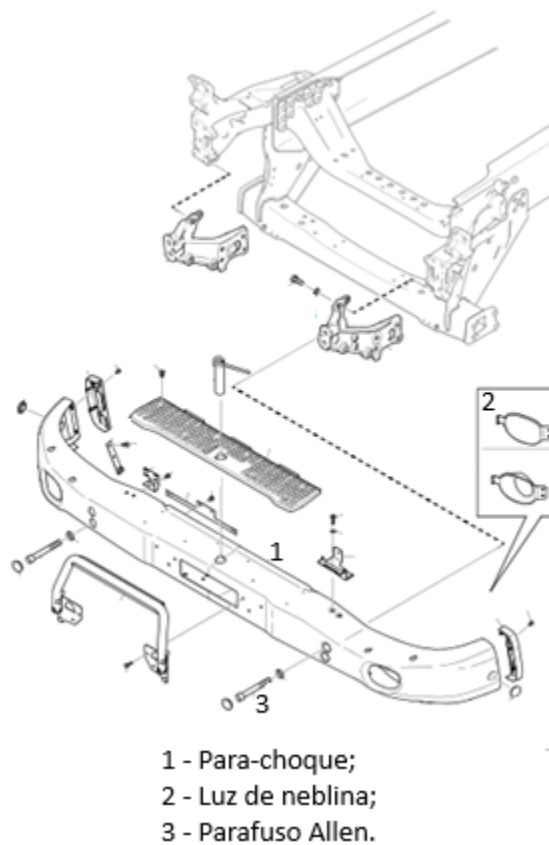


Figura 26 - Para-choque do caminhão.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

A cabine foi desenvolvida com foco na ergonomia e na segurança. Conta com assento com suspensão pneumática, comandos dispostos de forma intuitiva e sistemas de climatização e proteção contra poeira, garantindo melhores condições de trabalho para o operador. Na

Figura 27 é possível observar os componentes do teto da cabine, enquanto a Figura 28 apresenta os detalhes do assoalho.

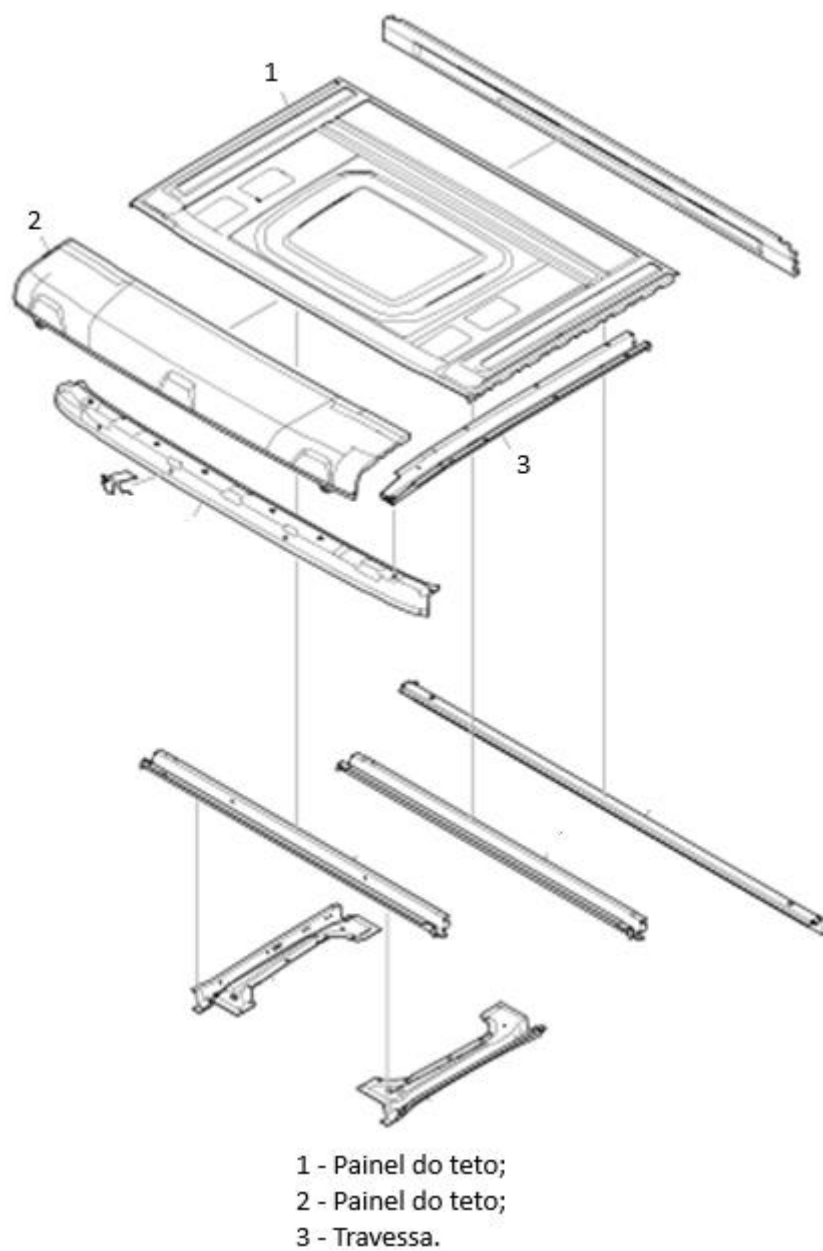


Figura 27 - Teto da cabine do caminhão.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

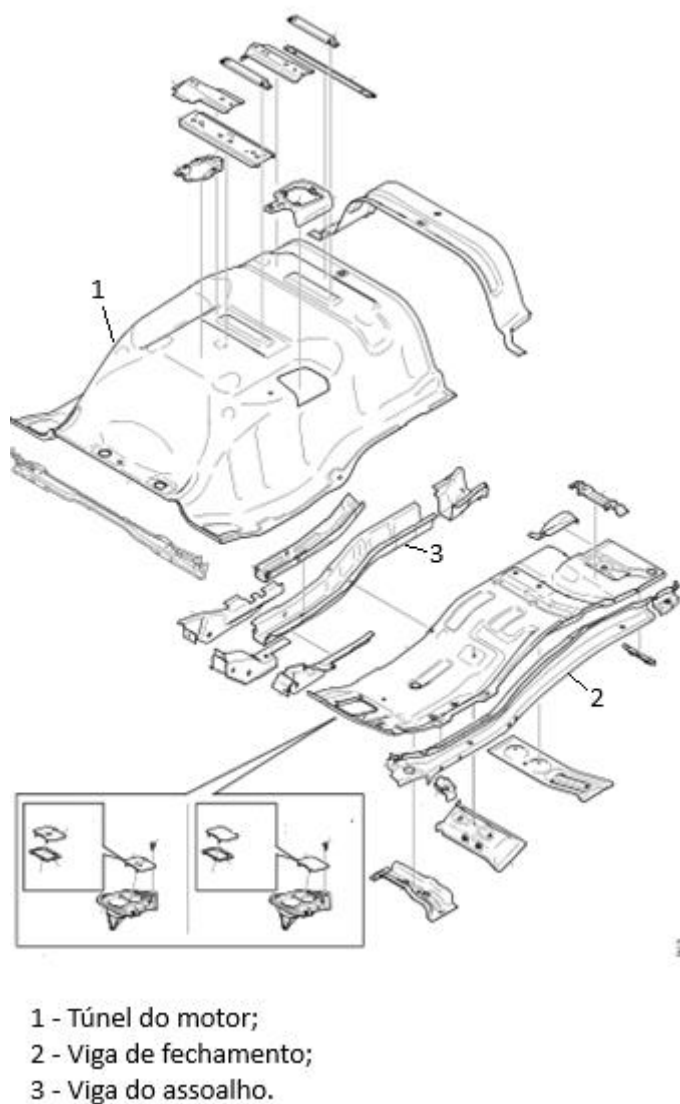


Figura 28 - Assoalho da cabine.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

A suspensão do caminhão é projetada para suportar cargas pesadas, absorver impactos e garantir estabilidade durante a operação. Utiliza molas parabólicas reforçadas e amortecedores de alto desempenho, que são distribuídas em feixes de molas, que contribuem para o conforto do operador e para a durabilidade do equipamento. Na Figura 29 é apresentado o feixe de molas do eixo dianteiro adicional que representa uma parte importante do sistema de suspensão do equipamento.

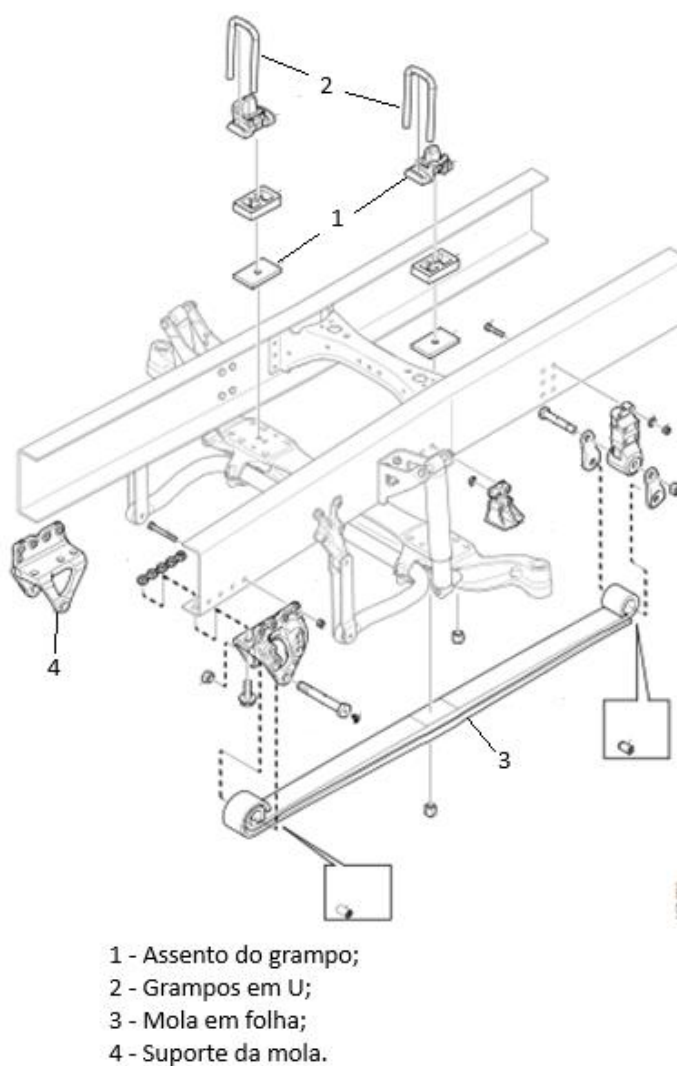


Figura 29 - Feixe de molas do eixo dianteiro.
 Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O GX00 conta com quatro eixos, sendo dois dianteiros direcionais e dois traseiros motrizes. Essa configuração 8x4 oferece maior capacidade de carga e melhor distribuição do peso, além de proporcionar tração adequada para operações em terrenos difíceis e irregulares. A Figura 30 mostra detalhes do eixo dianteiro do caminhão.

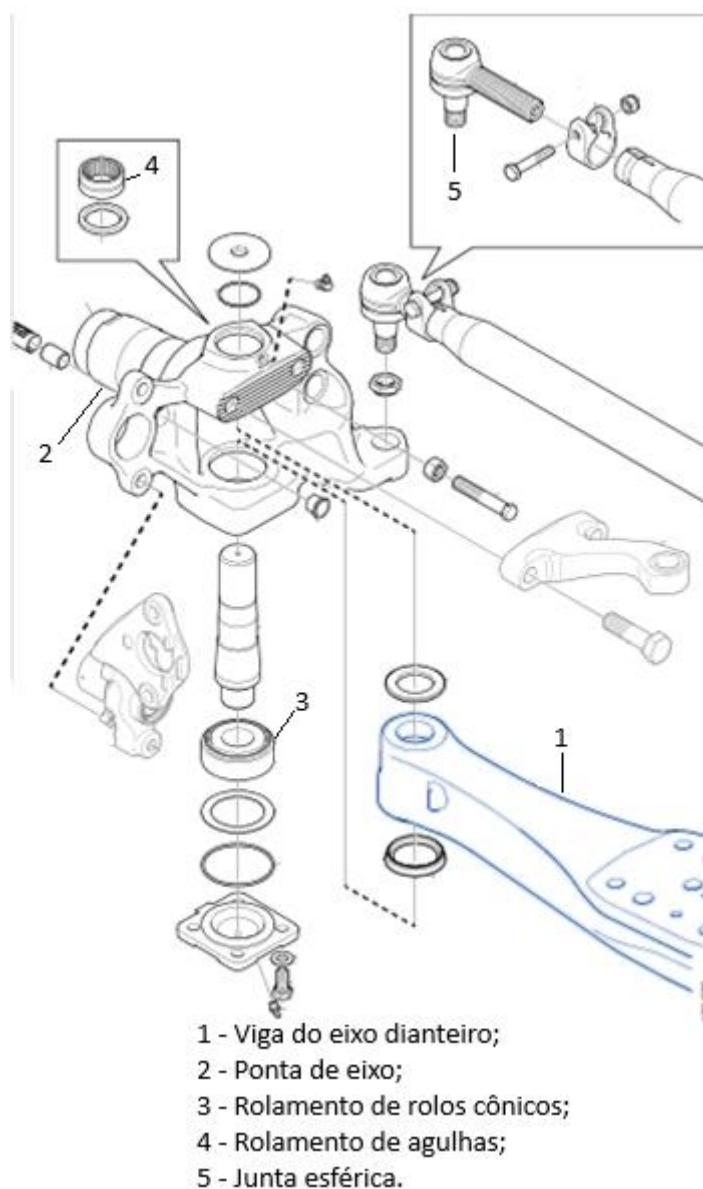


Figura 30 - Detalhes do eixo dianteiro do equipamento.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

Já na Figura 31 é possível observar a carcaça do eixo traseiro do equipamento.

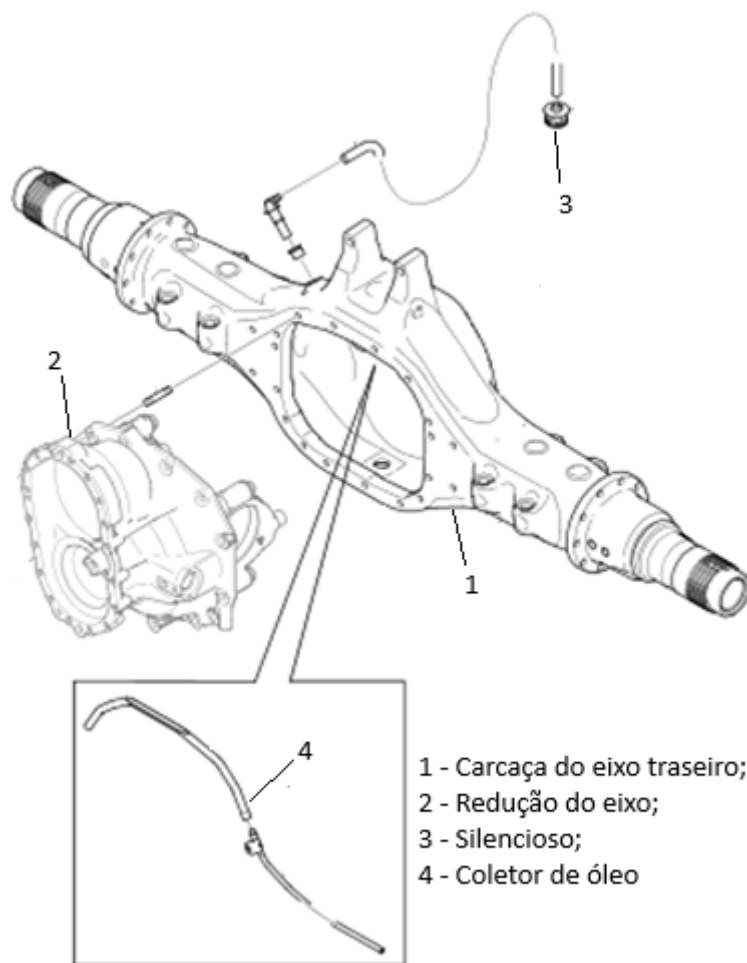


Figura 31 - Carcaça do eixo traseiro.
 Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O sistema de freios é composto por freios a tambor nas rodas, acionados pneumaticamente, além de freios auxiliares, como o *retarder* hidráulico e o freio motor. Estes sistemas adicionais são essenciais para garantir a segurança nas operações, especialmente em descidas longas e carregadas. A Figura 32 apresenta os componentes da roda de disco do freio a tambor do equipamento, enquanto a Figura 33 evidencia as particularidades da sapata do freio a tambor.

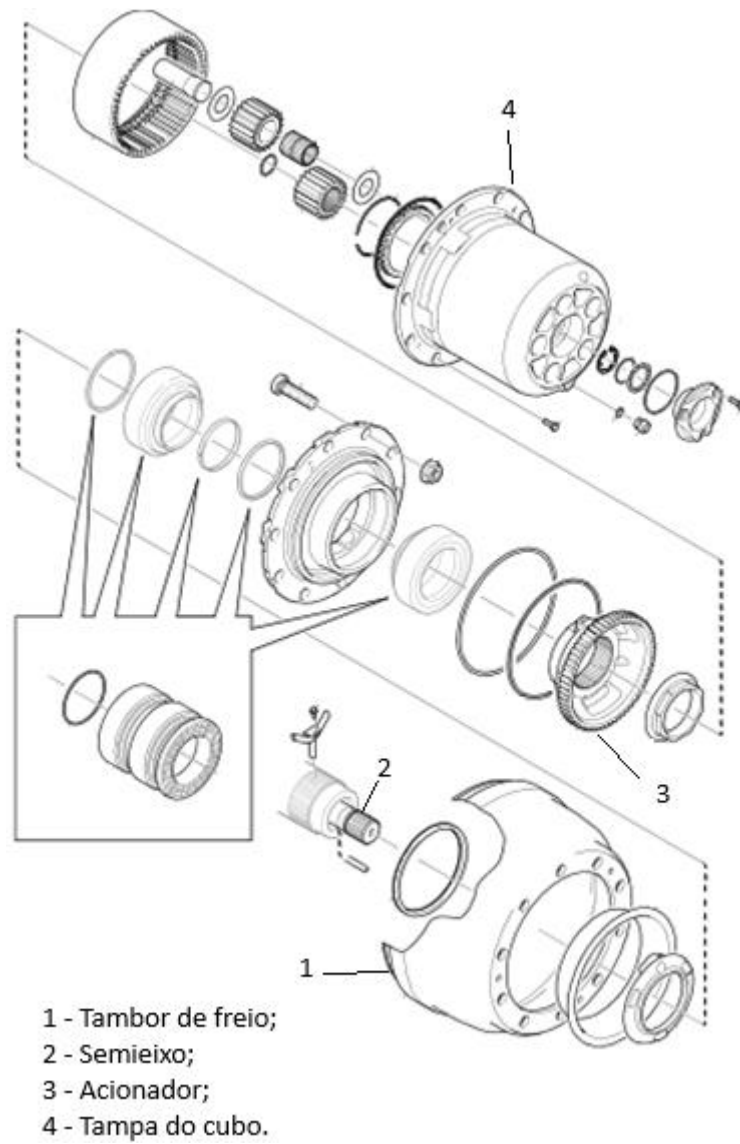


Figura 32 - Roda de disco do freio a tambor.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

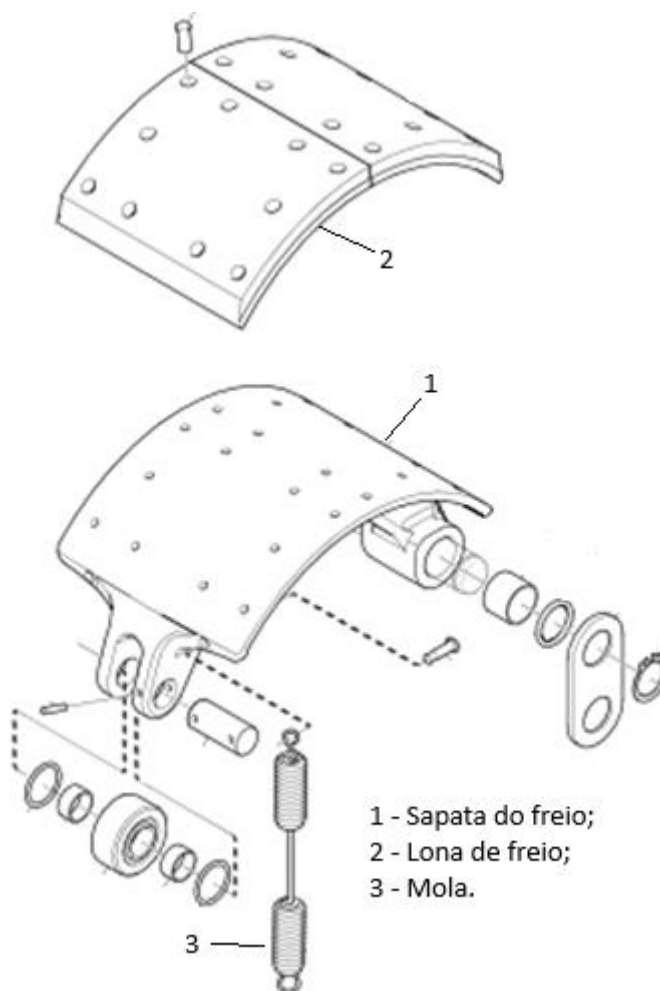


Figura 33 - Sapata do freio a tambor.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O sistema elétrico do caminhão GX00 8X4 é composto por duas baterias de 12V ligadas em série, formando um circuito de 24V, que alimenta todos os componentes elétricos e eletrônicos do veículo. O alternador de alta capacidade garante o fornecimento contínuo de energia para sistemas de iluminação, partida, ar-condicionado, freios auxiliares e módulos de controle eletrônico. A Figura 34 apresenta o motor de partida do equipamento e a Figura 35 evidencia o alternador, enquanto na Figura 36 é possível observar a bateria do equipamento.

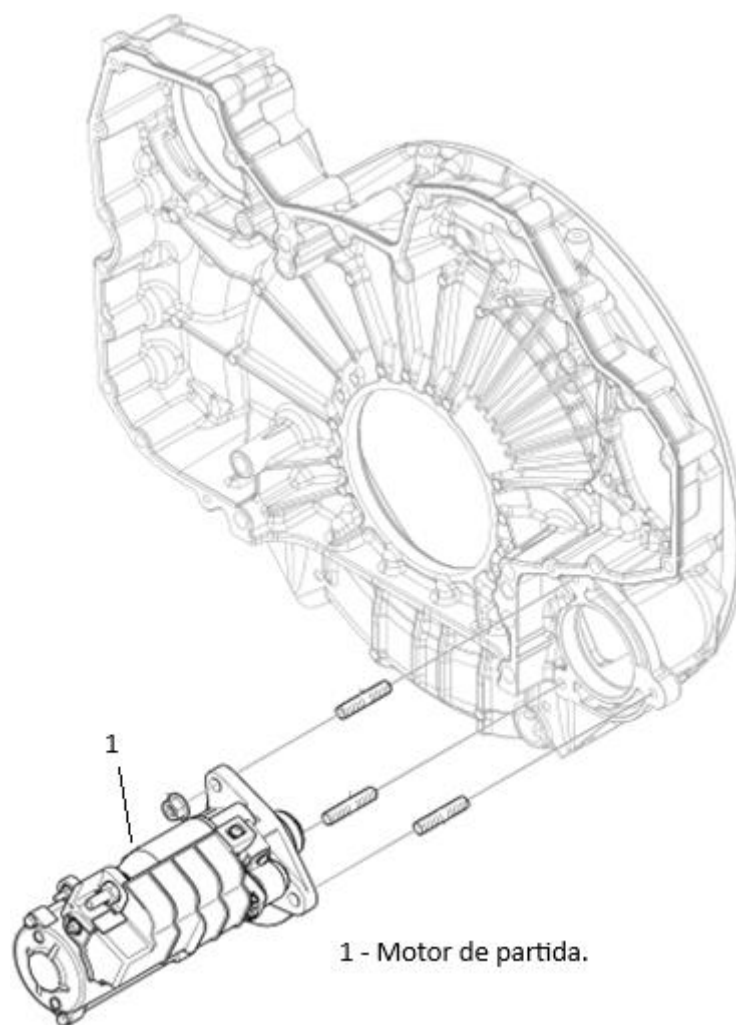


Figura 34 - Motor de partida do equipamento.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).



Figura 35 - Alternador do equipamento.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

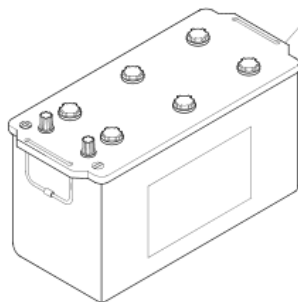


Figura 36 - Bateria do caminhão.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O sistema de direção do GX00 é hidráulico e assistido, proporcionando maior leveza e precisão nas manobras, mesmo quando o caminhão está completamente carregado. Por contar com dois eixos direcionais na dianteira, o modelo oferece excelente capacidade de manobra, essencial para operar em ambientes restritos e terrenos irregulares, típicos das operações de mineração. Esse sistema contribui significativamente para a segurança e a eficiência nas manobras, reduzindo o esforço do operador e o risco de acidentes. A Figura 37 apresenta o volante de direção do equipamento.

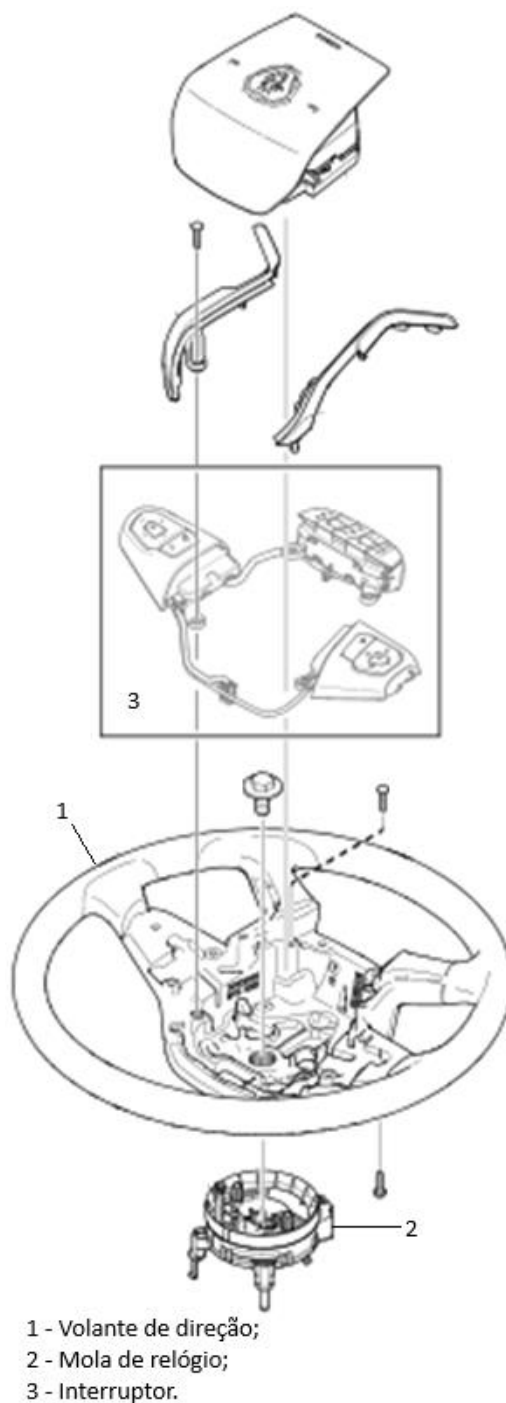


Figura 37 - Volante de direção.
 Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

O sistema de arrefecimento do caminhão GX00 é do tipo eletrônico e possui radiadores com área de 83 dm², responsáveis por dissipar o calor gerado pelo motor. Ele conta com um ventilador de 813 mm de diâmetro, com relação de transmissão 1:1, que ajuda a manter a temperatura ideal de funcionamento. A bomba de circulação garante um fluxo de 390 dm³/min, enquanto o regulador de temperatura mantém o sistema operando a 80 °C. Esse

conjunto assegura a eficiência térmica do motor durante a operação. A Figura 38 apresenta o radiador do equipamento.

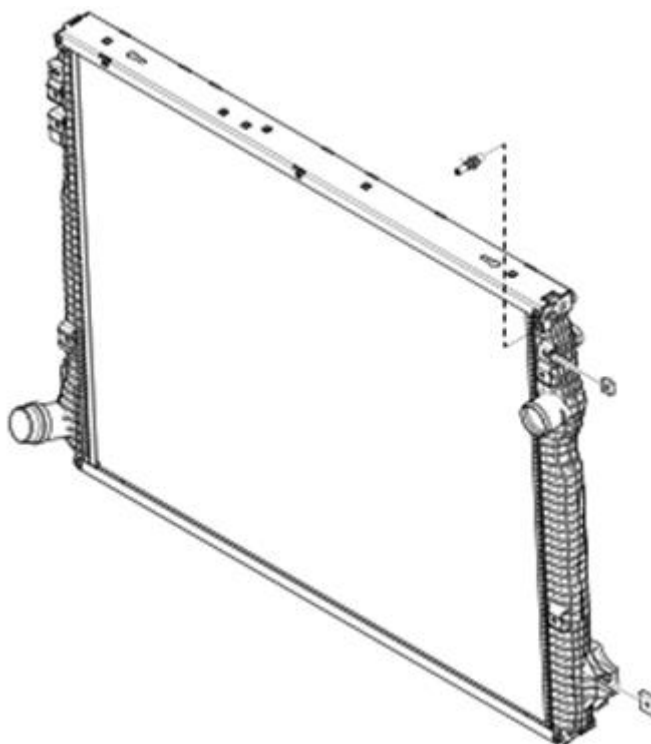


Figura 38 - Radiador do equipamento.
Fonte: Adaptado do fornecedor (2025).

A partir das figuras apresentadas, foi possível evidenciar alguns dos principais sistemas e componentes que integram o caminhão basculante GX00 8x4, com intuito de fornecer uma visão sobre sua estrutura e funcionamento. Essa caracterização detalhada é essencial para compreender o papel de cada subsistema no desempenho geral do equipamento, bem como identificar possíveis pontos críticos que podem impactar seu desempenho.

4.3 Processo de seleção do equipamento

Como etapa inicial da metodologia, foi realizado a seleção do equipamento com base na coleta e análise de dados referentes ao desempenho dos caminhões das quatro frotas analisadas: GX00, GX01, SKT-00 e SKT-01. Essa fase teve como principal objetivo identificar o comportamento do indicador de performance denominado PFPP (Primeira Falha Após Preventiva), que mede o tempo de operação em horas até que ocorra a primeira falha após a realização da manutenção preventiva. O indicador PFPP é utilizado na empresa e está contido no documento “Manual de Manutenção” da organização.

A Figura 39 apresenta um esquema representativo do indicador PFPP, ilustrando de forma didática o conceito por trás do cálculo do tempo até a ocorrência da primeira falha após a manutenção preventiva. Este indicador é essencial para avaliar a efetividade das intervenções preventivas e compreender os padrões de desempenho dos equipamentos ao longo do tempo.



Figura 39 - Esquema representativo do indicador PFPP.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Inicialmente, foram coletados dados históricos extraídos do sistema de informação de manutenção da empresa, os quais foram organizados em planilha do Excel, estes dados vão de dezembro de 2023 a maio de 2024. Nessa etapa foram registrados a data e o tipo da última manutenção preventiva executada e a data da primeira falha subsequente. Posteriormente, outro sistema foi utilizado para extrair o horímetro correspondente ao tempo de operação até a falha, o que permitiu a coleta precisa do indicador PFPP. Parte dessa base de dados é evidenciada na Figura 40, onde se visualiza a planilha estruturada com as principais informações utilizadas na análise.

EQUIPAMENTO	REVISÃO	INÍCIO DA PREVENTIVA	TÉRMINO DA PREVENTIVA	TEMPO OPERANDO ATÉ A PRIMEIRA FALHA PÓS PREVENTIVA	FALHAS 7 DIAS PÓS PREVENTIVA	DATA DA FALHA	SISTEMA FUNCIONAL DA FALHA	COMPONENTE DA FALHA	AÇÕES
CB5002	MEC 500H + LUB 500H	15/5/24 22:18	16/5/24 23:16	5,99	MAL CONTATO NAS SETAS L.D / L.E	22/05/2024	ELÉTRICO	CHAVE DO FAROL	SUB CHAVE DE CETA AVALIADO FUSÍVEIS LANTERNAS E FAROIS
CB5009	MEC 500H + LUB 1500H	13/5/24 1:57	15/5/24 23:37	114,16	PNEU DO ÚLTIMO LE INTERNO FURADO	22/05/2024	LOCOMOÇÃO	PNEU	TROCADO PNEU 4º EIXO LE INTERNO
CB5023	MEC 500H + LUB 500H	13/5/24 0:51	15/5/24 18:50	37,14	AR CONDICIONADO NÃO GELA	19/05/2024	AR CONDICIONADO	GÁS (A/C)	REALIZADO RECARGA DE GAS DO AR CONDICIONADO
CB5011	MEC 500H + LUB 500H	13/5/24 0:50	15/5/24 20:22	1,13	CINTO DO OPERADOR TRAVADO	15/5/24 23:25	ESTRUTURAL	CINTO DE SEGURANÇA	TROCADO CINTO DO OPERADOR
CB5033	MEC 500H+ LUB	12/5/24 19:51	14/5/24 20:14	15,02	FREIO RETARDER	21/05/2024	FREIO	RETARDER	COMPLETADO 0,8L DE OLEO DO RETARDER
CB5004	MEC 1000H + LUB 3000H	9/5/24 4:23	12/5/24 6:56	1,23	RETARDER INEFICIENTE	19/05/2024	FREIO	PEDAL (FREIO)	TROCADO ANEIS DE VEDAÇÃO COMPLETADO 2 DE RETARDER
CB5001	MEC 500H + LUB 1500H	9/5/24 1:57	11/5/24 17:04	150,96	BAIXO NIVEL DE OLEO DE MOTOR	19/5/24 10:46	COMPLEMENTO (OM)	ÓLEO DO MOTOR	AVALIADO E COMPLETADO 6 LITROS DE OLEO C MOTOR
CB5018	MEC 500H + LUB	6/5/24 3:04	8/5/24 22:35	1,36	DIREÇÃO PUXANDO	11/05/2024	FREIO	FREIO DE	REGULADO FREIO DE SERVIÇO
CB5006	MEC 4000H + LUB	5/5/24 20:05	9/5/24 20:41	0,06	VOLANTE	14/05/2024	DIREÇÃO	VOLANTE	REALINHADO O VOLATE DA DIREÇÃO
CB5039	MEC 1000H + LUB	2/5/24 4:07	3/5/24 20:18	52,14	BAIXO NIVEL DE ELC	10/05/2024	DIREÇÃO	BARRA	COMPLETADO 4L DE ELC

Figura 40 - Dados do indicador PFPP e dados das falhas após manutenção preventiva planilhados no excel.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Além disso, como evidenciado na Figura 40, foram coletados a descrição da falha, sistema funcional, componente e as ações corretivas.

Com os dados organizados, foi possível utilizar o *software* estatístico Minitab para elaborar gráficos de controle que permitiram uma análise mais precisa da variabilidade do indicador PFPP entre as frotas. A Figura 41 mostra a carta de controle do PFPP considerando os dados agregados de todas as quatro frotas, onde se observou uma média geral de 56,7 horas até a primeira falha. Este valor serviu como referência para os aprofundamentos analíticos que se seguiram.

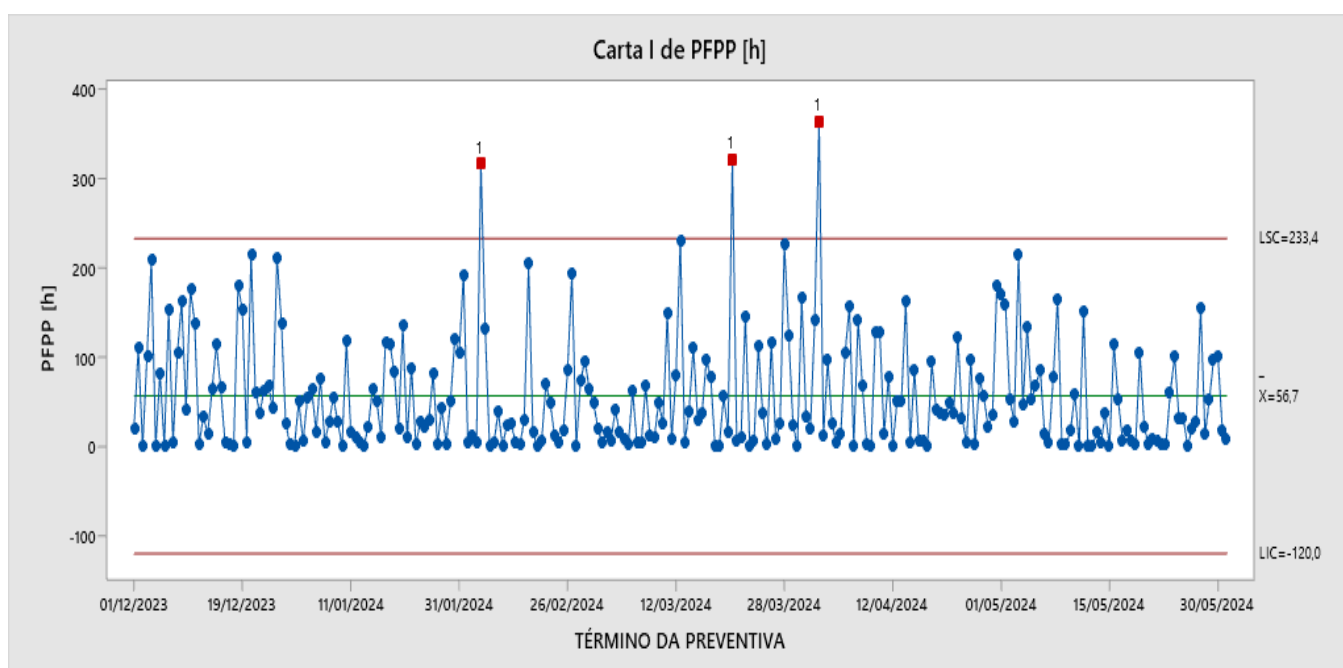


Figura 41 – Carta controle do PFPP para todas as frotas.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 41, os pontos vermelhos destacados representam valores considerados *outliers*, por estarem acima do Limite Superior de Controle (LSC), fixado em 233,4 horas. Em geral, em análises estatísticas de controle de processo, pontos fora dos limites de controle são tratados como anomalias que devem ser investigadas. No entanto, neste trabalho, esses *outliers* serão mantidos na análise, pois refletem situações positivas: correspondem a equipamentos que apresentaram um desempenho excepcional após a manutenção preventiva, levando um tempo significativamente maior até a ocorrência da primeira falha. Assim, ao invés de serem descartados como desvios indesejáveis, esses pontos serão valorizados como exemplos de alta eficácia da estratégia preventiva aplicada.

Dando continuidade ao processo, o indicador foi estratificado por fornecedor, uma vez que as frotas analisadas são provenientes de dois fabricantes distintos. As frotas SKT-00 e SKT-01 compõem o primeiro grupo, e os resultados para esse conjunto são apresentados na Figura 42, evidenciando uma média superior, de 71,3 horas, o que indica um desempenho relativamente mais robusto no intervalo até a falha.

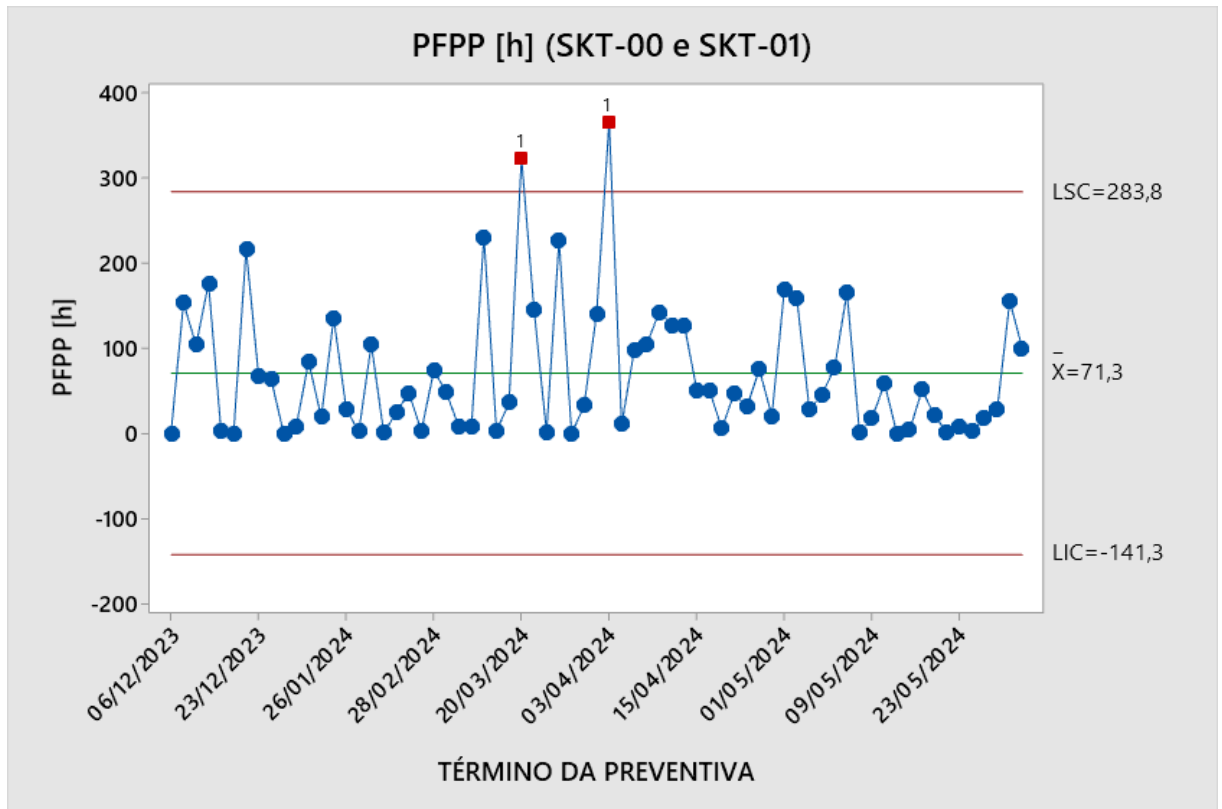


Figura 42 – Carta controle do PFPP para as frotas SKT-00 e SKT-01.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

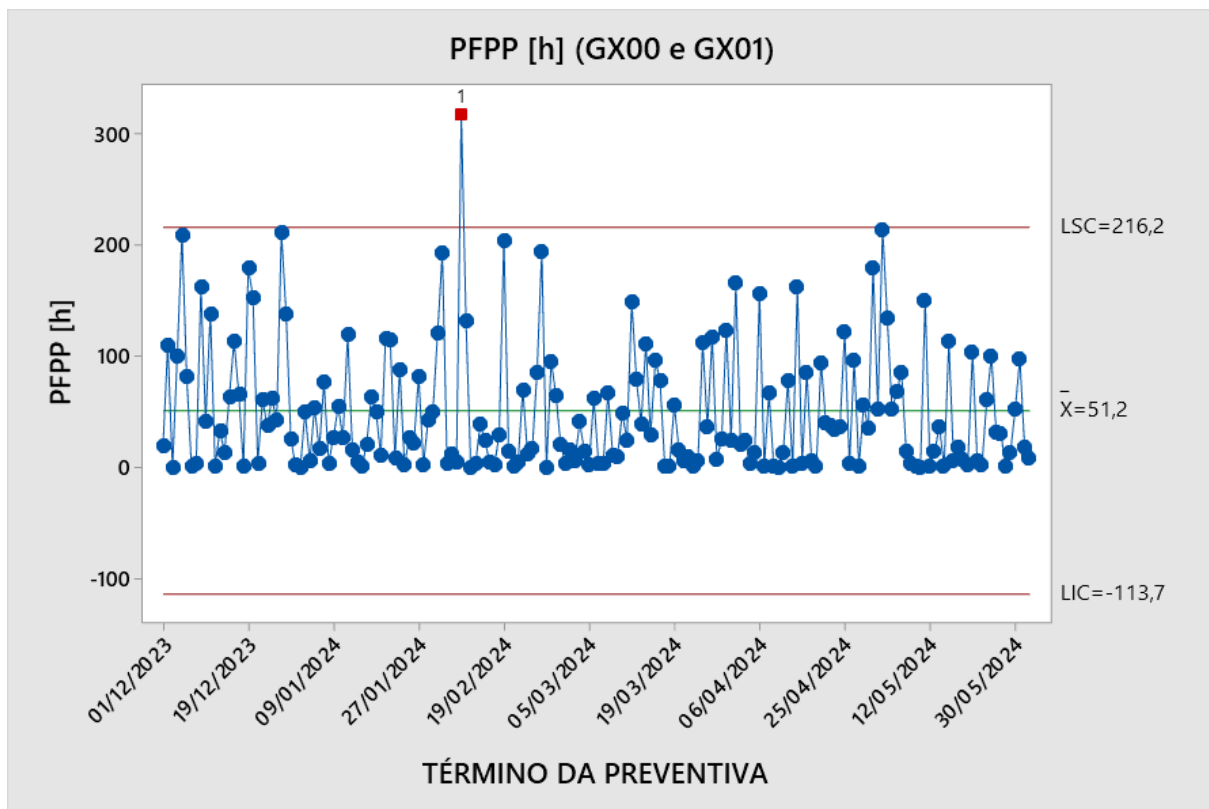


Figura 43 – Carta controle do PFPP para as frotas GX00 e GX01.
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Em contrapartida, as frotas GX00 e GX01, pertencentes ao segundo fornecedor, apresentaram desempenho inferior, como ilustrado na Figura 43, cuja média registrada foi de 51,2 horas. Diante dessa constatação, decidiu-se por uma nova estratificação, agora individualizando as duas frotas de pior desempenho para verificar se havia disparidades internas.

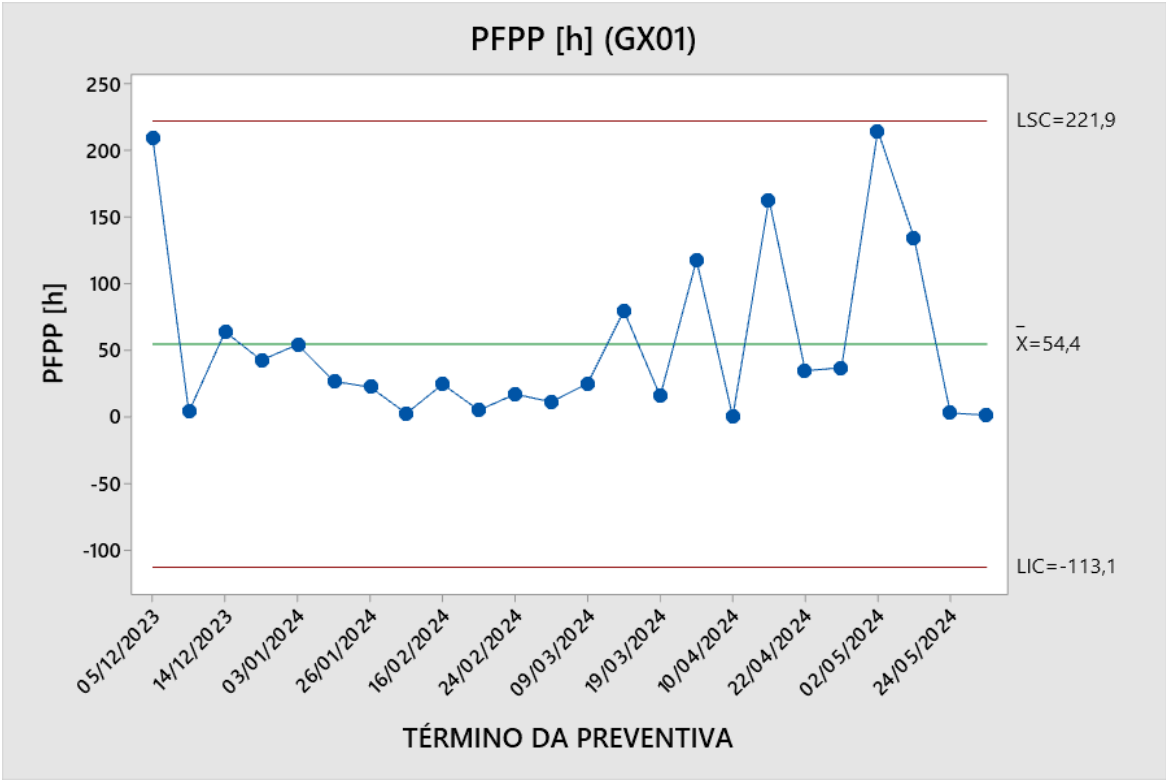


Figura 44 – Carta controle do PFPP para a frota GX01.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

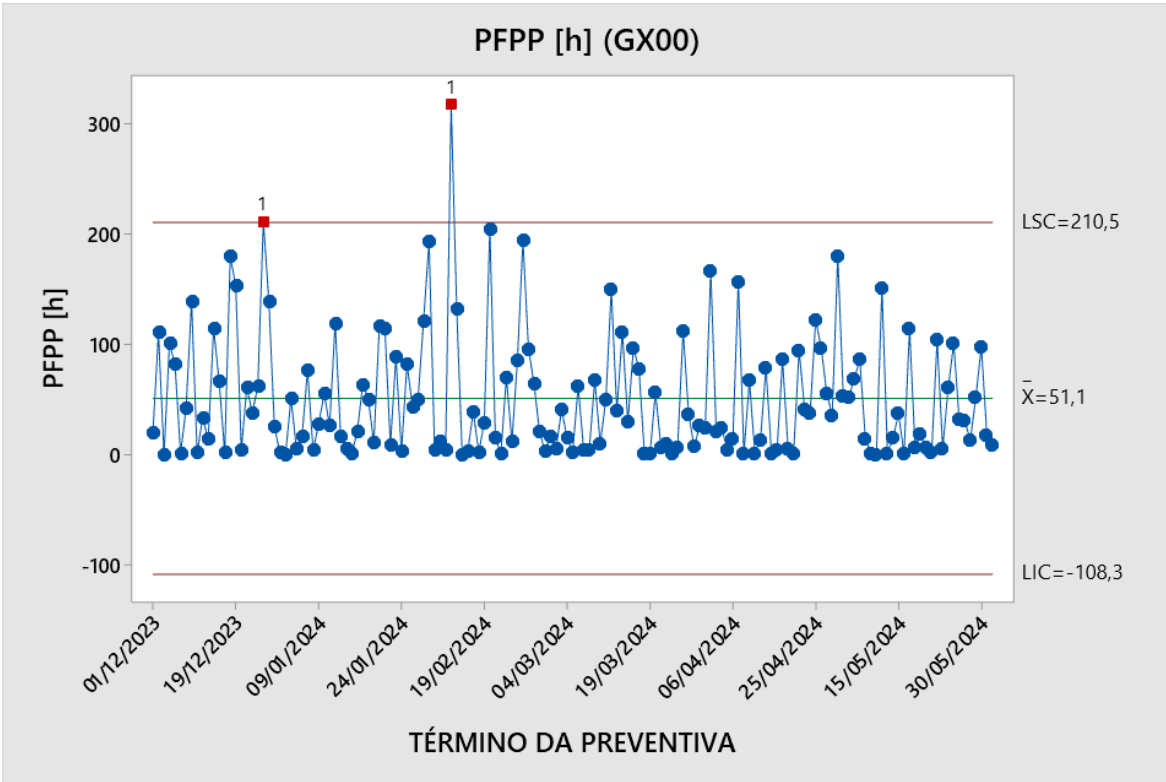


Figura 45 – Carta controle do PFPP para a Frota GX00.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 44 apresenta a carta de controle do indicador PFPP exclusivamente para a frota GX01, com uma média de 54,4 horas, enquanto a Figura 45 mostra os dados da frota GX00, com média de 51,1 horas. As médias para cada frota podem ser observadas na Tabela 2. No entanto, a escolha da frota GX00 8x4 como objeto central da aplicação da metodologia DMAIC não se deu apenas por esses valores, mas sim por uma decisão gerencial, fundamentada na maior idade dessa frota e nos problemas recorrentes enfrentados em sua operação.

Tabela 2 - Média de PFPP em horas para as diferentes configurações de frotas estudadas.

FROTA	MÉDIA DE PFPP [h]
SKT-01 e SKT-00	71,3
GX00 e GX01	51,2
GX00	51,1
GX01	54,4

Fonte: Pesquisa direta (2025).

4.4 Definir

Na fase Definir da metodologia DMAIC, o primeiro passo fundamental consiste na compreensão clara do processo a ser melhorado. Para isso, utiliza-se frequentemente a ferramenta SIPOC, que permite uma visão macro do fluxo do processo, desde seus fornecedores até os clientes finais, passando por entradas, atividades do processo e saídas. No presente trabalho, o processo mapeado é o de manutenção preventiva, e o SIPOC correspondente pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Mapeamento do processo no SIPOC.

FORNECEDORES	ENTRADAS	PROCESSO	SAÍDAS	CLIENTES
<i>Suppliers</i>	<i>Inputs</i>	<i>Process</i>	<i>Outputs</i>	<i>Customers</i>
Programação	Horímetro dos equipamento	Programação da inspeção	Ordem de Inspeção	Inspeção
Inspeção	Equipamento Ordem de serviço Dados históricos do equipamento	Inspeção	Nota de falha Ordens de serviço AGPL	Analista de frota
Analista de frota	Ordens de serviço Dados históricos do equipamento	Análise das ordens de serviço	Ordens de serviço AGPL	Aprovisionamento
Aprovisionamento	Ordens de serviço AGPL	Tratamento das ordens de serviço	Ordens de serviço AGPR	Programação
Programação	Ordens de serviço AGPR Horímetro dos equipamentos	Programação da manutenção	Plano de lubrificação Plano de mecânica Plano de lavador Ordens de serviço PROG	Lavador Lubrificação Manutenção preventiva
Lavador	Plano de lavador Ordem de serviço	Lavagem	Equipamento lavado Ordem de serviço EXCT	Lubrificação Manutenção Preventiva
Lubrificação	Plano de lubrificação Ordem de serviço	Lubrificação	Equipamento lubrificado Ordem de serviço EXCT	Manutenção Preventiva
Manutenção preventiva	Plano de mecânica Backlogs Ordem de serviço	Manutenção preventiva	Equipamento Ordem de serviço EXCT	Operação

Fonte: Pesquisa direta (2024)

A Tabela 3 apresenta os principais elementos que compõem o processo de manutenção preventiva. O fluxo se inicia com diversos fornecedores, entre eles o setor de Programação, Inspeção, Analista de Frota, Aprovisionamento, Lavador, Lubrificação e Manutenção Preventiva, que fornecem dados essenciais como ordens de serviço, planos de manutenção, históricos de equipamentos e horímetros. Esses dados são considerados entradas fundamentais para que o processo de manutenção seja executado de forma eficiente e organizada.

O processo é dividido em diversas etapas operacionais, como Programação da Inspeção, Inspeção, Análise das Ordens de Serviço, Tratamento das Ordens de Serviço, Programação da Manutenção, Lavagem, Lubrificação e, finalmente, a Manutenção Preventiva. Observa-se que o processo de manutenção preventiva não se inicia diretamente com a intervenção técnica, mas sim com a programação da inspeção, demonstrando a importância de uma análise prévia das condições dos equipamentos.

A programação da inspeção tem como principal fornecedor o setor de Programação, que coleta informações como o horímetro (horas de operação) dos equipamentos no sistema da

empresa e com base nesses dados, a equipe realiza a programação da inspeção, definindo quais equipamentos devem ser verificados e em que momento. Como saída dessa etapa, são geradas as ordens de inspeção que direcionam o time responsável para as próximas ações.

Na etapa de inspeção, os profissionais avaliam as condições reais dos equipamentos conforme as ordens emitidas. A inspeção pode gerar uma nota de falha, quando identificadas anomalias, e também novas ordens de serviço do tipo AGPL (aguardando planejamento). Essas informações são encaminhadas ao analista de frota, que será o cliente dessa etapa.

O analista de frota recebe essas ordens e realiza a análise das ordens de serviço, atividade crucial para garantir a efetividade da manutenção. Nesse momento, ele avalia criticamente a necessidade de intervenção, define prioridades, decide o que será executado, o que pode ser postergado ou cancelado, e eventualmente consolida ordens semelhantes. Como saída, são geradas ordens AGPL priorizadas, que seguem para o setor de aprovisionamento.

O aprovisionamento é responsável pelo tratamento das ordens de serviço, o que envolve garantir a disponibilidade de peças, materiais e recursos necessários para a execução da manutenção. O setor transforma ordens AGPL em AGPR (Aguardando programação) e as envia ao setor de programação, que é o próximo cliente do processo.

Na programação da manutenção, o foco está em consolidar todas as ordens AGPR recebidas, cruzando essas informações com os dados de horímetro dos equipamentos. Com isso, são definidas as revisões adequadas para cada máquina, de acordo com o tempo de operação, tipo de manutenção preventiva prevista e janela de disponibilidade. Dessa etapa, resultam ordens de serviço PROG (Programadas) e planos de manutenção específicos baseado no horímetro dos equipamentos, como plano de lubrificação, plano de lavagem e plano de mecânica, que serão executados nas fases seguintes.

Na etapa de lavagem, o equipamento passa por um processo de limpeza, fundamental para que as etapas posteriores ocorram com segurança e visibilidade adequada. Com base nas ordens de serviço e no plano de lavagem, o lavador executa a atividade e libera o equipamento limpo para as demais fases. A saída dessa etapa é o equipamento lavado e uma ordem de serviço EXCT (executada), que é registrada para controle.

Já na lubrificação, o equipamento é submetido à aplicação de lubrificantes conforme o plano previamente definido. Essa etapa é essencial para reduzir o desgaste dos componentes e

garantir o bom funcionamento até o próximo ciclo de manutenção. Assim como na lavagem, o resultado é um equipamento tratado e uma nova ordem EXCT.

Por fim, ocorre a etapa de manutenção preventiva propriamente dita, na qual a equipe executa os serviços mecânicos planejados, com base nas ordens de serviço emitidas. Essa é a etapa de intervenção técnica mais robusta do processo, e seu objetivo é restaurar a confiabilidade do equipamento antes que ocorram falhas. A saída é o equipamento mantido (ou seja, submetido à manutenção preventiva com sucesso), e as respectivas ordens de serviço finalizadas.

É importante destacar que o cliente final do processo é o setor de Operação, responsável por utilizar os equipamentos no dia a dia produtivo da empresa. A saída final do processo, portanto, é o equipamento disponível, funcional e confiável, pronto para retornar à sua função operacional.

Na segunda etapa da fase definir, foi necessário adaptar a forma de acompanhamento do indicador PFPP em função de diretrizes internas da empresa. Assim, optou-se por organizar os dados por semana para a frota selecionada, com o objetivo de facilitar a definição da meta do projeto. A Figura 46 apresenta esse comportamento semanal do indicador, onde é possível observar certa variabilidade, mas com tendência de estabilidade ao longo do período analisado.

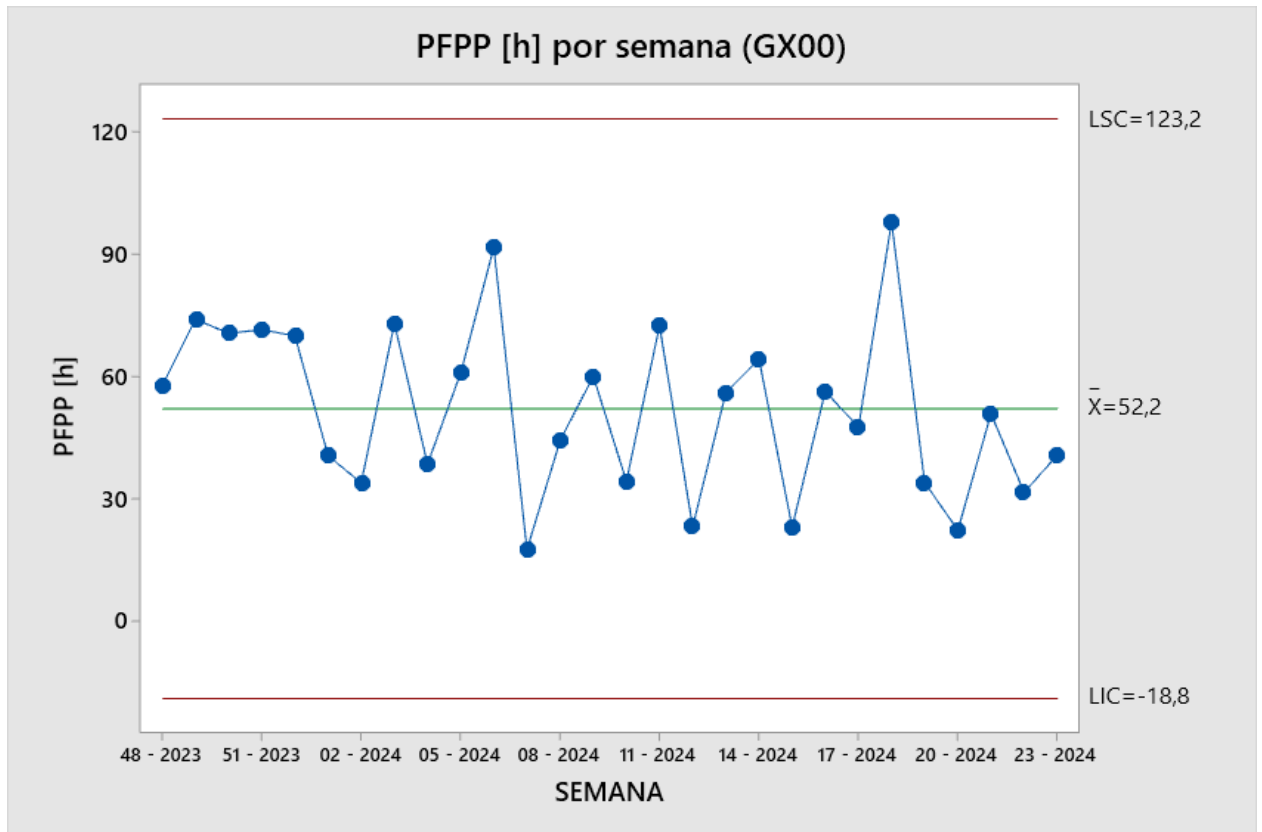


Figura 46 - Indicador do PFPP [h] por semana para a frota GX00.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A média semanal do PFPP foi de 52,2 horas. A partir dessa organização, parte-se para a definição da meta utilizando o critério estatístico do terceiro quartil, que permite estabelecer uma meta factível e desafiadora com base no desempenho histórico da frota. O terceiro quartil pode ser observado no *boxplot* da Figura 47.

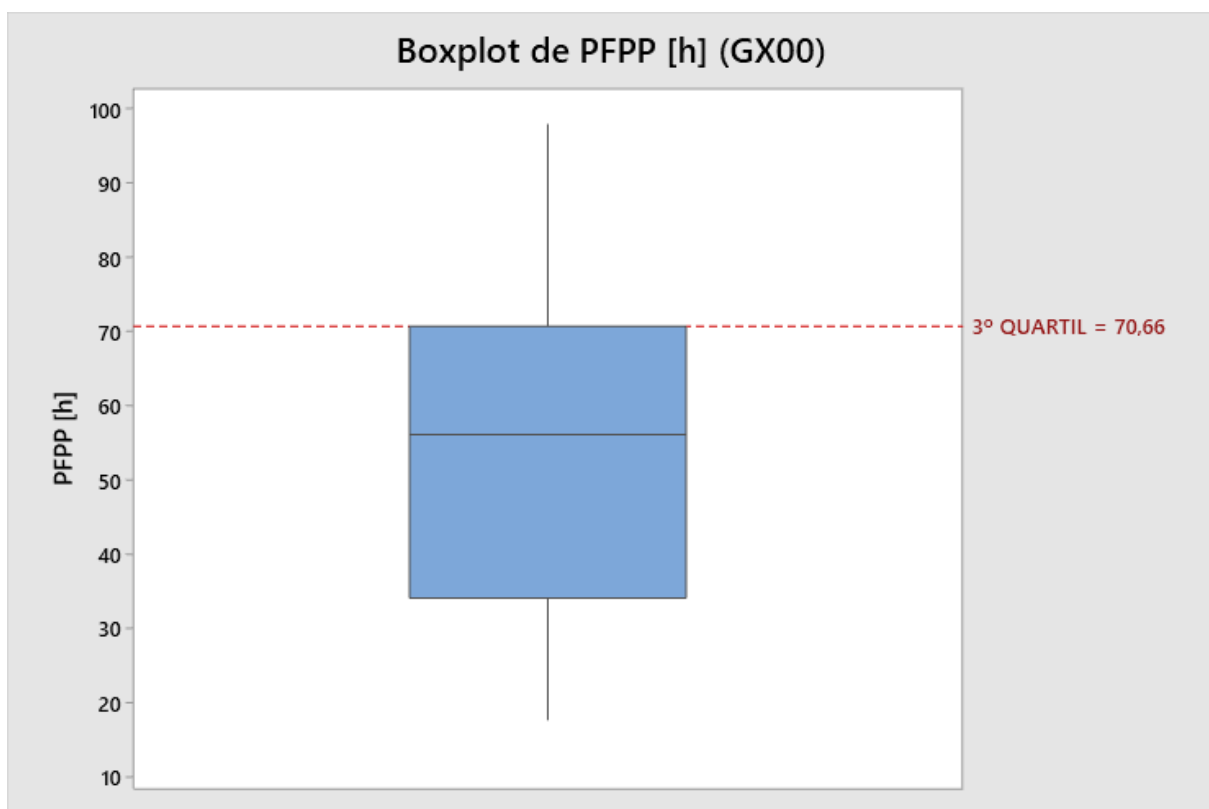
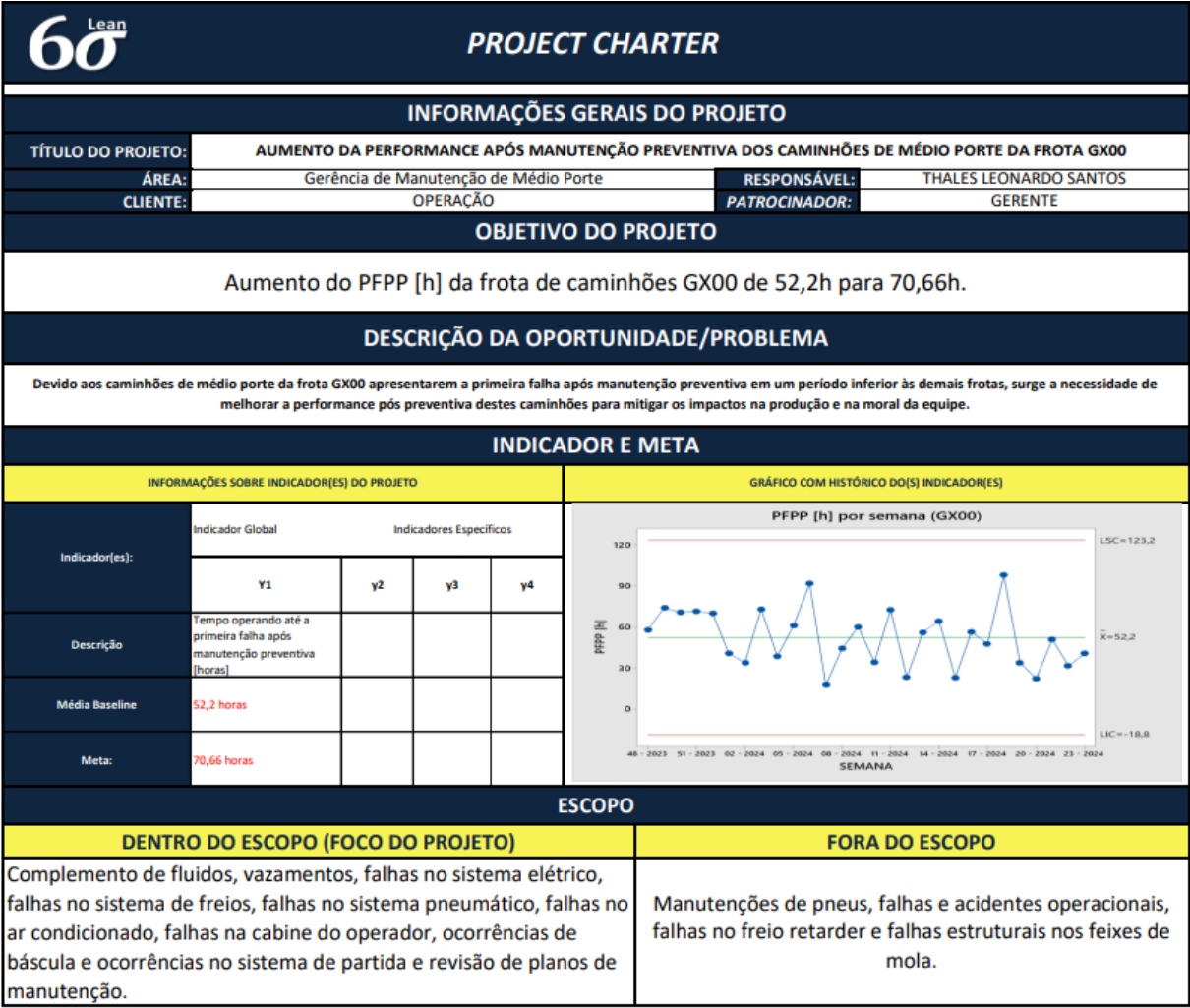


Figura 47 - Boxplot do indicador PFPP da frota GX00 por semana.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 47 apresenta o *boxplot* do indicador PFPP para a frota GX00, permitindo uma visualização clara da dispersão e concentração dos dados. O terceiro quartil, destacado em vermelho, é de aproximadamente 70,66 horas, representando o ponto abaixo do qual se encontra 75% dos dados. Esse valor é utilizado como meta do projeto, pois reflete um nível de desempenho superior à média histórica, porém ainda dentro de uma faixa realista de alcance. Ao adotar o terceiro quartil como meta, busca-se promover a melhoria contínua do processo, elevando de forma sustentada o tempo até a primeira falha após a manutenção preventiva.

Com o processo já mapeado e a meta devidamente estabelecida com base em critérios estatísticos, foi possível desenvolver o contrato de projeto (*Project Charter*) que é apresentado na Figura 48.



Na parte inferior, o documento apresenta o escopo do projeto, delimitando o que está e o que não está contemplado nas ações. Dentro do escopo estão os modos de falha passíveis de controle por meio de ações preventivas, como complemento de fluidos, vazamentos, falhas no sistema elétrico, falhas no sistema de freios, falhas no sistema pneumático, falhas no ar-condicionado, falhas na cabine do operador, entre outras recorrências associadas ao plano de manutenção.

Por outro lado, fora do escopo ficaram falhas relacionadas à manutenção de pneus, acidentes operacionais e falhas no freio *retarder* e nos feixes de molas. Essas exclusões se justificam por dois motivos: primeiro, por serem eventos de difícil controle operacional direto, como no caso de pneus e acidentes; segundo, por se tratar de falhas crônicas dos equipamentos, como ocorre com o *retarder* e os feixes de molas, cuja recorrência e natureza estrutural tornam inviável uma solução dentro do escopo deste projeto.

Vale destacar que outros elementos tradicionalmente presentes em um Project Charter, como o cronograma e a equipe envolvida, foram omitidos por não serem relevantes para os fins deste estudo.

Com a conclusão da fase de definição, que incluiu a elaboração do SIPOC, o estabelecimento da meta de aumento do PFPP e a formalização do escopo e objetivo por meio do *Project Charter*, o projeto pode avançar para a fase medir. Nesta nova etapa, o foco passou a ser a quantificação do problema, por meio da estratificação das falhas, construção de gráficos de Pareto e cálculo do nível sigma, permitindo uma compreensão mais profunda do desempenho atual da manutenção preventiva para servir como base para as próximas fases do ciclo DMAIC.

4.5 Medir

A fase medir tem início com a organização dos dados por meio de uma árvore de estratificação, representada na Figura 49.



Figura 49 - Estratificação das falhas após manutenção preventiva.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 49 representa uma árvore de estratificação utilizada para organizar e categorizar as falhas que ocorrem após manutenções preventivas nos caminhões da frota GX00.

No topo da árvore, tem-se a categoria mais abrangente: falhas após manutenção preventiva. Esse é o escopo geral da análise, englobando todas as ocorrências de falhas que surgem depois da realização das manutenções preventivas, indicando que, apesar da intervenção preventiva, os caminhões ainda apresentam falhas recorrentes.

O segundo nível da árvore corresponde aos modos de falha, que representam os tipos ou categorias gerais de problemas observados. Estes modos incluem: complemento, vazamentos, elétrica, partida, pneumático, marcha, freios, ar-condicionado, cabine do operador, estrutural, báscula e aquecimento. No terceiro e último nível da estratificação, os modos de falha são desdobrados em componentes específicos, permitindo uma análise ainda mais precisa.

A utilização da árvore de estratificação contribui significativamente para o direcionamento das análises realizadas na etapa de análise (*Analyse*) da metodologia DMAIC, auxiliando na investigação estruturada das causas e na priorização tanto das causas quanto das ações corretivas. Organizar as falhas em níveis progressivos de detalhamento permite uma

compreensão mais clara dos pontos críticos do processo, tornando a tomada de decisão mais assertiva e embasada em dados concretos.

Após a construção da árvore de estratificação que permitiu decompor as falhas após manutenção preventiva, passou-se à elaboração de gráficos de Pareto para identificar os modos de falha com maior impacto na performance dos equipamentos. Essa etapa visa priorizar os esforços de análise e correção com base no princípio de que uma minoria das causas costuma ser responsável pela maioria dos efeitos. A Figura 51 ilustra o Pareto dos modos de falha identificados após a manutenção preventiva, organizados por ordem decrescente de frequência.

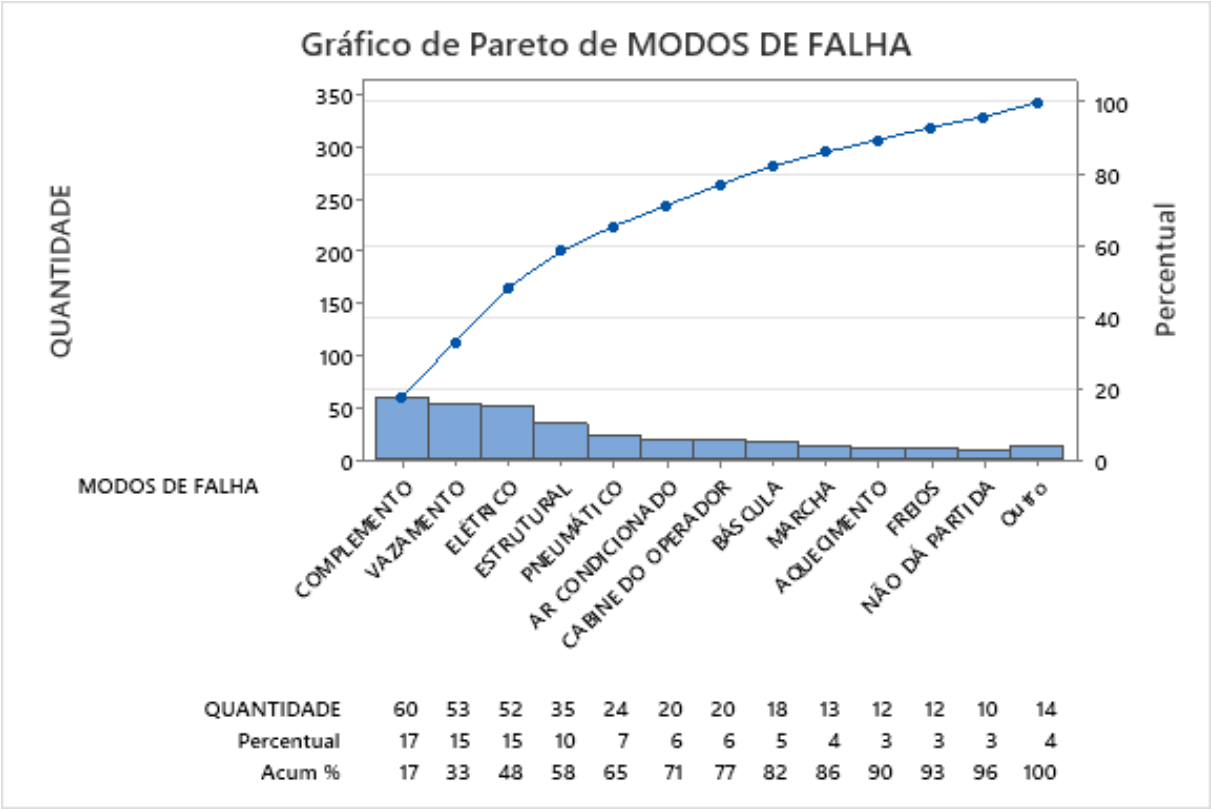


Figura 50 - Pareto de modos de falha.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 50 nota-se que os quatro modos de falha mais recorrentes são: complemento, vazamento, elétrico e estrutural, os quais, somados, representam aproximadamente 58% de todas as falhas registradas. Esses dados indicam que uma parcela relativamente pequena de tipos de falha é responsável por mais da metade dos eventos pós-preventiva, o que reforça a importância de concentrar os esforços corretivos nesses modos.

Além desses quatro principais, destacam-se ainda os modos pneumático, ar-condicionado, cabine do operador e báscula, que juntos representam 25% das falhas e compõem uma faixa intermediária de recorrência. Já os modos marcha, aquecimento, freios, não dá partida e outros somam apenas 17%, refletindo ocorrências mais pontuais. Ainda que menos frequentes, essas falhas devem ser acompanhadas, pois podem revelar fragilidades emergentes. Esse mapeamento completo permite que a gestão da manutenção atue tanto na correção das causas mais críticas quanto na vigilância das tendências menos evidentes.

Com base nesse resultado, são elaborados gráficos de Pareto específicos para cada um dos quatro modos de falha mais relevantes, a fim de identificar os componentes que mais contribuíram para os eventos dentro de cada categoria. A Figura 51, por exemplo, apresenta o Pareto dos fluidos que mais passaram por complemento após a manutenção preventiva, aprofundando a análise do primeiro modo de falha identificado.

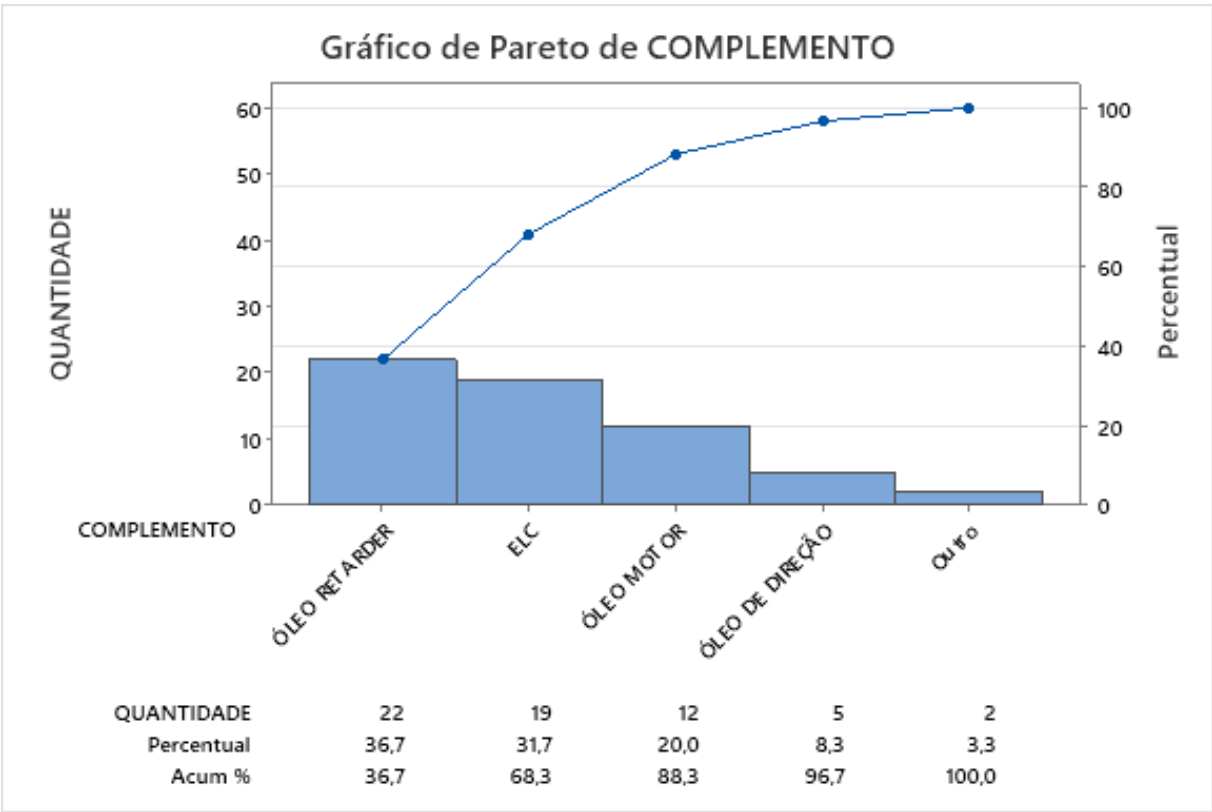


Figura 51 - Pareto para o tipo de fluido que foi complementado.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 51 aprofunda a análise do modo de falha complemento, revelando quais fluidos foram mais frequentemente reabastecidos após a manutenção preventiva. Dentre os componentes listados, destaca-se o óleo do *retarder*, que representa 36,7% dos casos de

complemento, sinalizando uma possível deficiência na verificação ou reposição desse fluido durante a intervenção preventiva. Em seguida, aparece o ELC, que corresponde ao líquido de arrefecimento, com 31,7% das ocorrências, também indicando a necessidade de uma inspeção mais criteriosa do sistema de arrefecimento.

O óleo do motor surge como o terceiro fluido mais complementado, com 20%, seguido pelo óleo de direção, com 8,3%, e pela categoria “outros”, que representa apenas 3,3% dos registros. Juntos, os três principais fluidos (óleo do *retarder*, ELC e óleo do motor) somam expressivos 88,3% dos casos, o que reforça a ideia de que o complemento desses itens deveria ser tratado como prioridade durante a manutenção preventiva. Esse resultado destaca a importância de revisar os procedimentos operacionais padrões relacionados à checagem e substituição desses fluidos, visando reduzir a reincidência de falhas por complemento e, conseqüentemente, aumentar o Tempo até a Primeira Falha Após Manutenção Preventiva (PFPP).

A Figura 52 apresenta os fluidos que apresentaram maior recorrência de vazamentos nos equipamentos.

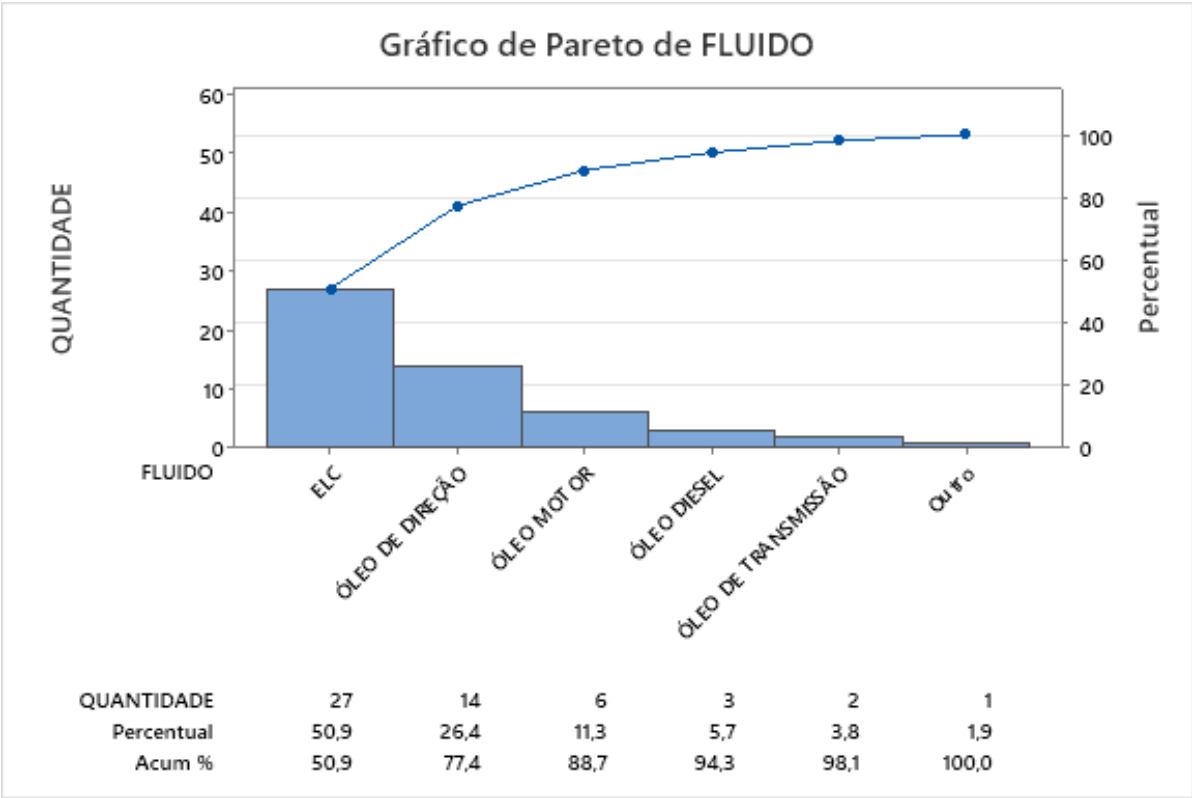


Figura 52 - Pareto do tipo de fluido em vazamentos.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 52 representa o gráfico de Pareto referente ao modo de falha vazamento, permitindo identificar quais fluidos são mais frequentemente associados a esse tipo de ocorrência após a manutenção preventiva. O fluido com maior representatividade é o ELC, líquido de arrefecimento, que responde por 50,9% dos casos. Esse número indica que mais da metade dos vazamentos registrados está relacionada ao sistema de arrefecimento, o que pode apontar para fragilidades nos componentes desse circuito ou falhas nos procedimentos de reaperto, vedação e inspeção durante a preventiva.

Em seguida, aparece o óleo de direção, responsável por 26,4% dos vazamentos, sugerindo a necessidade de atenção especial ao sistema hidráulico, especialmente em conexões e reservatórios. O óleo do motor representa 11,3% das ocorrências, enquanto o óleo diesel, com 5,7%, e o óleo de transmissão, com 3,8%, apresentam uma participação menor, mas ainda relevante do ponto de vista de segurança e confiabilidade operacional. Por fim, a categoria "outros" representa apenas 1,9% dos casos. A análise mostra que os três fluidos mais críticos: ELC, óleo de direção e óleo do motor, concentram quase 90% dos vazamentos reportados, indicando claramente onde os esforços preventivos devem ser intensificados para mitigar esse tipo de falha e prolongar a confiabilidade dos sistemas após a intervenção.

A Figura 53 apresenta os componentes com maior recorrência de falhas no sistema elétrico dos equipamentos.

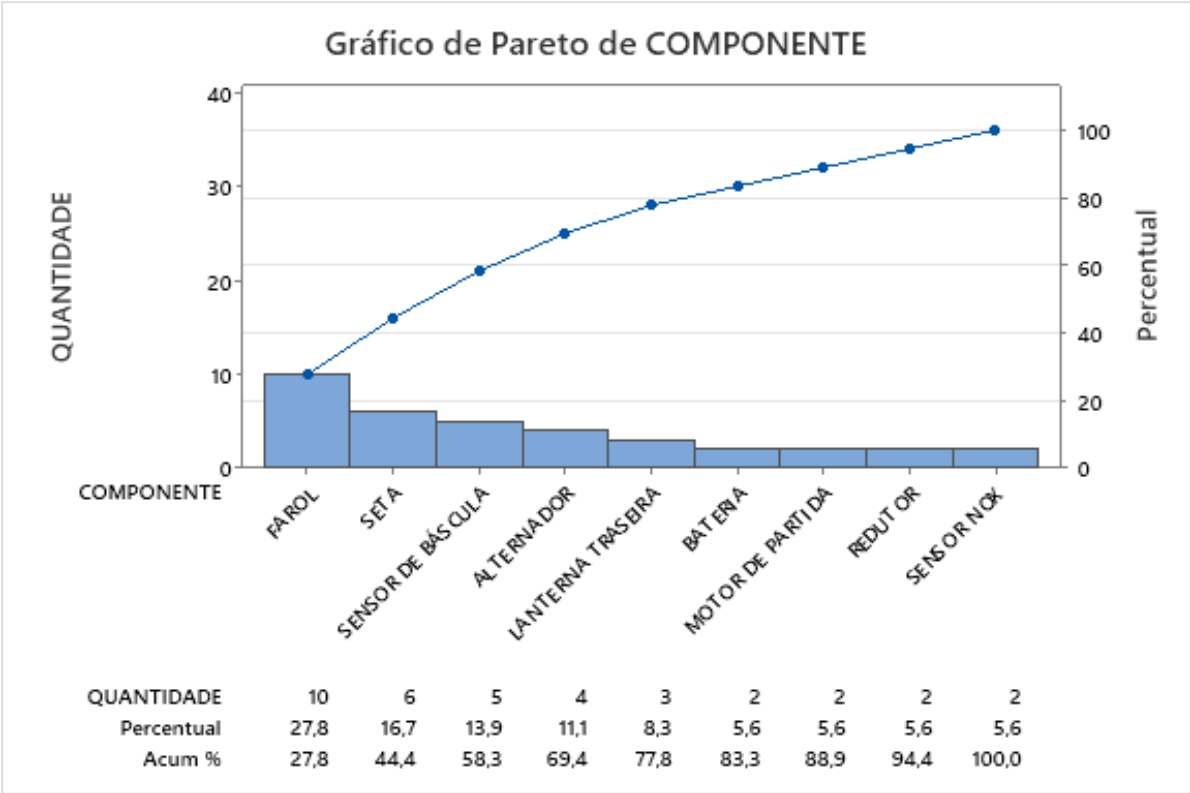


Figura 53 - Pareto de componentes que mais falharam no sistema elétrico.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 53 detalha os principais componentes envolvidos nas falhas elétricas observadas após a manutenção preventiva. O item mais recorrente é o farol, responsável por 27,8% das ocorrências, o que sugere a necessidade de revisar tanto os testes de funcionamento quanto a fixação e a proteção do sistema de iluminação dianteira durante a preventiva. Na sequência, a seta apresenta 16,7% dos casos, indicando outra falha ligada ao sistema de sinalização veicular, que é essencial para a segurança operacional.

O sensor de báscula surge em terceiro lugar, com 13,9% das falhas, o que pode estar relacionado a conexões elétricas frágeis ou desgaste dos sensores, sobretudo considerando as condições de operação severa desses componentes. O alternador representa 11,1% das ocorrências, seguido pela lanterna traseira (8,3%), todos elementos críticos tanto para a sinalização quanto para o funcionamento adequado do sistema elétrico.

Com participações menores, mas ainda relevantes, aparecem a bateria, motor de partida, redutor e sensor de NOx, cada um com 5,6% das falhas. A distribuição das falhas evidencia que, embora algumas ocorrências estejam dispersas entre diferentes componentes, há uma concentração considerável em elementos relacionados à iluminação e sensores, o que justifica uma revisão nos procedimentos de inspeção elétrica preventiva voltados a esses sistemas.

Em continuidade, a Figura 54 apresenta os componentes estruturais com maior recorrência de falhas após manutenções preventivas.

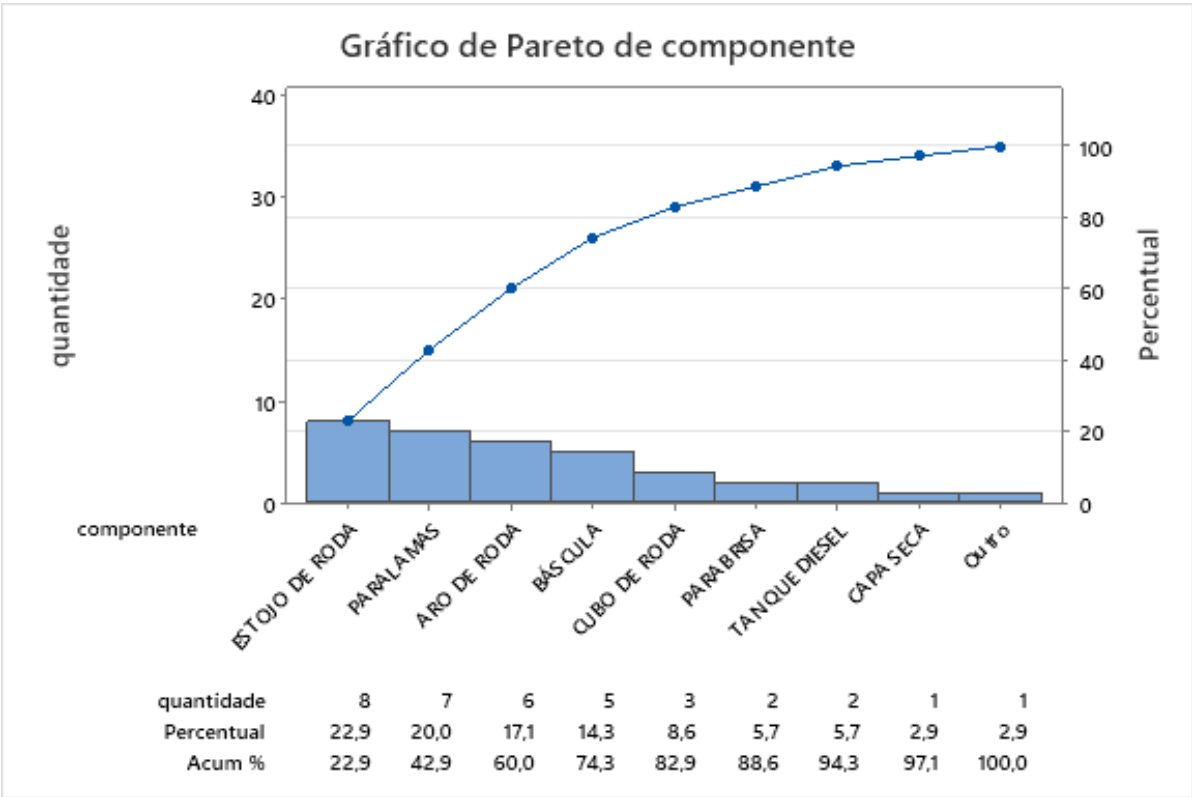


Figura 54 - Pareto de componentes estruturais que mais falharam.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 54 apresenta a distribuição dos componentes mais frequentemente associados ao modo de falha estrutural após a manutenção preventiva. O item com maior incidência é o estojo de roda, responsável por 22,9% das ocorrências, sinalizando a necessidade de reforçar as inspeções visuais e dimensionais nesse componente, sobretudo em relação a trincas, desalinhamentos ou folgas. Em seguida, os paralamas representam 20% das falhas estruturais, refletindo possíveis danos por impacto ou vibração que não foram devidamente identificados ou corrigidos durante a preventiva.

Na terceira posição está o aro de roda, com 17,1%, seguido pela corrente da bascula, com 14,3%, ambos componentes sujeitos a desgaste mecânico intenso e que exigem verificações específicas quanto à integridade e ao estado de fixação. O cubo de roda aparece com 8,6% das ocorrências, enquanto parabrisa e tanque de diesel, cada um com 5,7%, indicam falhas mais isoladas, porém relevantes do ponto de vista operacional e de segurança. Por fim, a capa seca e a categoria outros registram 2,9% cada. A análise do Pareto mostra que

as quatro principais ocorrências: estojo de roda, paralamas, aro de roda e corrente da báscula, concentram 75% das falhas estruturais, direcionando os esforços de inspeção e reforço estrutural para esses pontos críticos.

Embora não tenham sido elaborados gráficos de Pareto para os demais modos de falha como pneumático, ar-condicionado, cabine do operador, báscula e freios, é importante destacar que essa decisão se deu pela menor variedade de componentes associados a esses modos. Ainda assim, a análise desses casos pontuais continua sendo relevante, uma vez que falhas recorrentes, mesmo concentradas em poucos itens, podem indicar lacunas específicas nos procedimentos preventivos ou até comportamentos operacionais inadequados.

No caso das falhas pneumáticas, os registros se concentram em vazamentos de ar na válvula APS, válvula relé e nos freios de serviço, o que sugere a necessidade de reforçar inspeções de estanqueidade e funcionamento das válvulas. No ar-condicionado, os principais problemas envolvem falhas no compressor e a necessidade de recarga de gás, apontando para possíveis vazamentos ou desgaste prematuro.

As falhas relacionadas à báscula envolvem inclinômetro, sirene e sensor de báscula, componentes críticos para a segurança das operações de descarregamento. Já na cabine do operador, as ocorrências se concentram no acionamento do banco, muitas vezes ligadas ao mau uso pelos próprios condutores. Por fim, no sistema de freios, destacam-se os freios de serviço e as catracas de freio, que exigem atenção redobrada pela sua importância na segurança veicular. Esses dados reforçam a necessidade de ações pontuais e preventivas, mesmo em modos de falha com menor representatividade estatística.

O último passo da fase medir é o cálculo do nível sigma do processo, a fim de avaliar o quão efetivas têm sido as manutenções preventivas em relação à meta previamente estabelecida para o indicador PFPP. Esse cálculo fornece uma medida quantitativa da performance atual do processo, permitindo compreender o volume de falhas que ocorrem abaixo do patamar desejado e servindo como referência para as próximas etapas do projeto de melhoria contínua.

Com base nos dados do indicador PFPP por semana da frota GX00, e considerando como defeito todo valor abaixo da meta de 70,66 horas, foi identificado um total de 27

observações, das quais 20 estão abaixo da meta, resultando em 740.741 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO).

Para calcular o nível sigma correspondente, utilizou-se a Tabela de Nível Sigma (Figura 10), que relaciona o DPMO com o rendimento do processo em termos de desvio padrão. Nesse caso, adotou-se a regra de três inversamente proporcional, onde 344.000 DPMO correspondem a um nível sigma de 1,9.

Aplicando essa proporção, o nível sigma estimado para o processo é de aproximadamente 0,88, o que revela um desempenho muito aquém do desejado em relação ao objetivo de aumentar o PFPP. Esse resultado reforça a urgência de intervenções sistemáticas e bem direcionadas.

Com a construção da árvore de estratificação, a elaboração dos gráficos de Pareto e o cálculo do nível sigma, conclui-se a fase medir, que teve como objetivo quantificar e compreender as principais falhas que ocorrem após a manutenção preventiva. Esses dados serviram de base para identificar os pontos mais críticos do processo e orientar a priorização das análises. A partir disso, inicia-se a fase de Análise, voltada à investigação das causas-raiz das falhas mais relevantes, buscando entender por que elas continuam ocorrendo mesmo após as ações preventivas.

4.6 Analisar

Para iniciar a fase Analisar do ciclo DMAIC, foi elaborado o Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 55, com o objetivo de investigar as possíveis causas da parada precoce dos caminhões GX00 após a realização da manutenção preventiva. Esta etapa é fundamental pois permite direcionar ações de forma mais precisa e efetiva.



Figura 55 - Diagrama de Ishikawa para a parada precoce dos caminhões após manutenção preventiva.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

O levantamento das causas representado na Figura 55 foi realizado com base nos dados obtidos na fase anterior do projeto e contou com a participação de profissionais da área, como engenheiros, inspetores e analistas. As análises dos modos de falha mais recorrentes, bem como a investigação de seus respectivos componentes, orientaram a estruturação do diagrama em torno dos seis grandes grupos de causas (6M): Mão de Obra, Método, Máquina, Material, Meio Ambiente e Medição.

No eixo Mão de Obra, foram incluídas causas relacionadas à execução direta das manutenções, como inspeções superficiais, baixa experiência e alta rotatividade de funcionários, e a ausência de revisão dos treinamentos. Também se destacou o manuseio inadequado de sensores e conectores, fator diretamente associado às falhas elétricas e nos sistemas de controle, além da aplicação incorreta de torque em fixações, que pode gerar afrouxamentos e vazamentos precoces.

Em Máquina, listaram-se falhas associadas aos próprios componentes e sistemas dos caminhões. Foram destacados sensores frágeis ou mal posicionados, falhas recorrentes em componentes elétricos, vazamentos crônicos em válvulas e conexões, falhas estruturais em itens como aro de roda e estojo, baixa eficiência do ar-condicionado (associada a filtros saturados), e paradas recorrentes para complemento de fluidos como óleo e líquido de arrefecimento, revelando falhas no controle de consumo ou vedação.

No grupo Método, concentram-se falhas ligadas aos processos e padrões adotados. Foram identificados planos de manutenção incompletos, frequência incorreta das atividades, checklists de inspeção ineficientes, baixa visibilidade nas inspeções visuais e a ausência de uma sistematização para análise de falhas repetitivas. Esses fatores indicam que, mesmo quando a manutenção é realizada, ela pode não abranger os pontos críticos de forma eficaz.

O eixo Material aborda problemas com insumos e ferramentas. Foram apontados os atrasos nas entregas, controle ineficaz de estoque, uso de peças e vedações de baixa qualidade, falta de ferramentas específicas para determinadas manutenções (como torquímetros), reaproveitamento de gás do ar-condicionado e utilização de lubrificantes incompatíveis, o que pode comprometer a durabilidade e o desempenho dos sistemas.

Em Meio Ambiente, foram consideradas as condições externas que impactam diretamente os componentes dos caminhões. Destacam-se as vibrações excessivas causadas por terreno irregular, altos índices de umidade, exposição constante à poeira (especialmente crítica para filtros e conexões) e a sobrecarga dos caminhões, que acelera o desgaste estrutural e compromete a eficácia da manutenção.

Por fim, o grupo Medição reúne causas relacionadas à ausência de controle e acompanhamento sistemático. A falta de relatórios semanais do PFPP, a não realização de reuniões periódicas para discussão dos indicadores, a inexistência de coleta e análise de dados, instrumento de medição de tempo de operação descalibrado e o preenchimento inadequado dos históricos de manutenção dificultam a identificação de padrões e a antecipação de falhas, perpetuando os mesmos problemas ao longo do tempo.

Com base no conjunto de causas identificadas no Diagrama de Ishikawa, cada uma delas foi avaliada por meio de uma matriz de priorização, com o objetivo de identificar aquelas que merecem atenção imediata na fase de análise aprofundada. Nessa matriz, representada na Tabela 4, utilizou-se os critérios de impacto no problema (peso 10), custos de eliminação (peso 8), facilidade de eliminação (peso 7) e frequência de ocorrência (peso 5). A pontuação ponderada permitiu hierarquizar as causas de acordo com sua criticidade, de forma objetiva. As causas mais bem ranqueadas são analisadas com maior profundidade utilizando a técnica dos Porquês, buscando compreender suas origens fundamentais.

Tabela 4 - Matriz de priorização das causas levantadas no diagrama de Ishikawa.

CAUSAS LEVANTADAS	Critérios de Priorização				Total
	Impacto no problema	Custos de Eliminação	Facilidade de Eliminação	Frequência de Ocorrência	
Peso do Critério	10	8	7	5	
Não realização de relatórios semanais do PFPP;	10	10	10	10	300
Não realização de reuniões periódicas para discussão do indicador;	10	10	10	10	300
Inexistência de Coleta e Análise de dados;	10	10	10	10	300
Registro inadequado de dados de manutenção;	10	10	10	10	300
Periodicidade de revisão dos treinamentos;	10	10	10	7	285
Vazamentos crônicos;	10	8	8	10	270
Não sistematização de análises de falhas repetitivas;	10	8	10	7	269
Planos de manutenção incompletos;	10	9	8	8	268
Aplicação incorreta de torque em fixações;	10	6	10	10	268
Baixa visibilidade nas inspeções visuais;	10	6	10	10	268
Paradas para complemento de fluidos;	10	7	7	10	255
Falhas recorrentes em componentes elétricos;	10	5	5	10	225
Falhas estruturais;	10	5	5	10	225
Atrasos nas entregas dos materiais;	10	5	5	10	225
Ar condicionado ineficiente;	8	8	7	6	223
Controle Ineficaz de Estoque;	8	5	7	10	219
Frequência incorreta das atividades de manutenção;	10	5	5	7	210
Baixa experiência e alta rotatividade de funcionários;	8	5	5	10	205
Vedação e componentes de baixa qualidade;	10	3	3	10	195
Sobrecarga dos caminhões;	8	5	5	6	185
Uso de lubrificantes de baixa qualidade ou incompatíveis;	8	5	5	6	185
Falta de ferramentas específicas para a manutenção;	7	5	5	7	180
Manuseio inadequado de sensores e conectores;	5	8	5	5	174
Reaproveitamento de gás de ar condicionado;	6	5	5	6	165
Sensores frágeis ou mal posicionados;	8	2	2	10	160
Checklists de inspeção ineficientes;	1	10	10	0	160
Vibrações excessivas no terreno;	10	0	0	10	150
Altos índices de umidade;	10	0	0	10	150
Exposição constante à poeira;	10	0	0	10	150
Instrumento de medição de tempo de operação descalibrado;	5	5	5	0	125
Inspecões superficiais;	3	10	0	0	110

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Na matriz de priorização observada na Tabela 4, para cada critério, foi atribuída uma nota entre 0 e 10, com base no conhecimento empírico sobre o processo, dados coletados nos paretos anteriores e discussões com especialistas da área. O impacto no problema, por exemplo, foi atribuído com base na relação direta entre a causa e a parada precoce dos caminhões. Já os custos e a facilidade de eliminação foram avaliados conforme a complexidade ou simplicidade esperada para resolver cada causa. A frequência foi definida observando os modos de falha mais recorrentes, conforme os gráficos de Pareto analisados anteriormente. A multiplicação de cada nota pelo respectivo peso resultou em uma pontuação total que permite classificar as causas conforme sua criticidade.

Para reforçar a seleção das causas prioritárias, foi construído um *boxplot* de pontuação, apresentado na Figura 56. Esse gráfico estatístico permite visualizar a distribuição das

pontuações atribuídas às causas levantadas, facilitando a identificação de quais delas se destacam em termos de criticidade. A principal referência utilizada para a definição das causas prioritárias foi o terceiro quartil, indicado no gráfico com uma linha tracejada vermelha. Dessa forma, considera-se que todas as causas com pontuação igual ou superior a esse valor representam as ocorrências a serem tratadas de forma aprofundada na próxima etapa do projeto.

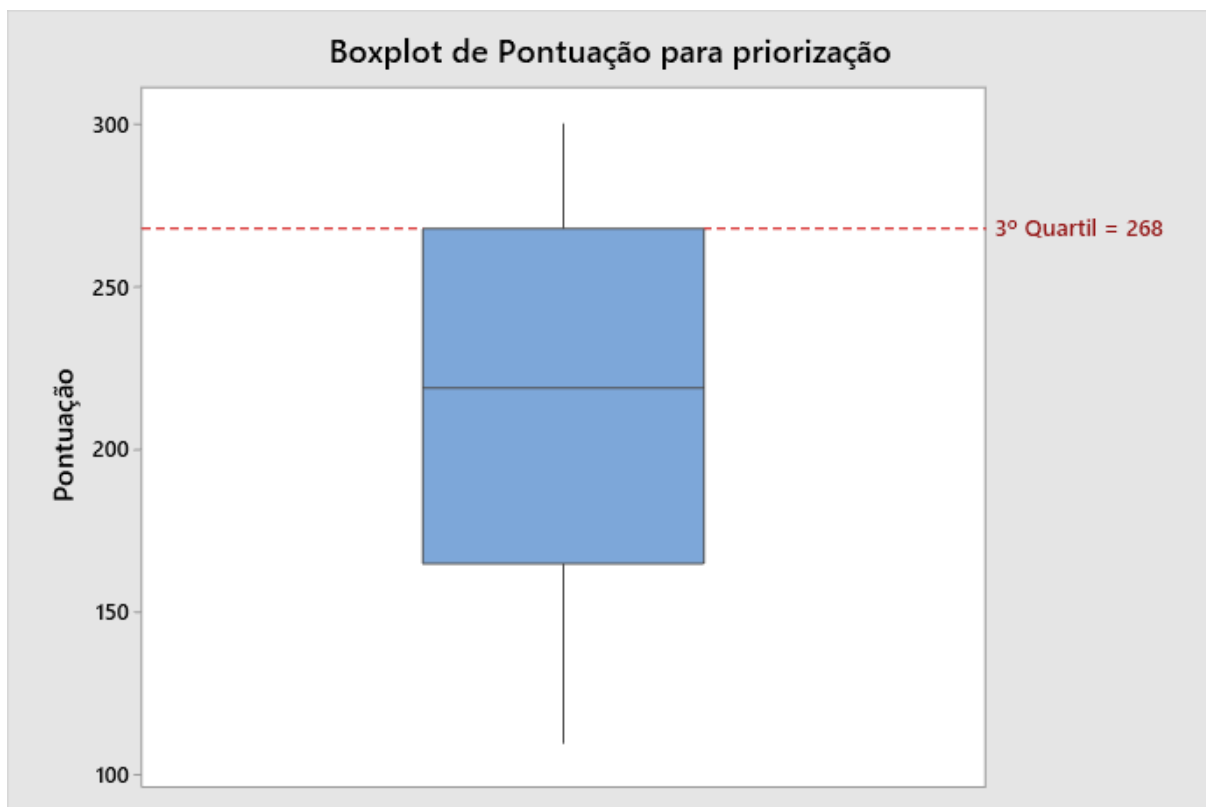


Figura 56 - Boxplot de pontuação da matriz de priorização.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Com base na análise do *boxplot* da Figura 56, o valor correspondente ao terceiro quartil foi de 268 pontos. Assim, foram priorizadas para análise aprofundada todas as causas cuja pontuação foi igual ou superior a 268, a saber:

- Não realização de relatórios semanais do PFPP;
- Não realização de reuniões periódicas para discussão do indicador;
- Inexistência de coleta e análise de dados;
- Registro inadequado de dados de manutenção;
- Periodicidade de revisão dos treinamentos;
- Vazamentos crônicos;

- Não sistematização de análises de falhas repetitivas;
- Planos de manutenção incompletos;
- Aplicação incorreta de torque em fixações;
- Baixa visibilidade nas inspeções visuais;

Essas causas serão agora submetidas à técnica dos “Porquês”, conforme previsto na metodologia DMAIC, para aprofundamento da análise e identificação das causas raiz que deverão ser tratadas na fase de melhoria.

1. Não realização de relatórios semanais do PFPP

- Por que os relatórios semanais do PFPP não são feitos?
- Porque não há um responsável definido para essa tarefa e nem quais informações devem conter.
- **Causa raiz:** não definição de colaborador para realizar os relatórios do PFPP e quais informações devem conter.

2. Não realização de reuniões periódicas para discussão do indicador

- Por que não estão ocorrendo reuniões para discutir o indicador?
- Porque não há nenhuma agenda ou planejamento definido para isso.
- Por que não há planejamento?
- Porque nunca foram definidos os participantes e a periodicidade dessas reuniões.
- **Causa raiz:** não definição de participantes e periodicidade da reunião de PFPP.

3. Inexistência de Coleta e Análise de dados

- Por que não existe a coleta e análise estruturada de dados?
- Porque ninguém é designado para fazer isso regularmente.
- Por que ninguém é designado?
- Porque essa atividade não é obrigatória nem faz parte de nenhuma rotina oficial.
- **Causa raiz:** falta de colaborador e de obrigatoriedade para realizar essa análise.

4. Registro inadequado de dados de manutenção

- Por que os dados de manutenção são registrados de forma incompleta ou errada?
- Porque cada colaborador lança de uma forma diferente, sem um modelo padrão.

- Por que não há um modelo padrão?
- Porque nunca foi definida uma padronização para os diferentes tipos de manutenção.
- **Causa raiz:** falta de padronização do lançamento dos dados de manutenção para cada um dos possíveis casos.

5. Periodicidade de revisão dos treinamentos

- Por que os treinamentos não são revisados periodicamente?
- Porque os colaboradores passam por reciclagem apenas após longos intervalos de tempo.
- Por que o intervalo entre os treinamentos é tão longo?
- Porque não há obrigação formal de reciclagem periódica.
- Porque o tempo definido para a reciclagem é de até 2 anos.
- **Causa raiz:** Período de intervalo entre os treinamentos muito longo.

6. Vazamentos crônicos

- Por que os vazamentos continuam mesmo após manutenções preventivas?
- Porque os testes de estanqueidade realizados são ineficazes.
- Por que os testes são ineficazes?
- Porque não passam por revisão há muito tempo.
- **Causa raiz:** não revisão dos testes de estanqueidade há muito tempo.

7. Não sistematização de análises de falhas repetitivas

- Por que as falhas recorrentes não são analisadas?
- Porque a engenharia não executa essa atividade de forma contínua.
- Por que a engenharia não realiza isso de forma contínua?
- Porque atua de forma reativa, apenas quando há falhas graves.
- Por que a engenharia atua apenas quando há falhas graves?
- Porque não há obrigatoriedade de análises de falhas recorrentes.
- **Causa raiz:** não obrigatoriedade de análises de falha recorrentes pela engenharia.

8. Planos de manutenção incompletos

- Por que os planos estão incompletos?

- Porque não abrangem os principais modos de falha atuais.
- Por que não abrangem?
- Porque os planos não são revisados há muito tempo.
- **Causa raiz:** planos não são revisados a muito tempo.

9. Aplicação incorreta de torque em fixações

- Por que o torque é aplicado de forma incorreta?
- Porque os torquímetros disponíveis são imprecisos ou inexistem.
- Por que não há torquímetros de qualidade?
- Porque não foram adquiridos devido a custos ou falta de priorização.
- **Causa raiz:** ausência de torquímetros de alta precisão.

10. Baixa visibilidade nas inspeções visuais

- Por que as inspeções visuais não detectam problemas?
- Porque os inspetores não conseguem enxergar bem os pontos críticos.
- Por que não conseguem enxergar bem?
- Porque as lanternas utilizadas são fracas e inadequadas.
- Por que estão utilizando lanternas inadequadas?
- Porque as lanternas antigas queimaram e foram substituídas por modelos de baixa qualidade.
- **Causa raiz:** ausência de lanternas adequadas para realizar inspeção.

Com base na técnica dos Porquês aplicada às causas priorizadas, foram identificadas as seguintes causas raízes: (1) ausência de definição de colaborador e escopo para os relatórios do PFPP; (2) inexistência de definição de participantes e periodicidade para reuniões de acompanhamento do indicador; (3) falta de designação e obrigatoriedade formal para coleta e análise de dados; (4) ausência de padronização no lançamento dos dados de manutenção; (5) período de intervalo entre os treinamentos muito longo; (6) não revisão dos testes de estanqueidade; (7) falta de obrigatoriedade para análise de falhas recorrentes pela engenharia; (8) não atualização dos planos de manutenção; (9) ausência de torquímetros de alta precisão; e (10) uso de lanternas inadequadas nas inspeções visuais.

Com a identificação dessas causas fundamentais, encerra-se a fase Analisar do estudo. Na fase melhorar, serão propostas ações direcionadas à eliminação ou mitigação dessas

causas, com o objetivo de aumentar a confiabilidade da manutenção preventiva e, consequentemente, o tempo até a primeira falha após manutenção preventiva (PFPP) dos caminhões da frota GX00.

4.7 Melhorar

Com base nas causas raízes identificadas na fase analisar, foram definidas, em conjunto com o time de manutenção, ações específicas voltadas à eliminação ou mitigação dos problemas que impactam negativamente o desempenho do indicador PFPP. Essas ações foram pensadas de forma prática e viável, respeitando a realidade operacional da área, e servem de base para o desenvolvimento de planos de ação no formato 5W2H.

Para a causa relacionada à ausência de definição de colaborador e escopo para os relatórios do PFPP, propõe-se a designação formal de um responsável, bem como a padronização do conteúdo mínimo que deve constar nesses relatórios. No que diz respeito à falta de periodicidade e definição de participantes das reuniões de acompanhamento do indicador, recomenda-se a implementação de um calendário semanal fixo, com presença obrigatória de profissionais-chave e ata padronizada.

Com o objetivo de solucionar a falta de designação para coleta e análise de dados de falhas, estabelece-se a designação formal de quem deve realizar a coleta e análise dos dados relacionados aos modos de falha. Para sanar a ausência de padronização no lançamento das informações de manutenção, considera-se o desenvolvimento de um manual de instruções contendo orientações claras e detalhadas sobre o preenchimento correto dos dados nos sistemas utilizados, de acordo com o tipo de falha, sistema ou componente envolvido.

Em relação ao intervalo excessivo entre os treinamentos técnicos, propõe-se a revisão do plano de capacitação contínua, com a redução do tempo de reciclagem para determinados treinamentos essenciais, a partir de uma análise crítica da necessidade de atualização dos conteúdos. No caso da não revisão dos testes de estanqueidade, prevê-se a atualização dos procedimentos com base nos modos de falha mais recentes observados na frota.

Para resolver a ausência de obrigatoriedade na análise de falhas reincidentes pela engenharia, sugere-se a formalização da necessidade de investigação técnica sempre que ocorrer repetição de falhas, com a responsabilidade atribuída à equipe de engenharia. Quanto à defasagem dos planos de manutenção, indica-se a realização de uma revisão técnica, com

base em dados históricos e atuais de manutenção, a fim de adequá-los às novas necessidades da frota.

Além disso, para mitigar a ausência de ferramentas adequadas, preveem-se duas ações complementares: uma pesquisa de mercado e aquisição de torquímetros digitais de alta precisão, com o objetivo de garantir a confiabilidade dos apertos, e uma padronização de lanternas de alto desempenho, seguida da distribuição dos equipamentos às equipes responsáveis pelas inspeções visuais.

Todas essas ações encontram-se desdobradas em planos 5W2H, conforme representado na Tabela 5.

Tabela 5 - Plano de ação 5W2H.

5W					2H		Status
O quê? (What?)	Por quê? (Why)	Onde? (Where?)	Quem? (Who?)	Quando? (When?)	Como? (How?)	Quanto custa? (How Much?)	
Designação de um responsável pela realização dos relatórios de PFPP e definição do conteúdo dos relatórios	Porque não há colaborador responsável nem escopo definido, o que compromete a regularidade, padronização e utilidade dos relatórios do PFPP.	E-mail corporativo	Coordenador de manutenção	Rotina	Definição via e-mail formal com escopo mínimo do relatório anexado	R\$ 0,00	Pendente
Implementação de reunião semanal de acompanhamento do indicador e definição dos participantes	Porque não há definição clara de quem participa nem frequência das reuniões, dificultando o acompanhamento contínuo do indicador.	Teams	Líder do projeto	Rotina	Agendamento fixo de reuniões no Teams com pauta e ata padronizadas	R\$ 0,00	Pendente
Designação formal de quem deve realizar a coleta e análise dos dados relacionados aos modos de falha	Porque não há responsável estabelecido, o que gera falhas na coleta e ausência de análise sistemática das informações.	E-mail corporativo	Coordenador de manutenção	Rotina	Atribuição oficial por e-mail com detalhamento das atividades	R\$ 0,00	Pendente
Desenvolvimento de um manual de instruções contendo orientações claras e detalhadas sobre o preenchimento correto dos dados nos sistemas utilizados, de acordo com o tipo de falha, sistema ou componente envolvido	Porque a falta de padrão no preenchimento compromete a confiabilidade dos dados utilizados nas análises de falhas.	Repositório de documentos da área (SharePoint, Gestão do Conhecimento ou pasta de rede)	Engenharia	Fase de melhoria	Elaboração do manual em Word/PowerPoint com base nos erros mais comuns e exemplos práticos	R\$ 0,00	Pendente
Revisão do plano de capacitação contínua, com a redução do tempo de reciclagem para determinados treinamentos essenciais, a partir de uma análise crítica da necessidade de atualização dos conteúdos	Porque o intervalo atual entre reciclagens é excessivo, o que pode tornar os treinamentos defasados frente às necessidades técnicas da equipe e às mudanças nos modos de falha observados.	Plano de treinamentos no sistema de gestão do conhecimento	Engenharia	Fase de melhoria	Avaliação crítica dos conteúdos com base nos dados de falhas e reformulação do calendário de treinamentos	R\$ 0,00	Pendente
Atualização dos procedimentos dos testes de estanqueidade	Porque os procedimentos não condizem com a realidade atual dos modos de falha dos equipamentos, já que não são revisados há muito tempo.	Plano de manutenção	Engenharia	Fase de melhoria	Reavaliação dos procedimentos utilizando dados de falhas para propor ajustes técnicos	R\$ 0,00	Pendente
Estabelecimento de obrigatoriedade para análise de falhas recorrentes pela engenharia	Porque a engenharia não é formalmente responsável por analisar reincidências, o que limita a atuação na causa raiz.	E-mail corporativo	Coordenador de manutenção	Fase de melhoria	Elaboração e envio de diretriz formal via e-mail, com critérios definidos de reincidência	R\$ 0,00	Pendente
Revisão técnica dos planos de manutenção com base nos dados atuais de falhas	Porque os planos estão desatualizados em relação aos modos de falha atuais observados na frota.	SAP (Software de gestão da empresa)	Engenharia e Analistas de frota	Fase de melhoria	Revisão dos planos utilizando histórico de falhas	R\$ 0,00	Pendente
Análise de mercado e aquisição de torquímetros digitais de alta precisão	Porque a falta desses equipamentos compromete a confiabilidade dos apertos e pode gerar falhas mecânicas.	SAP (Software de gestão da empresa)	Engenharia e Aproveitamento	Fase de melhoria	Pesquisa de fornecedores, avaliação técnica dos modelos e abertura de requisição no SAP.	A avaliar	Pendente
Análise de mercado, padronização e fornecimento de lanternas adequadas para inspeções visuais	Porque o uso de lanternas inadequadas prejudica a detecção de falhas durante as inspeções.	SAP (Software de gestão da empresa)	Engenharia e Aproveitamento	Fase de melhoria	Levantamento de modelos disponíveis, definição de especificações mínimas e requisição no SAP.	A avaliar	Pendente

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Tabela 5 apresenta uma proposta de plano de ação estruturada com base na metodologia 5W2H, a fim de atacar diretamente as causas raízes identificadas na fase anterior do projeto. Cada ação proposta visa a corrigir falhas sistêmicas que impactam negativamente a confiabilidade das manutenções preventivas e o indicador PFPP (Primeira Falha Pós-Preventiva).

As ações são descritas com clareza nos campos do 5W2H: “O que será feito”, “Por que será feito”, “Onde será realizado”, “Quem é o responsável”, “Quando se aplica”, “Como será feito” e “Quanto custará”. Apesar de serem propostas de melhoria que não serão implantadas no escopo deste trabalho, elas são estruturadas de maneira realista e aplicável à rotina operacional da área.

A primeira ação propõe que o coordenador de manutenção designe formalmente, via e-mail corporativo, um colaborador para elaborar os relatórios PFPP. Além disso, propõe-se que o escopo mínimo do relatório seja definido, indicando os campos obrigatórios, periodicidade e formato. Essa ação visa dar clareza de responsabilidade e padronização à atividade, assegurando que os dados sejam transformados em informação útil para decisões técnicas.

Em complemento, sugere-se a implementação de uma rotina semanal de reuniões de acompanhamento do indicador, conduzida pelo líder do projeto, com agendamento fixo via *Teams*, pauta definida e ata padronizada. A presença de profissionais-chave é considerada essencial para discutir os resultados do PFPP e definir ações corretivas quando necessário.

Outra ação propõe que o coordenador de manutenção oficialize por e-mail quem será responsável pela coleta e análise dos dados após manutenções preventivas. Atribuir essa responsabilidade formalmente garante que a atividade ocorra de forma sistemática e que as falhas sejam analisadas com base em dados concretos.

Para apoiar a qualidade e a consistência dessas informações, propõe-se também que a engenharia elabore um manual com instruções práticas, exemplos e erros comuns, com foco na correta codificação e preenchimento dos dados em sistemas como o SAP. O manual pode ser disponibilizado no repositório da área (como *SharePoint* ou pasta de rede), facilitando o acesso e a padronização. Essa ação visa melhorar a qualidade dos dados registrados, assegurando sua confiabilidade para análise posterior.

Com relação ao desenvolvimento técnico da equipe, sugere-se que a engenharia, em conjunto com a área de treinamentos, avalie criticamente os cursos técnicos oferecidos, identifique conteúdos desatualizados e proponha uma nova periodicidade de reciclagem. A ideia é manter os colaboradores tecnicamente atualizados, de acordo com os modos de falha mais recorrentes observados.

Além disso, propõe-se que a engenharia revise os testes de estanqueidade atuais, à luz das falhas observadas recentemente, e atualize os procedimentos técnicos de verificação. Essa revisão pode ocorrer durante a fase de melhoria, com suporte nos dados históricos. A intenção é alinhar os testes às reais necessidades da frota e aumentar sua eficácia.

Para fortalecer a atuação técnica da engenharia na eliminação de falhas, propõe-se que o coordenador de manutenção, por meio de e-mail corporativo, formalize uma diretriz que defina a obrigatoriedade da engenharia em investigar tecnicamente falhas recorrentes, estabelecendo critérios de reincidência e prazos para resposta. Essa ação promove a responsabilização técnica e o foco na causa raiz.

Em paralelo, propõe-se que a engenharia e os analistas de frota revisem os planos de manutenção cadastrados no SAP, com base nas falhas recorrentes e nos históricos de intervenção. Essa atualização visa tornar as manutenções preventivas mais eficazes, ajustando os planos à realidade atual dos equipamentos.

Algumas ações propostas envolvem aquisição de recursos. A primeira delas refere-se à análise de mercado e aquisição de torquímetros digitais de alta precisão, cuja ausência compromete a confiabilidade dos apertos e pode gerar falhas mecânicas. Recomenda-se que engenharia e aprovisionamento realizem uma avaliação técnica dos modelos disponíveis e abram requisição no SAP para aquisição do modelo mais adequado.

Da mesma forma, propõe-se a padronização e fornecimento de lanternas apropriadas para inspeções visuais. Considerando que o uso de lanternas inadequadas dificulta a detecção de falhas em campo, a engenharia deve definir os critérios mínimos de qualidade (potência, autonomia, robustez) e solicitar ao setor de aprovisionamento a cotação e aquisição das unidades conforme especificação.

Todas essas ações estão atualmente com status “Pendente”, visto que não foram executadas dentro do escopo deste trabalho. No entanto, recomenda-se que, caso sejam

adotadas futuramente, o status seja atualizado conforme o progresso de cada plano de ação, permitindo o acompanhamento estruturado das melhorias e consolidando a metodologia de melhoria contínua no processo de manutenção preventiva.

Com a definição do plano de ação, encerra-se a fase de Melhoria do ciclo DMAIC. A partir deste ponto, inicia-se a fase de Controle, na qual serão propostas estratégias para o acompanhamento contínuo do indicador PFPP, assegurando a estabilidade do processo e a não reincidência das falhas tratadas. Ainda que as ações delineadas não sejam implementadas no escopo deste trabalho, será elaborado um plano de sustentabilidade com foco em rotinas de acompanhamento e práticas de padronização, de forma a garantir que os resultados obtidos — caso o plano de ação venha a ser executado — sejam mantidos ao longo do tempo e incorporados à cultura operacional da área de manutenção.

4.8 Controlar

Com o encerramento da fase de melhoria, inicia-se a fase de controle, etapa final do ciclo DMAIC, que tem como objetivo assegurar que os resultados alcançados sejam mantidos ao longo do tempo e que as soluções implementadas não percam sua eficácia com o passar das semanas. Para isso, são propostas ações de sustentabilidade e ferramentas de monitoramento que permitem o acompanhamento contínuo do desempenho do indicador PFPP, garantindo estabilidade ao processo e promovendo a cultura de melhoria contínua na área de manutenção.

As ações de sustentabilidade estão sistematizadas na Tabela 6, onde são apresentadas rotinas essenciais para a preservação dos ganhos esperados com a implementação das propostas desenvolvidas ao longo deste projeto. Essas ações foram pensadas para serem incorporadas no dia a dia da equipe de manutenção, de forma prática e objetiva, sem necessidade de grandes recursos adicionais.

Tabela 6 - Plano de sustentabilidade do projeto.

AÇÕES	RESPONSÁVEL	PRAZO	STATUS
RELATÓRIO SEMANAL DE PFPP	DESIGNADO PELO COORDENADOR DE MANUTENÇÃO	SEMANALMENTE	ROTINA
REUNIÃO SEMANAL DO INDICADOR PARA CONTROLE E DEFINIÇÃO DE NOVAS AÇÕES	EQUIPE DE MANUTENÇÃO PLANEJAMENTO ENGENHARIA	SEMANALMENTE	ROTINA
REVISÃO PERIÓDICA DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO	ENGENHARIA ANALISTAS DE FROTA	ANUALMENTE	ROTINA

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Tabela 6 apresenta três ações principais de rotina. A primeira é a elaboração do relatório semanal de PFPP, que deve ser conduzido pelo colaborador designado pelo coordenador de manutenção. Esse relatório consolida as informações de falhas pós-preventivas e permite a identificação de desvios, tendências ou reincidências que merecem atenção.

A segunda ação consiste na realização de reuniões semanais entre as equipes de manutenção, planejamento e engenharia, com o objetivo de analisar os resultados do indicador, propor correções pontuais e discutir ações preventivas para os casos identificados no relatório. Essa prática promove a integração entre os setores e contribui diretamente para o alinhamento técnico e estratégico das decisões.

A terceira ação diz respeito à revisão periódica dos planos de manutenção, que deve ser realizada anualmente pela engenharia e pelos analistas de frota. Essa revisão garante que os planos estejam sempre coerentes com os modos de falha mais atuais e relevantes, promovendo a efetividade da manutenção preventiva e reduzindo a reincidência de falhas.

Além das ações operacionais de sustentabilidade, o controle estatístico do indicador PFPP também deve ser mantido por meio da atualização semanal da carta de controle apresentada na Figura 46, durante a fase de definição. Essa carta permite monitorar a estabilidade do processo e verificar, de forma visual e quantitativa, se a meta de 70,66 horas está sendo atingida. A análise dessa carta ao longo do tempo permite identificar eventuais variações fora de controle e investigar suas causas com agilidade.

Adicionalmente, recomenda-se a realização mensal do cálculo do nível sigma do processo, como realizado na fase de medição. Esse indicador fornece uma medida estatística da capacidade do processo de atender à meta definida, permitindo comparações temporais, avaliações de desempenho e suporte à tomada de decisões gerenciais. Quanto mais elevado o nível sigma, menor a frequência de falhas e maior a confiabilidade da manutenção preventiva. Assim, o acompanhamento sistemático do nível sigma contribui diretamente para a melhoria contínua do indicador e para a maturidade do processo.

Com a definição das ações de sustentabilidade e a proposição dos métodos de controle estatístico do indicador, conclui-se a fase de controle, encerrando formalmente todas as etapas do projeto de melhoria conduzido com base na metodologia DMAIC. O conjunto de análises, propostas e ferramentas aqui desenvolvidas oferece uma base sólida para o aprimoramento da confiabilidade da manutenção preventiva da frota analisada, com potencial de replicação para outras áreas da empresa.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo aplicar a metodologia DMAIC para analisar as causas de falhas e propor soluções que contribuam para o aumento da performance após a manutenção preventiva de caminhões basculantes GX00 8x4 utilizados na mineração. Nesse sentido, buscou-se responder à seguinte questão: **“Como aplicar a ferramenta DMAIC para a manutenção preventiva de caminhões basculantes de tração 8x4 em uma empresa de mineração?”**

A pesquisa foi desenvolvida a partir de dados coletados entre dezembro de 2023 e maio de 2024, envolvendo registros históricos de falhas, relatórios de manutenção e análises de desempenho operacional. Esse levantamento foi essencial para fundamentar o diagnóstico das principais causas que impactavam negativamente o tempo até a primeira falha, além de orientar o estudo ao longo das etapas da metodologia DMAIC.

Por meio da aplicação estruturada das fases definir, medir, analisar, melhorar e controlar, foram identificados os pontos críticos no processo de manutenção preventiva e elaboradas ações direcionadas à mitigação das causas raízes encontradas. Dentre as propostas destacam-se o aprimoramento dos planos de manutenção, a revisão dos procedimentos operacionais e o reforço no treinamento das equipes envolvidas, com o intuito de prolongar o tempo até a primeira falha após a manutenção preventiva.

Conclui-se, portanto, que o estudo alcançou seus objetivos ao aplicar a metodologia DMAIC de forma completa. Na fase definir, foi elaborado o mapa SIPOC, a definição da meta por meio do boxplot e o contrato de projeto com escopo de atuação. Na fase medir, ocorreu a estratificação dos modos de falha e componentes, além do cálculo do nível sigma do processo. Na fase analisar, as causas potenciais foram identificadas pelo diagrama de causa e efeito e priorizadas pela matriz de priorização, sendo aprofundadas pelo método dos Porquês. Na fase melhorar, foram estruturadas ações corretivas voltadas às causas raízes identificadas. Por fim, na fase controlar, foi elaborado um plano de sustentabilidade e definido o monitoramento contínuo do indicador PFPP. Assim, a metodologia não apenas permitiu diagnosticar as falhas, mas também estruturou um conjunto de soluções, oferecendo um

caminho estruturado para futuras implementações e acompanhamento contínuo dos resultados.

5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado recomendam-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar um estudo para aplicação prática das ações propostas, acompanhando os resultados no indicador;
- Conduzir uma análise de viabilidade econômica para mensurar o retorno financeiro das soluções sugeridas;
- Investigar o comportamento dos principais componentes críticos dos caminhões GX00, a partir do plano de manutenção revisado, visando aprimorar ainda mais a confiabilidade do equipamento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALMEIDA, P. **Manutenção mecânica industrial: conceitos básicos e tecnologia aplicada**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BRENIG-JONES M.; DOWDALL J. **Lean Six Sigma para leigos**. 1. ed. Rio de Janeiro: ALTA BOOKS, 2023.
- CARVALHO, M. et al. **GESTÃO DA QUALIDADE: Teoria e Casos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ECKES G. **A Revolução Seis Sigma: o método que levou a GE e outras empresas a transformar processos em lucros**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2001. (7ª reimpressão)
- FERREIRA, R. G. C.; MIRANDA, Leandro B. A.; PINTO, R. A.; et al. **Preparação e Análise Exploratória de Dados**. Porto Alegre: SAGAH, 2021.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.
- GIL A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- GIL A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2024.
- GREGÓRIO G.; SILVEIRA A. **Manutenção Industrial**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- KARDEC A.; NASCIF J. **Manutenção: Função Estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LOZADA G.; NUNES K. S. **Metodologia Científica**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- MARCONI M. A.; LAKATOS E. M. **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- MELÔNIO E. P. M. **Ferramenta 5w2h: a importância do plano de ação para tomadas de decisão no empreendedorismo**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Educação Profissional e Tecnológica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cabedelo, 2023.
- MONTGOMERY D. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009

PANDE, P.; NEUMAN R.; CAVANAGH R. **Estratégia Seis Sigma**: como a GE a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2001.

SELEME, R. **Manutenção Industrial**: mantendo a fábrica em funcionamento. 1. ed. Curitiba: InterSaberes, 2015.

VIANA H. **MANUAL DE GESTÃO DA MANUTENÇÃO**. 1. ed. Brasília: ENGETELES Editora, 2020.

VIANA H. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

WERKEMA, C. **Criando a Cultura Lean Seis Sigma**. 3. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2024.

WERKEMA C. **Ferramentas estatísticas básicas do Lean Seis Sigma Integradas**.

WERKEMA, C. **Métodos PDCA e DMAIC e Suas Ferramentas Analíticas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021.

XAVIER L. **Técnicas de manutenção preditiva, vol. 1**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1989.

XENOS, H. **Gerenciando a manutenção produtiva**: O caminho para Eliminar Falhas nos Equipamentos e Aumentar a Produtividade. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.