

JOÃO VITOR MAGRE CARVALHO

**IMPLEMENTAÇÃO DO DIAGRAMA DE PERFIL DE PERDAS (PARETO)
NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO AUTOMOTIVA FLORESTAL**

Ilha Solteira - SP

Fevereiro de 2026

JOÃO VITOR MAGRE CARVALHO

**IMPLEMENTAÇÃO DO DIAGRAMA DE PERFIL DE PERDAS (PARETO)
NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO AUTOMOTIVA FLORESTAL**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia - UNESP –
Campus de Ilha Solteira, para cumprimento
de requisito para obtenção do Grau de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Menezes

Ilha Solteira - SP

Fevereiro de 2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

C331i Carvalho, João Vitor Magre.
Implementação do diagrama de perfil de perdas (Pareto) na gestão da
manutenção automotiva florestal / João Vitor Magre Carvalho. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2026
56 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2026

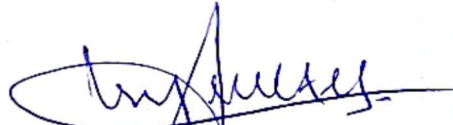
Orientador: Miguel Ângelo Menezes
Inclui bibliografia

1. Engenharia de manutenção. 2. Diagrama de Pareto. 3. Gestão de frotas. 4.
Taxonomia de falhas. 5. Silvicultura.

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos 03 dias do mês de Março do ano de dois mil e vinte e seis, as 18h30min, por videoconferência, no Departamento de Engenharia Mecânica, do Campus da UNESP, da Faculdade de Ilha Solteira, o discente **João Vitor Magre Carvalho**, matriculada sob o número 201051338, tendo como banca examinadora, o orientador Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes, o Engenheiro Mecânico José Rodolfo Silva de Queiroz (BP Bunge) e o Engenheiro Mecânico Matheus de Oliveira Camacho (*Silver Manutenção Industrial*), apresentou o Trabalho de Graduação intitulado: "*Implementação do Diagrama de Perfil de Perdas (PARETO) na Gestão da Manutenção Automotiva Florestal*", obtendo o CONCEITO Aprovado e NOTA FINAL: (10,0) Dez.

Por ser verdade, os membros da banca examinadora e o discente assinam em seguida.



Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes (Orientador)



Eng. Mec. José Rodolfo Silva de Queiroz (BP Bunge)



Eng. Mec. Matheus de Oliveira Camacho (*Silver Man. Ind.*)

g v.b

Documento assinado digitalmente
JOÃO VITOR MAGRE CARVALHO
Data: 01/03/2026 18:21:33 0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

João Vitor Magre Carvalho (Discente)

À Deus, à minha noiva, meus pais,
minha irmã, minha família e meus amigos
de infância bem como os formados ao
longo da graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, e por guiar cada passo meu durante todas as etapas da minha vida.

A minha noiva Giovana Lobato de Siqueira, minha companheira de vida, por ser o motivo pelo qual me dedico para ser o melhor que posso todos os dias. Exemplo de dedicação e superação, obrigado pelo cuidado e incentivo diário desde o momento que te conheci.

Aos meus pais, Douglas de Oliveira Marcusso e Marlene Magre Marcusso por toda a dedicação e carinho na minha formação tanto acadêmica quanto como homem, sendo exemplo de família a qual me baseio para construir a minha. Muito obrigado por muitas vezes abdicarem de objetivos e desejos pessoais para que eu e minha irmã tivéssemos o melhor. Confúcio sintetiza o que aprendo com vocês na frase “A palavra convence, mas o exemplo arrasta”.

A minha irmã, Leticia Magre Marcusso pelo apoio e parceria desde a infância, e principalmente por ter cuidado dos nossos pais desde que sai de casa.

A minha família pelo incentivo, carinho e cuidado comigo desde a infância.

Aos meus amigos de longa data de Valentim Gentil – SP que apesar da distância e da menor frequência de encontros desde o início da graduação, nunca deixaram de estar ao meu lado.

Agradeço aos amigos especiais que fiz durante a graduação. Sem partilhar dos desafios e sentimentos vividos durante o curso não teria motivação para seguir e suportar o processo. Um abraço aos amigos da turma de ingresso 2020/1 que mesmo durante o período EAD durante a covid não deixaram de trocar conhecimento e vivências.

Agradeço a equipe TEC ILHA Baja e aos companheiros do time pela oportunidade de aplicar os conceitos de engenharia, a vivência do trabalho em equipe e os desafios que enfrentamos forjaram o profissional que estou me tornando.

Aos amigos que se tornaram irmãos da Republica Cafarnaum, meu lar durante os anos de graduação que estive em Ilha Solteira. A vivência nessa família me capacitou em competências muito além das abordadas na graduação.

Finalmente agradeço a todos os docentes e colaboradores da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP FEIS, pela dedicação e entrega para formar

profissionais com competências que vão muito além das abordadas no plano pedagógico do curso.

Menciono em especial meu mentor, Prof. Dr. Miguel Ângelo Menezes, educador e companheiro, não só pela orientação no presente trabalho, mas também pelo trabalho como docente e orientador da equipe TEC Ilha Baja. Sua dedicação é fundamental tanto na formação técnica quanto na formação pessoal e profissional dos engenheiros passam pela sua trajetória.

RESUMO

A silvicultura moderna demanda alta disponibilidade física de ativos móveis para garantir a produtividade nas operações florestais. No entanto, a elevada complexidade da frota e a falta de padronização nos apontamentos geram inconsistências no histórico, impossibilitando a identificação precisa das causas raízes da indisponibilidade. O presente trabalho de graduação tem como objetivo a implementação sistêmica do diagrama de perfil de perdas (Pareto) na gestão da manutenção automotiva de uma empresa de plantio de eucalipto. A metodologia se baseou no desenvolvimento de uma taxonomia técnica fundamentada na norma ABNT NBR ISO 14224, estruturando os equipamentos em classes mecânicas, sistemas veiculares e itens manuteníveis. Utilizando a classe de tratores como modelo prático, procedeu-se tratamento de seis meses de dados de manutenção corretiva (julho a dezembro de 2025) por meio da elaboração de painéis gerenciais interativos em *Business Intelligence (Power BI)*. Os resultados quantitativos comprovaram a aplicabilidade empírica do princípio de Pareto no setor, evidenciando que 79,24% das horas paradas da frota se concentraram em apenas seis sistemas vitais. O Sistema Hidráulico despontou como o mais crítico, representando 27,61% das perdas totais de disponibilidade, sendo fortemente impactado pelo rompimento de mangueiras e desgaste de engates devido a severidade do ambiente no campo. Concluiu-se que a padronização taxonômica atrelada a estratificação estatística fornece a inteligência analítica necessária para que a engenharia direcione recursos de forma otimizada, embasando planos de ação corretivos e preventivos focados nos componentes críticos, reduzindo custos e aumentando ativamente a confiabilidade da frota.

Palavras-chave: Engenharia de manutenção, Diagrama de Pareto, Gestão de frotas, Taxonomia de falhas, Silvicultura.

ABSTRACT

Modern forestry demands high physical availability of mobile assets to ensure productivity in forestry operations. However, the high complexity of the fleet and the lack of standardization in data collection generate inconsistencies in the historical data, making it impossible to accurately identify the root causes of unavailability. This undergraduate thesis aims at the systemic implementation of the Pareto loss profile diagram in the automotive maintenance management of a eucalyptus plantation company. The methodology was based on the development of a technical taxonomy grounded in the ABNT NBR ISO 14224 standard, structuring the equipment into mechanical classes, vehicle systems, and maintainable items. Using the tractor class as a practical model, six months of corrective maintenance data (July to December 2025) were processed through the creation of interactive management dashboards in Business Intelligence (Power BI). Quantitative results confirmed the empirical applicability of the Pareto principle in the sector, showing that 79.24% of fleet downtime was concentrated in only six vital systems. The Hydraulic System emerged as the most critical offender, representing 27.61% of total availability losses, being heavily impacted by hose ruptures and coupling wear due to the harsh field environment. It is concluded that taxonomic standardization coupled with statistical stratification provides the analytical intelligence necessary for engineering to optimally allocate resources, supporting corrective and preventive action plans focused on critical components, reducing costs and actively increasing fleet reliability.

Keywords: Maintenance engineering, Pareto diagram, Fleet management, Failure taxonomy, Forestry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva da Banheira de falhas.....	21
Figura 2 - Exemplo de diagrama de fronteira.	22
Figura 3 - Pirâmide hierárquica da taxonomia de equipamentos.	23
Figura 4 - Curva P-F.....	26
Figura 5 - Perfil de perdas.	28
Figura 6 - Base de dados extraídos contaminados.	34
Figura 7 - Parte da árvore taxonômica construída.	40
Figura 8 – Dashboard Diagrama de Pareto.....	46
Figura 9 – Dashboard Diagrama de Pareto (Sistema Hidráulico).....	47
Figura 10 - Dashboard Diagrama de Pareto (Motor).	50

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BI	<i>Business Intelligence</i>
DF	Disponibilidade Física
DI	Disponibilidade Inerente
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônico)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> (Indicadores Chave de Performance)
Lambda(λ)	taxa de falhas
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> (Tempo Médio para Reparo)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OS	Ordem de Serviço
PTO	Ponto de tomada de Força
R(t)	Função de confiabilidade
ROI	Return On Investment (Retorno sobre o Investimento)
t	tempo de operação
TP	Trator de Pneus
VCR	Válvula de Controle Remoto

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVOS GERAIS	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	A EVOLUÇÃO E O PAPEL ESTRATÉGICO DA MANUTENÇÃO	16
3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO.....	16
3.2.1	Manutenção Corretiva.....	16
3.2.2	Manutenção Preventiva	17
3.2.3	Manutenção Preditiva	17
3.3	GESTÃO DA MANUTENÇÃO E INDICADORES DE DESEMPENHO (KPIs).....	17
3.3.1	MTBF (<i>Mean Time Between Failures</i> - Tempo Médio Entre Falhas).....	17
3.3.2	MTTR (<i>Mean Time To Repair</i> - Tempo Médio Para Reparo).....	18
3.3.3	Disponibilidade Física e Disponibilidade Inerente.....	18
3.4	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E PARÂMETROS DE DESEMPENHO	19
3.4.1	Mantenabilidade	20
3.4.2	Taxa de Falhas e a Curva da Banheira	20
3.4.3	Qualidade da Informação.....	21
3.5	A NORMA ISO 14224 E A ESTRUTURAÇÃO DE DADOS DE CONFIABILIDADE	21
3.5.1	Limites de Fronteira	22
3.5.2	Hierarquia Taxonômica e a Árvore de Ativos.....	22
3.5.3	Atributos de Falha.....	24
3.6	CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS SOB A ÓTICA DA CONFIABILIDADE.....	25
3.6.1	Falha Funcional	25
3.6.2	Falha Potencial	25
3.7	O PRINCÍPIO DE PARETO E O CONTROLE DE QUALIDADE	26
4.	METODOLOGIA	29
4.1	TIPO DE PESQUISA.....	29
4.1.1	Quanto a natureza	29
4.1.2	Quanto a forma de abordagem.....	30

4.1.3	Quanto aos objetivos	30
4.1.4	Quanto aos procedimentos técnicos.....	30
4.2	ARVORE DE ATIVOS	30
4.2.1	Classificação por Classes Mecânicas.....	31
4.2.2	Desenvolvimento da Taxonomia.....	31
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DA TAXONOMIA	32
4.4	TRATAMENTO DE DADOS	33
4.4.1	Extração e Saneamento	34
4.4.2	Processamento e Estratificação	34
4.4.3	Ferramentas de Análise e Visualização.....	34
4.4.4	Elaboração do Perfil de Perdas	35
5.	DESENVOLVIMENTO	36
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA FROTA	36
5.2	DESENVOLVIMENTO DA TAXONOMIA BASEADA NA ISO 14224	37
5.3	AQUISIÇÃO DE DADOS E A USABILIDADE DO SISTEMA	41
6.	ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1	O PERFIL DE PERDAS DA FROTA.....	43
6.1.1	O Levantamento Quantitativo e agrupamento de dados	43
6.2	CONSTRUÇÃO E INTERATIVIDADE DO PAINEL GERENCIAL EM <i>POWER BI</i>	44
6.2.1	Pareto Principal (Superior).....	45
6.2.2	Pareto Secundário (Inferior).....	45
6.3	ANÁLISE TÉCNICA DOS PRINCIPAIS OFENSORES	46
6.3.1	O Sistema Hidráulico e a Vulnerabilidade de Mangueiras e Engates	47
6.3.2	O Sistema Propulsor (Motor) e o Impacto do Regime Severo	49
6.4	IMPACTOS GERENCIAIS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO	52
6.4.1	Otimização de Recursos.....	52
6.4.2	Gestão de Estoque (MTTR).....	52
6.4.3	Retroalimentação do Plano Preventivo.....	53
7.	CONCLUSÃO	54
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
	REFERENCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

A silvicultura moderna, especialmente nas operações de plantio de eucalipto, é caracterizada por uma alta demanda de produtividade e eficiência para garantir as etapas de preparo de solo, plantio, manutenção e colheita florestal. Para atingir as metas operacionais, o setor se tornou fortemente dependente da mecanização em praticamente todas as suas fases. Nesse cenário, a rentabilidade do negócio está intrinsecamente ligada a alta disponibilidade física dos ativos móveis, uma vez que equipamentos parados representam não apenas o custo direto do reparo, mas também o custo de oportunidade da produção interrompida.

Garantir essa disponibilidade, no entanto, é um desafio complexo devido à natureza das operações florestais. A manutenção automotiva neste setor enfrenta obstáculos únicos, como a logística difusa, a severidade do terreno e a necessidade de operações contínuas. Somado a isso, há uma elevada complexidade na gestão devido a diversidade multimodal da frota utilizada no ciclo do eucalipto. Uma operação típica não se restringe a um único tipo de equipamento, englobando desde tratores agrícolas e implementos — essenciais para a adequação topográfica, preparo do solo e adubação — até equipamentos de “linha amarela”, composto por escavadeiras hidráulicas, motoniveladoras, pás carregadeiras e tratores de esteira, além de veículos logísticos e aéreos, como caminhões e drones.

Diante dessa diversidade e das condições extremas de operação, a gestão da manutenção precisa obrigatoriamente evoluir de uma postura puramente reativa para estratégias baseadas na condição do equipamento e no tempo de operação, como a manutenção preventiva e preditiva. A engenharia de confiabilidade surge como a disciplina capaz de aumentar a probabilidade de um item desempenhar sua função sem falhas por um período determinado. Contudo, para que essa área atue de forma efetiva na redução de quebras e custos, é imperativo garantir a existência de dados de qualidade. O grande obstáculo encontrado atualmente é a falta de padronização dos apontamentos de manutenção, o que frequentemente impede a identificação precisa das causas raízes da indisponibilidade. O registro genérico de falhas, como a simples anotação de “máquina quebrada” nos sistemas de gestão, inviabiliza análises estatísticas precisas. Sem saber exatamente onde e por que as falhas ocorrem, torna-se impossível direcionar recursos de forma estratégica para os componentes mais críticos da frota.

Para solucionar a inconsistência do histórico de falhas e estruturar a coleta de dados, faz-se necessária a adoção de um referencial normativo robusto. A norma ABNT NBR ISO 14224 estabelece as diretrizes para a coleta e o intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção, definindo uma linguagem padronizada para descrever eventos de falha. Uma vez que essa taxonomia garante a integridade das ordens de manutenção, torna-se possível transformar esses dados brutos em inteligência estratégica por meio do Diagrama de Pareto. Esta ferramenta analítica se baseia no princípio de que, na maioria dos processos, 80% das consequências advêm de 20% das causas (Costa, Epprecht e Carpinetti, 2009).

Na rotina da engenharia de manutenção, esse princípio se traduz no levantamento do "Perfil de Perdas", que consiste na identificação estatística de quais sistemas ou componentes são responsáveis pela maior parcela de indisponibilidade. A aplicação sistêmica dessa ferramenta permite priorizar recursos escassos em problemas de maior impacto. Dessa forma, o presente trabalho de graduação propõe a implementação sistêmica do diagrama de perfil de perdas na gestão da manutenção automotiva florestal, fornecendo a base metodológica para otimizar custos e aumentar de forma contínua a confiabilidade dos ativos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo geral a implementação do diagrama de perfil de perdas de maneira sistêmica e estruturada na manutenção automotiva florestal, com o intuito de direcionar ações de engenharia para o aumento da disponibilidade física dos ativos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica referente aos conceitos de gestão da manutenção e engenharia de confiabilidade, com foco na aplicação do princípio de Pareto.
- Mapeamento da frota utilizada no ciclo do eucalipto, compreendendo as particularidades mecânicas de cada classe de ativo (agrícola, florestal, linha amarela, rodoviário e aéreo).
- Desenvolvimento de uma taxonomia padronizada (árvore de ativos) para o apontamento em ordens de manutenção, visando sanar a inconsistência de dados históricos.
- Processamento de dados e elaboração dos diagramas de perfil de perdas estratificados por classe de equipamento e sistema veicular.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A EVOLUÇÃO E O PAPEL ESTRATÉGICO DA MANUTENÇÃO

Historicamente, a manutenção era vista pelo setor industrial e operacional apenas como uma atividade de reparo, acionada exclusivamente quando um equipamento apresentava falha e interrompia a produção. Contudo, com o avanço tecnológico e o aumento da competitividade, essa visão sofreu uma profunda transformação. Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção assumiu uma função estratégica dentro das organizações, deixando de ser considerada um mero centro de custos para se consolidar como um fator decisivo na garantia da qualidade, segurança, preservação ambiental e rentabilidade do negócio.

No contexto de frotas e equipamentos móveis, onde a exigência operacional é severa, a gestão da manutenção atua diretamente na preservação da função dos ativos. O objetivo central passa a ser a garantia da disponibilidade física e da confiabilidade das máquinas, assegurando que estas operem em sua capacidade nominal e atendam às demandas do planejamento produtivo sem interrupções imprevistas.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

Para atingir os objetivos estratégicos propostos, a engenharia de manutenção classifica suas atuações em diferentes estratégias, aplicadas de acordo com a criticidade de cada sistema veicular. De acordo com os preceitos de Kardec e Nascif (2009), as principais abordagens se dividem em:

3.2.1 Manutenção Corretiva

É a atuação realizada após a ocorrência de uma pane ou falha, destinada a recolocar o equipamento em condições de operar. Ela se subdivide em:

- **Não Planejada:** Ocorre de forma emergencial quando a máquina quebra em operação (como o rompimento de uma mangueira hidráulica no campo), gerando alto impacto nos custos e na produção.

- **Planejada:** A falha potencial é identificada previamente, e o reparo é programado para um momento que gere menor impacto à operação.

3.2.2 Manutenção Preventiva

É a atuação realizada de forma sistemática e periódica, baseada em intervalos de tempo ou unidades de uso (como horas de funcionamento ou quilometragem). Seu objetivo é reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um componente, substituindo peças antes que atinjam o fim de sua vida útil (exemplo: trocas de óleo e filtros em motores a diesel).

3.2.3 Manutenção Preditiva

Consiste no acompanhamento periódico ou contínuo de parâmetros físicos e operacionais dos equipamentos (como análise de óleo lubrificante, termografia e vibração). A intervenção ocorre apenas quando o monitoramento indica uma degradação, otimizando o uso dos componentes e evitando paradas desnecessárias.

3.3 GESTÃO DA MANUTENÇÃO E INDICADORES DE DESEMPENHO (KPIs)

A transição para uma manutenção estratégica exige que as decisões sejam baseadas em dados concretos e não em intuições. Para isso, a gestão se apoia em Indicadores Chave de Desempenho (KPIs - *Key Performance Indicators*), que mensuram a eficiência dos processos e o comportamento dos ativos ao longo do tempo. Os principais indicadores utilizados na gestão de frotas e equipamentos pesados são:

3.3.1 MTBF (*Mean Time Between Failures* - Tempo Médio Entre Falhas)

Representa a confiabilidade do equipamento. É calculado pela razão entre o tempo total de operação e o número de falhas ocorridas em um determinado período.

Quanto maior o MTBF, maior a confiabilidade do sistema operado, indicando que as estratégias preventivas estão sendo eficientes. A equação (1) mostra sua formulação.

$$MTBF = \frac{\text{Tempo disponível} + \text{Tempo de manutenção Preventiva}}{\text{Nº de falhas no período}} \quad (1)$$

3.3.2 MTTR (*Mean Time To Repair* - Tempo Médio Para Reparo)

Representa a manutenibilidade, ou seja, a facilidade e a rapidez com que uma equipe consegue diagnosticar e consertar uma falha, devolvendo o ativo à operação.

É determinado dividindo o tempo total de parada para reparo pelo número de intervenções. Um MTTR baixo indica eficiência das equipes de oficina e boa disponibilidade de peças no estoque. A equação (2) mostra sua formulação.

$$MTTR = \frac{\text{Tempo total para reparo}}{\text{Nº de intervenções}} \quad (2)$$

3.3.3 Disponibilidade Física e Disponibilidade Inerente

São os indicadores macros mais críticos na gestão de ativos móveis. De maneira geral a Disponibilidade Física (DF) representa o percentual de horas disponíveis para a operação de um equipamento em relação ao total de horas programadas para a operação em um período, considerando como tempo de indisponibilidade o período destinado a manutenção preventiva e corretiva, e considerando como tempo programado para a operação, tanto as horas efetivas trabalhadas pelo ativo, quanto o tempo destinado a manutenção, setup, etc. Esse indicador é utilizado para a gestão de capacidade produtiva dos ativos físicos. A Equação (3) mostra sua formulação.

$$DF = \frac{\text{Tempo disponível}}{\text{Tempo programado para operação}} * 100\% \quad (3)$$

Já a Disponibilidade Inerente (DI) cruza as informações de confiabilidade (MTBF) e manutenibilidade (MTTR) para demonstrar, em porcentagem, o tempo em que a máquina esteve em condições de produzir em relação ao tempo total programado para a operação, sem considerar o tempo destinado a manutenção preventiva. Quando a ideia é monitorar o desempenho do ativo em relação ao impacto do tempo das falhas recomenda-se utilizar a Disponibilidade Inerente. A equação (4) mostra sua formulação.

$$DI = \frac{\text{Tempo programado para operação} - \text{Tempo de manutenção Corretiva}}{\text{Tempo programado para operação}} * 100\% \quad (4)$$

A análise integrada desses indicadores é o que permite a engenharia direcionar seus esforços. Ao estratificar o tempo de parada (MTTR) por meio de ferramentas como o Diagrama de Pareto, o gestor consegue identificar quais sistemas ou componentes específicos estão degradando a Disponibilidade Física da frota, permitindo ações corretivas cirúrgicas.

3.4 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E PARÂMETROS DE DESEMPENHO

A evolução da gestão da manutenção exige que a análise do comportamento dos equipamentos deixe de ser empírica e passe a ser tratada de forma estatística e analítica. Dessa maneira, a Engenharia de Confiabilidade surge como a área dedicada a prever, analisar e mitigar a ocorrência de anomalias nos sistemas físicos.

Segundo a norma NBR 5462, a confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar sua função sem falhas por um período determinado, sob condições de operação preestabelecidas. Matematicamente, para equipamentos mecânicos que operam na fase de vida útil (onde a taxa de falhas λ é considerada constante), a função de confiabilidade $R(t)$ pode ser expressa pela distribuição exponencial mostrada na equação (5):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Onde t representa o tempo de operação. Em operações de silvicultura, o tempo t é frequentemente medido em horímetros, e o objetivo da engenharia é maximizar $R(t)$ para tratores, colhedoras e máquinas de construção submetidos a regimes severos de carga.

Para compreender o ciclo de vida dos ativos e direcionar as ações corretivas, a confiabilidade se apoia em conceitos fundamentais e interligados:

3.4.1 Manutenibilidade

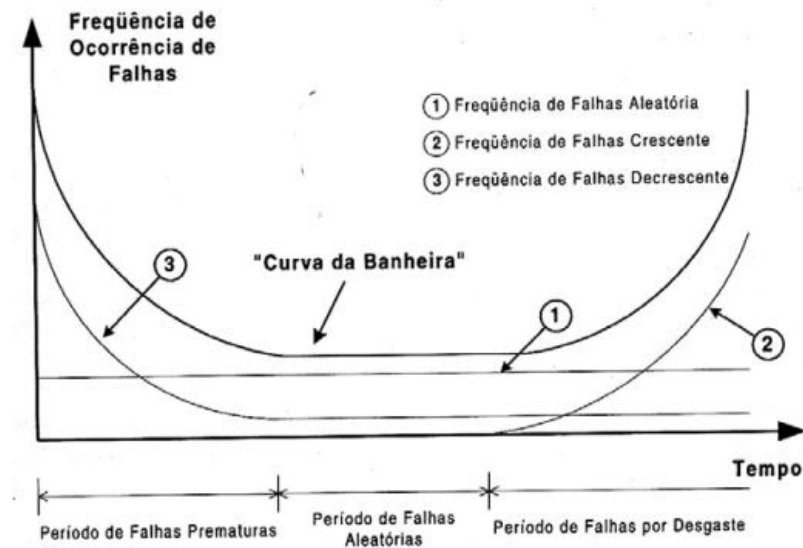
É a probabilidade de que um componente ou sistema mecânico falho seja restaurado a sua condição operacional dentro de um período de tempo especificado. Em termos práticos de oficina, reflete a facilidade de desmontagem, acesso aos componentes (como o sistema hidráulico ou o sistema de transmissão de força) e a eficiência do diagnóstico.

3.4.2 Taxa de Falhas e a Curva da Banheira

O comportamento das falhas ao longo da vida útil de um ativo mecânico é classicamente representado pela "Curva da Banheira" representada pela Figura 1, dividida em três estágios:

- **Mortalidade Infantil:** Alta taxa de falhas iniciais devido a defeitos de fabricação, montagem incorreta ou falhas de calibração em componentes recém-instalados.
- **Vida Útil (Falhas Aleatórias):** Período de estabilidade onde as falhas ocorrem por eventos imprevisíveis ou picos de carga operacional.
- **Fase de Desgaste:** Aumento exponencial da taxa de falhas devido à fadiga mecânica, corrosão, abrasão e fim da vida útil dos materiais (comum em material rodante e bombas hidráulicas).

Figura 1 - Curva da Banheira de falhas



Fonte: Xenos, 2014.

3.4.3 Qualidade da Informação

O alicerce para a aplicação desses conceitos é a coleta de dados. Para que a engenharia de confiabilidade atue na redução de quebras e custos, deve-se garantir a existência de dados de qualidade. O registro genérico de falhas (exemplo: "maquina quebrada") em *softwares* de gestão inviabiliza a análise estatística, exigindo a criação de padrões de entrada de dados.

A aplicação prática da engenharia de confiabilidade em frotas complexas demanda uma estratificação precisa. Sem a rastreabilidade correta dos componentes que entram em desgaste prematuro ou que apresentam baixos índices de manutenibilidade, os cálculos probabilísticos tornam-se inócuos para a tomada de decisão gerencial.

3.5 A NORMA ISO 14224 E A ESTRUTURAÇÃO DE DADOS DE CONFIABILIDADE

Para que as análises estatísticas da engenharia de manutenção sejam íntegras e reflitam a realidade operacional, é indispensável a utilização de referenciais normativos para a estruturação das informações. Neste contexto, destaca-se a norma ABNT NBR ISO 14224, que estabelece as diretrizes internacionais para a coleta e o

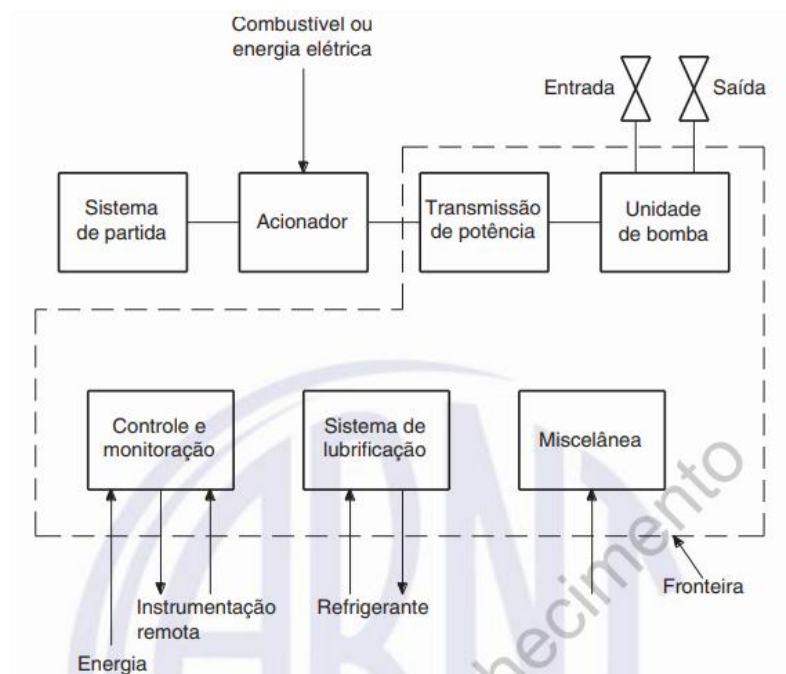
intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção de equipamentos. O principal objetivo desta norma é definir uma linguagem padronizada para a descrição de eventos de falha.

Na prática de gestão de frotas, a aplicação dos preceitos da ISO 14224 é a principal ferramenta para solucionar problemas recorrentes de "dados sujos" em *softwares* de manutenção corporativos. Para garantir a rastreabilidade e a qualidade do dado inserido no sistema, a norma se baseia em pilares fundamentais de estruturação:

3.5.1 Limites de Fronteira

Consiste em definir com exatidão o que faz parte do equipamento ou sistema monitorado. Esta definição evita a duplicidade de registros e ambiguidades técnicas. Por exemplo, estabelece-se de forma padronizada se uma bomba de combustível deve ser apontada como pertencente ao motor ou ao sistema de alimentação de combustível, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Exemplo de diagrama de fronteira.



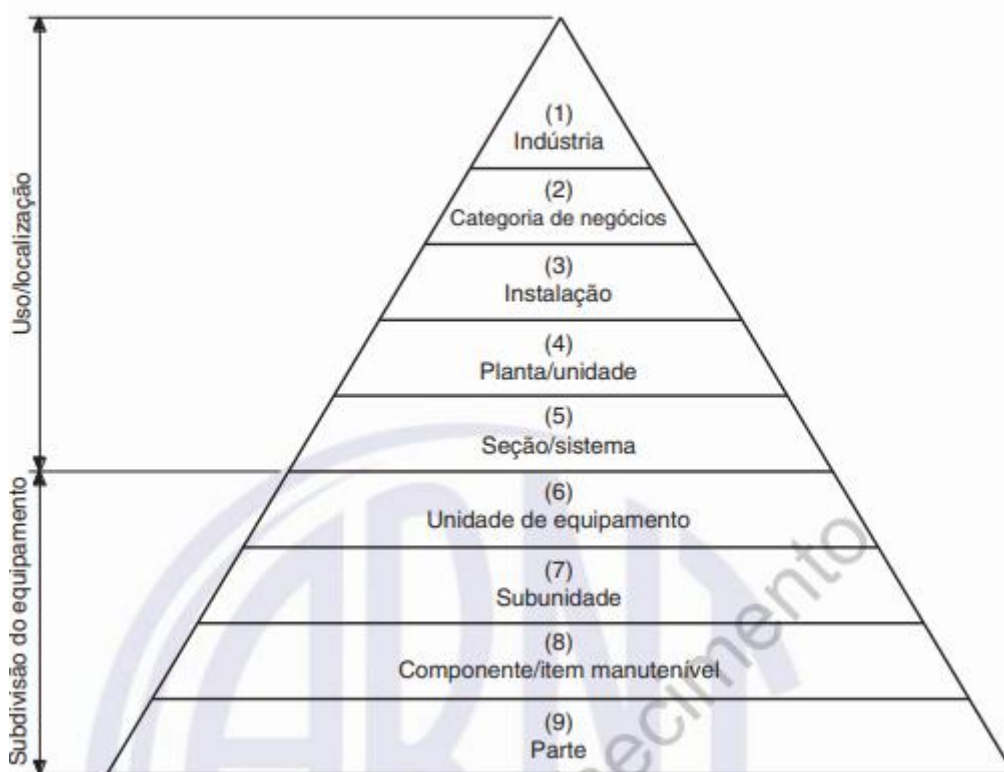
Fonte: ABNT NBR ISO 14224, 2011.

3.5.2 Hierarquia Taxonômica e a Árvore de Ativos

A aplicação prática da ISO 14224 exige a estruturação dos ativos físicos em níveis lógicos de relacionamento, estabelecendo uma dependência do tipo "Pai-Filho". Essa estruturação, frequentemente representada em forma de pirâmide, é o que permite o rastreamento minucioso e a estratificação dos custos de manutenção e das perdas de produção ao longo de toda a frota.

A norma internacional propõe a divisão do ativo em nove níveis hierárquicos, segregados em duas grandes categorias: o uso ou localização (níveis 1 ao 5) e a subdivisão do equipamento em si (níveis 6 ao 9). A Figura 3 mostra a estrutura da pirâmide hierárquica de equipamento proposta pela NBR.

Figura 3 - Pirâmide hierárquica da taxonomia de equipamentos.



Fonte: ABNT NBR ISO 14224, 2011.

Para o escopo da manutenção de frotas móveis e maquinário florestal, o foco do desdobramento técnico recai sobre os níveis da subdivisão mecânica, seguindo a lógica estrutural:

- **Nível 6 - Unidade de Equipamento:** Representa o ativo principal em sua totalidade. No contexto florestal, este nível identifica a máquina de forma singular, englobando sua classe mecânica, como, por exemplo, um "Trator Agrícola" ou uma "Escavadeira Hidráulica".

- **Nível 7 - Subunidade (Sistema Veicular):** Corresponde aos grandes conjuntos ou sistemas funcionais que compõem a unidade de equipamento. É a divisão primária da máquina. Em um trator, as subunidades englobam o Sistema de Alimentação de Combustível, o Motor, a Transmissão, o Sistema Hidráulico, entre outros.
- **Nível 8 – Componente/ Item Manutenível:** Refere-se as peças ou conjuntos menores que sofrem intervenção direta das equipes de manutenção na oficina ou no campo. É o nível onde a falha física efetivamente ocorre e onde o reparo ou a substituição é apontado (por exemplo: bomba hidráulica, bicos injetores, alternador ou radiador).
- **Nível 9 – Parte (Peça):** O menor nível de detalhamento, referente a componentes elementares, como rolamentos, anéis de vedação ou parafusos.

A construção dessa "Árvore de Ativos" padronizada, com foco nos níveis 6, 7 e 8, é o mecanismo que elimina a subjetividade dos apontamentos históricos. Ao garantir que o mecânico aponte a ordem de serviço informando exatamente o Item Manutenível (Nível 8) que falhou, o *software* de gestão consegue agrupar automaticamente o tempo de máquina parada no Sistema Veicular (Nível 7) correspondente. É essa rastreabilidade hierárquica que fornece os dados limpos e precisos necessários para a elaboração gráfica do Diagrama de Pareto, evidenciando quais sistemas são os maiores ofensores da disponibilidade da frota.

3.5.3 Atributos de Falha

Para que a engenharia consiga atuar na melhoria contínua, a norma padroniza a distinção clara entre os eventos atrelados a uma quebra. Deve-se separar o modo de falha (o sintoma observado), a causa da falha (a origem do problema) e o mecanismo de falha (o processo físico que levou à degradação). Essa distinção é essencial para a condução de uma análise da causa raiz efetiva.

Ao implementar essa árvore de ativos padronizada, a engenharia de manutenção garante que os dados coletados no campo ou na oficina sejam consistentes. É essa consistência que viabiliza, posteriormente, o processamento de dados e a elaboração de ferramentas de gestão avançadas, como os diagramas de perfil de perdas estratificados por classe de equipamento e sistema veicular.

3.6 CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS SOB A ÓTICA DA CONFIABILIDADE

Na engenharia de manutenção moderna, a definição de falha transcende a simples ideia de uma quebra mecânica completa ou colapso estrutural de um material. De acordo com Siqueira (2005), no contexto da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), a falha é formalmente definida como a incapacidade de um item físico, componente ou sistema de desempenhar a sua função requerida dentro dos parâmetros de desempenho e qualidade especificados pelo projeto ou pela necessidade operacional.

Para que a gestão da manutenção atue de forma preventiva e evite as quebras catastróficas, Siqueira (2005) estabelece a necessidade de classificar o processo de degradação em duas categorias fundamentais. Essa separação permite direcionar as inspeções e definir o momento correto da intervenção da oficina:

3.6.1 Falha Funcional

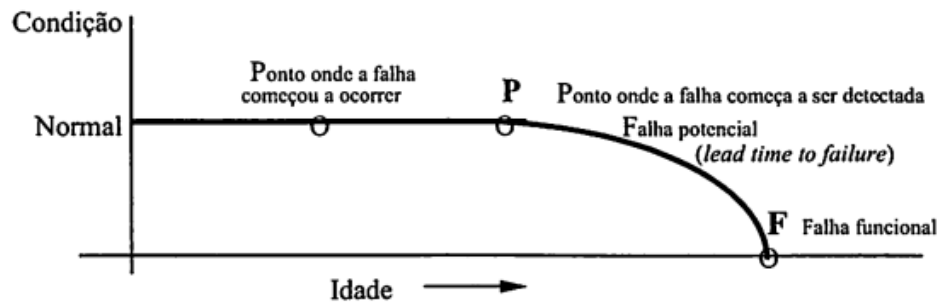
Ocorre quando o equipamento ou sistema perde totalmente a capacidade de realizar a sua função primária, ou quando o seu desempenho cai para um nível abaixo do limite mínimo aceitável. Em frotas de silvicultura, um exemplo de falha funcional é um trator agrícola cujo motor de partida colapsa e não liga, ou o sistema de um implemento que perde a capacidade de acoplamento, gerando a interrupção imediata da operação e a indisponibilidade do ativo.

3.6.2 Falha Potencial

Consiste em uma condição física identificável, detectável e mensurável que indica que uma falha funcional está em processo de desenvolvimento ou na iminência de ocorrer. Trata-se do sintoma inicial da degradação do material. Exemplos em componentes mecânicos pesados incluem o aumento anormal da temperatura em trocadores de calor por obstrução, a vibração incipiente em mancais do eixo traseiro, ou o ressecamento de mangueiras do sistema hidráulico antes de seu rompimento.

A correta compreensão e separação entre esses dois estados é o que viabiliza a engenharia de manutenção estratégica. O espaço de tempo entre a detecção da falha potencial e a consolidação da falha funcional é conhecido na literatura como "Intervalo P-F" exibida na Figura 4.

Figura 4 - Curva P-F.



Fonte: Kardec, 2009.

A meta da padronização de dados e da criação de uma taxonomia clara é permitir que as equipes de campo relatem as falhas potenciais precocemente. Quando a gestão age baseada nessas informações antecipadas, consegue-se evitar que as falhas funcionais (quebras inesperadas) ocorram, reduzindo drasticamente as horas paradas que figuram no topo do diagrama de perfil de perdas.

3.7 O PRINCÍPIO DE PARETO E O CONTROLE DE QUALIDADE

A transição de uma manutenção puramente reativa para uma gestão estratégica exige ferramentas capazes de tratar o volume de dados operacionais e direcionar a tomada de decisão. Neste contexto, o Controle Estatístico da Qualidade fornece o embasamento analítico necessário.

O Diagrama de Pareto é fundamentado no princípio enunciado por Vilfredo Pareto, que postula que a maior parte dos efeitos advém de um número reduzido de causas. No contexto da gestão industrial, Costa, Epprecht e Carpinetti (2009) classificam esta técnica como uma das "Sete Ferramentas Básicas da Qualidade", sendo essencial para o processo de tomada de decisão baseada em dados.

Segundo Costa et al. (2009), a principal utilidade desta ferramenta é permitir que os gestores separem os "poucos vitais" (as poucas causas que geram as maiores

perdas) dos "muitos triviais" (inúmeras causas com baixo impacto individual). Em sistemas de manutenção, isso significa identificar quais falhas ou componentes são responsáveis pela maior parcela de indisponibilidade ou custos operacionais.

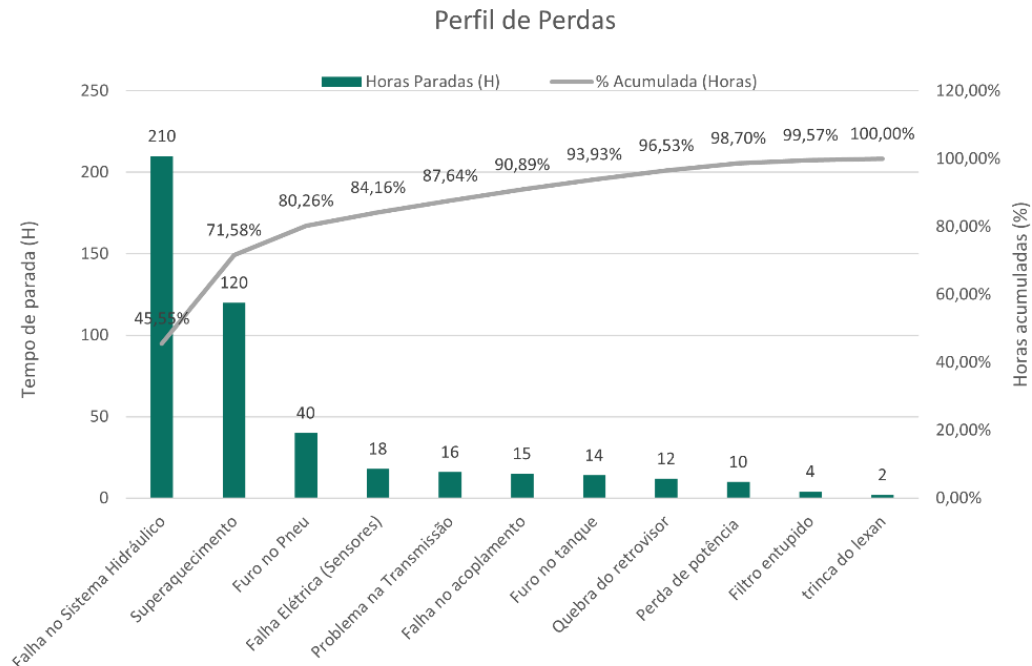
O diagrama é uma representação gráfica fundamentada no princípio empírico de que, na grande maioria dos processos, cerca de 80% das consequências (efeitos ou problemas) advêm de apenas 20% das causas.

A estrutura visual do gráfico, composta por barras em ordem decrescente de frequência e uma linha de percentagem acumulada (Curva de Lorenz), facilita a visualização imediata das prioridades de intervenção.

Para Costa et al. (2009), a eficácia do Diagrama de Pareto reside na sua capacidade de organizar informações complexas de forma que os esforços de melhoria sejam direcionados onde o retorno será mais significativo.

Na engenharia de manutenção automotiva e de maquinário pesado, a aplicação estatística dessa ferramenta traduz-se no chamado "Diagrama de Perfil de Perdas". Ao processar as ordens de serviço — previamente estruturadas e padronizadas pelas diretrizes da ISO 14224 —, o diagrama estratifica o tempo total de indisponibilidade da frota e o distribui entre os sistemas veiculares, permitindo que o gestor visualize se as perdas estão concentradas em sistemas específicos (como motor, transmissão ou hidráulica) ou em modelos de equipamentos específicos. A Figura 5 exibe um exemplo geral de um perfil de perdas.

Figura 5 - Perfil de perdas.



Fonte: Autoria Própria.

A visualização clara dessa estratificação evidencia quais são os componentes críticos da operação. A aplicação sistêmica dessa ferramenta permite priorizar recursos escassos em problemas de maior impacto. Dessa forma, a equipe de confiabilidade deixa de tratar todas as quebras com a mesma urgência e passa a elaborar planos de ação estratégicos, como a análise de falhas, padronização de processos de manutenção preventiva, e melhorias focadas exclusivamente nos sistemas que compõem os 20% das causas, garantindo um aumento expressivo e financeiramente viável na disponibilidade física da frota.

4. METODOLOGIA

4.1 TIPO DE PESQUISA

O presente trabalho de graduação se enquadra em diferentes classificações metodológicas, estruturadas para garantir o rigor científico e o alcance dos objetivos propostos na área de engenharia de manutenção. O detalhamento do delineamento da pesquisa é apresentado na sequência:

4.1.1 Quanto a natureza

A pesquisa classifica-se como aplicada. Esse tipo de estudo tem como característica principal a geração de conhecimentos para aplicação prática, dirigida à solução de problemas específicos e reais. No contexto deste trabalho, a pesquisa busca resolver o problema prático da inconsistência de dados históricos em ordens de manutenção, propondo uma solução estruturada para a rotina do setor de engenharia.

4.1.2 Quanto a forma de abordagem

O trabalho segue uma abordagem qualitativa. Embora a etapa final de resultados utilize o processamento de dados e a elaboração de diagramas estatísticos (Pareto), a compreensão do problema central exige uma análise qualitativa profunda. Isso envolve o diagnóstico prévio das inconsistências no preenchimento das ordens de serviço, a interpretação do ambiente de manutenção e o agrupamento lógico de componentes mecânicos para o desenvolvimento da taxonomia.

4.1.3 Quanto aos objetivos

Trata-se de uma pesquisa exploratória. Pesquisas com este objetivo visam proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito ou auxiliando na construção de hipóteses. Esta característica se evidencia na etapa inicial do trabalho, que demanda o mapeamento detalhado da frota utilizada no ciclo do eucalipto e a exploração das particularidades mecânicas de cada classe de ativo (agrícola, florestal, linha amarela, rodoviário e aéreo).

4.1.4 Quanto aos procedimentos técnicos

O trabalho fundamenta-se na combinação de duas metodologias clássicas:

- **Pesquisa Bibliográfica:** Utilizada como ponto de partida para a fundamentação teórica, baseando-se em materiais já elaborados e publicados, como livros de gestão da manutenção, manuais de engenharia de confiabilidade e normas técnicas (como a ABNT NBR ISO 14224 e NBR 5462).
- **Estudo de Caso:** A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso prático, uma vez que propõe a implementação sistêmica do diagrama de perfil de perdas (Pareto) no ambiente real de uma empresa de plantio de eucalipto. Essa imersão permite avaliar a viabilidade da aplicação da teoria taxonômica no dia a dia operacional da gestão de frotas florestais.

4.2 ARVORE DE ATIVOS

O desenvolvimento de uma taxonomia padronizada exige, primordialmente, uma organização lógica que respeite a engenharia e o projeto de cada máquina. Para estruturar a árvore de ativos de forma coerente com a pirâmide hierárquica proposta pela norma ISO 14224, o primeiro passo adotado foi a categorização da frota multimodal em "Classes Mecânicas".

4.2.1 Classificação por Classes Mecânicas

A definição das classes mecânicas baseia-se estritamente no tipo de equipamento e em sua composição mecânica fundamental. Essa premissa assume que equipamentos pertencentes a uma mesma classe mecânica – ainda que divirjam em fabricantes, portes ou modelos específicos – possuem, de modo geral, os mesmos sistemas veiculares e mecânicos constituintes. Por exemplo, todos os tratores agrícolas, independentemente de sua potência, compartilharão sistemas como transmissão, hidráulico, material rodante e acoplamentos.

4.2.2 Desenvolvimento da Taxonomia

Após a segregação da frota nas nove classes mecânicas, procedeu-se ao desenvolvimento da taxonomia estrutural para cada uma delas. Esta etapa consistiu na modelagem da árvore de ativos, aprofundando o nível de detalhamento para garantir uma coleta de dados precisa nas ordens de manutenção. Para que a modelagem fosse padronizada e replicável, foram estabelecidos critérios técnicos rigorosos para a definição de sistemas, limites de fronteira e seleção de componentes, fundamentados nos preceitos da norma ABNT NBR ISO 14224.

A estruturação seguiu os seguintes critérios de classificação:

4.2.2.1 Definição de Sistemas e Limites de Fronteira

Os sistemas veiculares (correspondentes ao Nível 7 da norma – Subunidade) foram definidos estritamente com base na função desempenhada pelo conjunto mecânico dentro da operação do equipamento. Para garantir que não houvesse ambiguidade no momento do apontamento da falha pelo mecânico, os limites de fronteira de cada sistema foram construídos pautados exclusivamente nessa função

primária. O limite de fronteira determina de forma inequívoca onde um sistema termina e onde o outro começa. Como exemplo prático, utilizou-se a função para definir se uma bomba alimentadora pertence à fronteira do "Motor" ou se atua na função do "Sistema de Alimentação de Combustível", eliminando assim a duplicidade e a "sujeira" nos registros históricos.

4.2.2.2 Definição de Locais

Aliado a divisão sistêmica, estabeleceu-se o critério de localização física para conjuntos que se repetem ou possuem aplicações distintas no mesmo equipamento. A definição de locais (como "Eixo Dianteiro" e "Eixo Traseiro" ou "Lado Direito" e "Lado Esquerdo") foi incorporada à estrutura para garantir a rastreabilidade espacial exata da falha, permitindo a engenharia avaliar se uma quebra está atrelada a uma condição de operação específica de um dos lados da máquina.

4.2.2.3 Seleção de Componentes (Itens Manuteníveis)

Dentro de cada sistema e limite de fronteira delimitado, a seleção dos itens constituintes da árvore foi realizada considerando o conceito de componente manutenível (Nível 8 da hierarquia taxonômica). O critério determinou que fossem cadastrados no sistema apenas os conjuntos ou peças que sofrem intervenção direta, diagnóstico, reparo ou substituição pelas equipes de manutenção na oficina ou no campo. Componentes elementares (Nível 9 – Peças, como parafusos genéricos ou arruelas) que não geram ordens de serviço individuais para falhas não foram mapeados como itens principais, mantendo a árvore de ativos enxuta, funcional e focada nos ofensores de disponibilidade.

Essa padronização criteriosa da arquitetura da informação é o que viabiliza a transformação do histórico de manutenções em dados estatísticos confiáveis, preparando o terreno estrutural para a implementação prática nos *softwares* de gestão corporativos.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DA TAXONOMIA

A consolidação prática do estudo deu-se por meio da inserção da estrutura taxonômica desenvolvida no sistema informatizado de gestão da manutenção da empresa. Com a nova árvore de ativos cadastrada, o *software* passou a guiar e padronizar as novas entradas no sistema de manutenção, exigindo o preenchimento estruturado para a abertura e o encerramento de todas as frentes de trabalho.

É fundamental ressaltar que o escopo analítico principal do diagrama de perfil de perdas (Pareto) se concentra em estratificar o impacto da indisponibilidade mecânica gerada estritamente pelas intervenções de caráter corretivo. São essas quebras que efetivamente interrompem a operação florestal de forma não programada. No entanto, a implementação da taxonomia possui uma abrangência sistêmica mais ampla, englobando todas as estratégias de atuação.

Dessa forma, as atividades programadas, como a manutenção preditiva e preventiva, também foram rigorosamente atreladas a taxonomia desenvolvida. O plano de manutenção da frota foi revisado para que cada rotina de inspeção, lubrificação ou troca periódica de componentes conversasse diretamente com a árvore de ativos.

Como resultado dessa parametrização, garantiu-se que a totalidade das ordens de manutenção — independentemente de sua natureza ser programada ou emergencial — tivesse suas atividades classificadas com base na tríade técnica: Sistema, Local e Serviço a realizar. Essa padronização universal no sistema de gestão viabiliza a extração de dados limpos para a geração do perfil de perdas das falhas corretivas e, simultaneamente, estrutura o histórico de preventivas, permitindo que a engenharia cruze informações para avaliar se as revisões programadas estão sendo eficientes em mitigar as quebras nos sistemas mais críticos.

4.4 TRATAMENTO DE DADOS

A etapa final do processo metodológico consistiu na transformação dos registros operacionais brutos em informações estratégicas para a tomada de decisão. Com a lógica taxonômica definida e implementada, foi realizado o saneamento dos dados históricos recentes e o acompanhamento das novas entradas no sistema informatizado de manutenção.

O tratamento de dados foi estruturado nas seguintes fases operacionais:

4.4.1 Extração e Saneamento

Os dados referentes as ordens de manutenção (OS) foram extraídos do *software* de gestão corporativo. O foco principal da extração recaiu sobre os apontamentos de manutenção corretiva, uma vez que estes representam a indisponibilidade mecânica não programada da frota. Graças a taxonomia previamente cadastrada, foi possível realizar o saneamento da base de dados, filtrando e eliminando registros inconsistentes ou preenchidos fora do novo padrão técnico. A Figura 6 exibe um exemplo de apontamento incorreto identificado na base de apontamentos.

Figura 6 - Base de dados extraídos contaminados.

Equip./Implem.				
	Esp.	Emp.	Equip.	Modelo
	1	2	TP-26	JD 6135J
	1	2	TP-27	JD 7230J 4x4
	1	2	TP-28	JD 7230J 4x4

Detalhe										
	Cód.	Classe Operacional	Fechamento Dia	Cód.	Sistema	Cód.	Local	Cód.	Serviço	Prognóstico
	27	TRATOR PNEUS	04/08/2025	44	SISTEMA HIDRÁULICO	1554	TAMPA RESERVATÓRI	64	TROCAR	2 uni : AL165074 Tampa do reservatório de óleo hidráulico 2 ur
	27	TRATOR PNEUS	05/08/2025	44	SISTEMA HIDRÁULICO	700	FILTRO HIDRAULICO	64	TROCAR	troca filtro hidráulico entupido TROCAR FILTRO HIDRAULICO
	27	TRATOR PNEUS	07/08/2025	35	SISTEMA DIREÇÃO	1368	ROLAMENTO	64	TROCAR	TROCAR ROLAMENTO (SISTEMA DIREÇÃO).
	27	TRATOR PNEUS	12/08/2025	25	MOTOR	1697	VIDRO	64	TROCAR	R537494-PARA-BRIS(1und)
	27	TRATOR PNEUS	17/08/2025	25	MOTOR	888	MANGUEIRA	64	TROCAR	TROCAR MANGUEIRA (MOTOR).
	27	TRATOR PNEUS	17/08/2025	37	SISTEMA ELÉTRICO	376	CHICOTE ELÉTRICO	64	TROCAR	troca do chicote e sensor alto trak e feito calibração do ângulo
	27	TRATOR PNEUS	18/08/2025	37	SISTEMA ELÉTRICO	122	BATERIA	64	TROCAR	TROCAR BATERIA (SISTEMA ELÉTRICO).
	27	TRATOR PNEUS	19/08/2025	3	ALIMENTAÇÃO AR	672	FILTRO AR 1º	64	TROCAR	TROCAR FILTRO AR CABINE (CABINE). TROCAR FILTRO
	27	TRATOR PNEUS	19/08/2025	3	ALIMENTAÇÃO AR	673	FILTRO AR 2º	64	TROCAR	TROCAR FILTRO AR CABINE (CABINE). TROCAR FILTRO
	27	TRATOR PNEUS	19/08/2025	4	ALIMENTAÇÃO COMBU	677	FILTRO COMBUSTIVEL	65	TROCAR FILTRO	TROCAR FILTRO FILTRO COMBUSTIVEL (ALIMENTAÇÃO

Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Processamento e Estratificação

A base de dados limpa foi processada com o objetivo de calcular o impacto quantitativo de cada falha. A principal métrica analisada foi o "Tempo de Parada" (medido em horas). Utilizando os níveis hierárquicos da árvore de ativos como chaves de agrupamento, os tempos de indisponibilidade foram somados e estratificados primeiramente por "Classe Mecânica" (para garantir a comparação entre equipamentos similares) e, em seguida, por "Sistema Veicular".

4.4.3 Ferramentas de Análise e Visualização

Para o processamento estatístico e o cruzamento de um grande volume de informações, foram utilizadas planilhas eletrônicas. Essa ferramenta permitiu a

organização matricial dos dados (cruzando as horas paradas com os sistemas ofensores) e o cálculo da porcentagem individual e acumulada de cada conjunto mecânico. Posteriormente, os dados consolidados foram exportados para *softwares* de *Business Intelligence (BI)* para exibir os relatórios e indicadores de maneira visual, interativa e dinâmica.

4.4.4 Elaboração do Perfil de Perdas

O produto final do tratamento de dados foi a geração dos diagramas de perfil de perdas (Pareto) estratificados por classe de equipamento. O diagrama foi construído se ordenando os sistemas veiculares no eixo horizontal de forma decrescente em relação as horas paradas (eixo vertical primário), sobrepostos por uma linha de tendência representando a porcentagem acumulada (eixo vertical secundário). Essa representação gráfico-matemática evidenciou de forma clara quais componentes configuram os 20% das causas responsáveis por aproximadamente 80% do tempo total de indisponibilidade da frota.

5. DESENVOLVIMENTO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA

Na complexa operação de silvicultura estudada, a diversidade de ativos foi detalhadamente mapeada e agrupada nas seguintes classes mecânicas principais:

- **Tratores:** Unidades de força motriz, predominantemente agrícolas, utilizadas nas diversas fases do ciclo florestal.
- **Implementos Agrícolas:** Equipamentos acoplados para o preparo de solo, nutrição e plantio, englobando subsoladores, distribuidores de calcário, tanques de plantio, implementos de pulverização, grades aradoras e aivecas.
- **Implementos Florestais:** Ferramentas específicas para o manejo da madeira, como o cabeçote triturador desbastador de tocos.
- **Implementos Rodoviários:** Carrocerias e equipamentos acoplados a caminhões para apoio logístico e operacional, incluindo guindautos (munck), pranchas, caminhões-pipa, baús, caçambas, áreas de vivência e reboques *dolly*.
- **Máquinas Pesadas:** Equipamentos de infraestrutura e movimentação de terra (linha amarela), compreendendo pás carregadeiras, motoniveladoras, escavadeiras hidráulicas e tratores de esteira.
- **Máquinas de Colheita:** Equipamentos florestais altamente especializados para o corte e extração da madeira, compostos por *harvesters* e *forwarders*.
- **Caminhões:** Veículos rodoviários pesados destinados à logística de transporte e abastecimento.

- **Drones:** Equipamentos aéreos não tripulados utilizados para pulverização de precisão e mapeamento topográfico.
- **Geradores e Motores Estacionários:** Ativos dedicados a geração de energia elétrica e acionamento de bombas em frentes de trabalho isoladas.

Sob a ótica da gestão da manutenção e da engenharia de confiabilidade, a divisão da frota nestas nove classes mecânicas possui uma função analítica crucial. Ela atua como o filtro primário para a seleção e o processamento de dados que alimentarão o diagrama de perfil de perdas (Pareto).

Ao processar os dados históricos de indisponibilidade, é imperativo que o diagrama estratifique os tempos de parada por classe de equipamento. Essa classificação garante que os dados submetidos a análise estatística sejam estruturalmente similares, permitindo que a engenharia faça comparações justas e coerentes — ou seja, garantindo que o gestor esteja "comparando laranjas com laranjas". Sem esse filtro taxonômico fundamental, a análise de confiabilidade sofreria distorções metodológicas graves. Misturar em um mesmo diagrama de falhas o colapso estrutural de um implemento agrícola com a quebra de um cabeçote *harvester* inviabilizaria totalmente a identificação precisa das verdadeiras causas raízes.

5.2 DESENVOLVIMENTO DA TAXONOMIA BASEADA NA ISO 14224

Para o desenvolvimento prático e a estruturação da árvore de ativos deste trabalho, definiu-se a classe mecânica de Tratores como o projeto-piloto. A escolha desta classe justifica-se pela sua alta complexidade sistêmica e pela sua presença maciça em praticamente todas as etapas do ciclo florestal. A taxonomia completa, uma vez validada para os tratores, serviu como modelo base e foi posteriormente replicada e adaptada para as demais classes mecânicas da frota, como mostrado na Figura 7.

O processo de estruturação se iniciou com uma imersão técnica na composição física do equipamento. Para isso, o estudo se baseou primeiramente no catálogo de peças originais disponibilizado pelo fabricante da máquina e no catálogo digital interativo presente no sistema de manutenção utilizado pela empresa.

Com essa base de dados primária em mãos, os critérios normativos estabelecidos anteriormente (definição de sistemas por função, estabelecimento de

limites de fronteira e seleção hierárquica) foram aplicados rigorosamente a todos os componentes listados no catálogo. Adicionalmente, utilizou-se o plano de manutenção preventiva da frota como balizador de qualidade. Esse cruzamento garantiu que todos os componentes manuteníveis citados nas rotinas de inspeção e troca preventiva fossem obrigatoriamente contemplados na taxonomia modelo, garantindo a integração entre as estratégias corretivas e preventivas no sistema de gestão.

A aplicação desta metodologia resultou na consolidação estrutural da máquina em 21 sistemas veiculares primários, os quais são descritos na sequência:

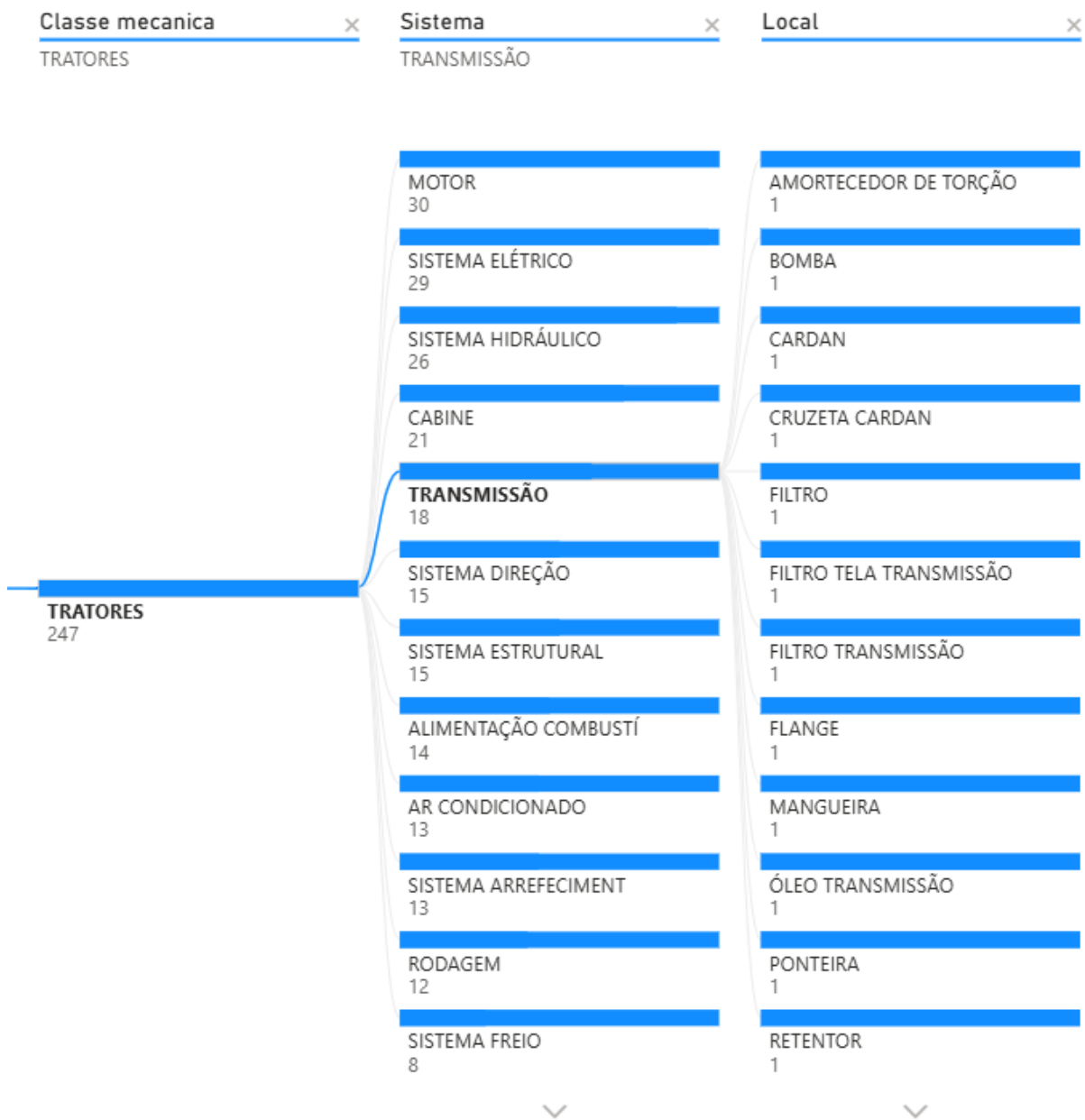
- **Acessórios:** Engloba itens adicionais não vitais para a locomoção básica, mas essenciais para a operação ou comodidade, como monitores de GPS, rádios e antenas.
- **Acoplamento:** Sistema responsável pela interface mecânica com implementos, compreendendo o engate de três pontos, barra de tração, estabilizadores e pinos.
- **Alimentação de Ar:** Componentes da admissão, desde a captação e filtros de ar, passando pelo turbocompressor, até o coletor de admissão do motor.
- **Alimentação de Combustível:** Sistema de injeção e suprimento, abrangendo tanque de combustível, bombas alimentadoras, bomba injetora/alta pressão, bicos injetores, tubulações e filtros.
- **Ar Condicionado:** Conjunto de climatização da cabine, contendo compressor, condensador, evaporador, válvulas de expansão, filtros de cabine e mangueiras.
- **Cabine:** Estrutura física do posto de operação, incluindo vidros, portas, banco do operador, revestimentos, amortecedores da cabine e painéis físicos.
- **Conjunto de Proteções:** Conjunto de chapas, grades, peitos de aço e anteparos desenvolvidos para proteger os componentes vitais da máquina contra impactos no ambiente florestal.
- **Diferencial:** Conjunto de engrenagens (coroa e pinhão) responsável pela transferência e divisão de torque para os semieixos, incluindo o sistema de bloqueio do diferencial.
- **Eixo Dianteiro:** Estrutura direcional e/ou tracionada frontal, englobando a carcaça do eixo, cubos de roda, cruzetas e redutores finais dianteiros.

- **Motor:** O bloco propulsor central e seus componentes mecânicos internos, como cabeçote, válvulas, pistões, bielas, eixo virabrequim e comando de válvulas.
- **PTO (Tomada de Potência):** Sistema de transferência de energia mecânica para implementos rotativos, contendo eixo de saída, embreagem da PTO, retentores e engrenagens específicas.
- **Rodagem:** Conjunto de interface com o solo, constituído por pneus, aros (rodas), válvulas de ar, parafusos de fixação e contrapesos de roda.
- **Sistema de Arrefecimento:** Responsável pelo controle térmico do motor, englobando o radiador, bomba d'água, válvula termostática, ventilador (hélice/viscoso) e mangueiras.
- **Sistema de Direção:** Componentes que direcionam o equipamento, incluindo o volante, válvula orbitrol, cilindros de direção hidráulica e barras de direção.
- **Sistema Elétrico:** Engloba a geração, armazenamento e distribuição de energia, contendo baterias, alternador, motor de partida, chicotes elétricos, sensores, faróis e módulos eletrônicos (ECUs, *Electronic Control Unit* – Unidade de controle Eletrônico).
- **Sistema de Escape:** Componentes de exaustão de gases, desde o coletor de escape e até o silencioso, tubo de escape e sistemas de pós-tratamento de gases.
- **Sistema Estrutural:** O esqueleto principal do equipamento, formado pelo chassi, suportes fixos, contrapesos dianteiros e pontos de ancoragem gerais.
- **Sistema de Freio:** Conjunto responsável pela desaceleração e imobilização, abrangendo discos de freio, atuadores, cilindros mestres, linhas de fluido e freio de estacionamento.
- **Sistema Hidráulico:** Sistema de força fluida para trabalho, composto pelo reservatório, bomba hidráulica principal, bloco de válvulas, VCRs – Válvula de Controle Remoto, mangueiras de pressão e cilindros de elevação.
- **Transmissão:** Conjunto de variação de velocidade e torque, englobando a caixa de câmbio (mecânica ou automática), embreagem principal, eixos internos e pacote de discos.

Esta divisão criteriosa eliminou o uso de termos genéricos no preenchimento das ordens de serviço, permitindo que a engenharia de manutenção rastreasse com

exatidão matemática a origem de cada hora de indisponibilidade da frota. A Figura 7 mostra o esquema da árvore taxonômica construída.

Figura 7 - Parte da árvore taxonômica construída.



Fonte: Autoria própria.

5.3 AQUISIÇÃO DE DADOS E A USABILIDADE DO SISTEMA

A eficácia do diagrama de perfil de perdas (Pareto) depende intrinsecamente da qualidade e da veracidade dos dados coletados na base da operação. Por essa razão, a construção da taxonomia exigiu um pensamento estratégico focado na usabilidade. Não basta que a árvore de ativos seja tecnicamente irretocável sob a ótica estrita da engenharia de confiabilidade; ela precisa ser, antes de tudo, extremamente intuitiva para quem efetivamente realiza o apontamento. Se a estrutura sistêmica for excessivamente complexa, abstrata ou burocrática, cria-se uma barreira de entrada que invariavelmente resulta em registros incorretos ou genéricos.

Para garantir essa fluidez e assertividade na aquisição dos dados, o desenvolvimento da taxonomia considerou minuciosamente a condição e o perfil do usuário final responsável por gerar a ordem de manutenção corretiva: o mecânico. É fundamental contextualizar o cenário de atuação deste profissional. Nas operações de silvicultura, o apontamento de uma falha corretiva raramente ocorre em um ambiente controlado, limpo e adequado, como as instalações de uma oficina central. Na grande maioria dos casos, o diagnóstico e a intervenção acontecem diretamente no campo (no talhão), exatamente no local remoto onde a máquina sofreu a quebra.

Neste ambiente, o mecânico se encontra frequentemente submetido a condições ambientais adversas — como poeira, calor, chuva e relevo acidentado — somadas a forte pressão operacional para restabelecer a disponibilidade mecânica do ativo no menor tempo possível. É exatamente sob esse cenário desafiador que o colaborador precisa realizar a abertura e o encerramento da ordem de serviço, diagnosticando a falha e apontando a tríade fundamental exigida pelo sistema: Sistema, Local e Serviço realizado.

Além das limitações físicas do ambiente, há o fator tecnológico. O apontamento não é feito em um computador de mesa, mas sim via aparelho celular, utilizando o aplicativo móvel do sistema corporativo de manutenção. Devido às restrições inerentes a essa interface (telas menores, digitação dificultada pelo uso de EPIs e incidência de sol na tela), a taxonomia atua como um facilitador indispensável.

Ao encontrar opções lógicas e diretas (como "Sistema Hidráulico", "Motor" ou "Material Rodante") que refletem o seu vocabulário técnico diário, o mecânico consegue navegar pelas listas suspensas do aplicativo e registrar o evento de falha de forma rápida e precisa. Portanto, a taxonomia intuitiva é a ponte que garante que

o esforço do mecânico no campo se traduza em informações "limpas" e estruturadas no banco de dados, viabilizando o posterior processamento estatístico e a tomada de decisão por parte da engenharia de manutenção.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação prática da taxonomia baseada na norma ABNT NBR ISO 14224 permitiu a reestruturação do banco de dados do sistema de gestão de manutenção da frota florestal estudada. Com a adoção de padrões técnicos para o apontamento das falhas por parte dos mecânicos em campo — eliminando o uso de termos genéricos e adotando a tríade de sistema, local e serviço, tornou-se possível realizar o saneamento do histórico recente de ordens de serviço e extrair informações com alto grau de confiabilidade e rastreabilidade.

O foco principal desta etapa analítica recaiu estritamente sobre as intervenções de manutenção corretiva. Na dinâmica da silvicultura, são estas as ocorrências que representam as quebras não programadas, impactando de forma severa a disponibilidade física dos equipamentos e gerando o custo de oportunidade pela interrupção do preparo de solo, plantio ou colheita. A partir do processamento dos dados extraídos do sistema, quantificou-se o tempo de máquina parada, medido em horas, atrelado a cada um dos sistemas veiculares previamente mapeados na árvore de ativos.

Para transformar esse volume de dados operacionais em inteligência estratégica de engenharia, os resultados foram consolidados e dispostos através da elaboração do diagrama de perfil de perdas estratificado. Os resultados e gráficos apresentados nas seções seguintes não apenas evidenciam estatisticamente a distribuição da indisponibilidade, mas também fornecem o embasamento empírico necessário para as discussões técnicas. A identificação visual dos sistemas ou componentes que configuram os maiores ofensores permite que a gestão direcione planos de ação focados, otimizando os recursos da oficina e atuando de forma assertiva na melhoria contínua da frota.

6.1 O PERFIL DE PERDAS DA FROTA

6.1.1 O Levantamento Quantitativo e agrupamento de dados

O processamento quantitativo para a elaboração do perfil de perdas se baseou na extração do histórico de ordens de manutenção corretiva registradas no sistema de gestão da empresa durante um período de seis meses, compreendido entre julho e dezembro de 2025. Para transformar esse volume massivo de apontamentos em dados analíticos, a métrica central adotada foi a soma das horas de permanência (tempo total de máquina parada sob intervenção da oficina ou aguardando reparo no campo).

O agrupamento desses dados utilizou como chave primária os Sistemas Veiculares (Nível 7 da ISO 14224), previamente definidos e padronizados durante a fase de desenvolvimento da taxonomia. A Tabela 1 apresenta a estratificação completa das horas de indisponibilidade, ordenando os sistemas mecânicos de forma decrescente em relação ao impacto gerado na operação.

Tabela 1 - Dados para a construção do perfil de perdas.

Sistema	Soma de Horas de Permanência (h)	% Acumulada
SISTEMA HIDRÁULICO	10069,28	27,61%
MOTOR	4690,89	40,47%
TRANSMISSÃO	4348,33	52,39%
SISTEMA ELÉTRICO	3994,20	63,35%
CABINE	3178,73	72,06%
EIXO DIANTEIRO	2618,46	79,24%
RODAGEM	944,33	81,83%
SISTEMA ESTRUTURAL	841,05	84,14%
SISTEMA ARREFECIMENTO	648,12	85,91%
SISTEMA DIREÇÃO	642,17	87,67%
ENGATE	596,26	89,31%
AR CONDICIONADO	570,99	90,87%
SISTEMA ADMISSÃO	434,34	92,07%
ACESSÓRIOS	429,38	93,24%
ACOPLAMENTO	406,79	94,36%
EIXO TRASEIRO	391,33	95,43%
SISTEMA ESCAPE	356,60	96,41%
ESTRUTURAL	308,15	97,25%
DIFERENCIAL	295,92	98,07%
ALIMENTAÇÃO COMBUSTÍVEL	249,45	98,75%

SISTEMA EMBREAGEM	227,50	99,37%
CJ. PROTEÇÕES	59,52	99,54%
SISTEMA FREIO	46,82	99,66%
IMPLEMENTO	35,00	99,76%
ALIMENTAÇÃO AR	24,56	99,83%
SEGURANÇA	22,11	99,89%
RODANTE	18,81	99,94%
EQUIPAMENTO (COMPLETO)	9,98	99,97%
PULVERIZAÇÃO	5,78	99,98%
TREM DE FORÇA	3,45	99,99%
EQUIPAMENTO (LUBRIFICAÇÃO)	2,52	100,00%
SUSPENSÃO	0,05	100,00%
COMANDO FINAIS	0,00	100,00%

Fonte: Autoria própria.

A análise da Tabela 1 evidencia a aplicabilidade prática do princípio de Pareto no controle da qualidade e na gestão de frotas florestais. Ao agrupar os dados e calcular a representatividade de cada conjunto ao longo desses seis meses, observa-se uma forte concentração do tempo de indisponibilidade em um número reduzido de sistemas. De um total de mais de 30 categorias de componentes e serviços apontados no histórico, apenas os seis primeiros sistemas listados — Sistema Hidráulico, Motor, Transmissão, Sistema Elétrico, Cabine e Eixo Dianteiro — são responsáveis, juntos, por 79,24% de todas as horas paradas da frota analisada.

O Sistema Hidráulico, isoladamente, desponta como o maior ofensor crítico da operação no período, acumulando mais de 10.069 horas de permanência e representando 27,61% das perdas totais. Essa consolidação tabular comprova que a indisponibilidade não está distribuída de maneira uniforme pela máquina, mas sim concentrada nos chamados "pontos vitais". É a partir deste agrupamento de dados limpos que se torna possível a construção gráfica do diagrama de Pareto, fornecendo o recurso visual definitivo para direcionar as tomadas de decisão da engenharia de confiabilidade.

6.2 CONSTRUÇÃO E INTERATIVIDADE DO PAINEL GERENCIAL EM *POWER BI*

Para que a estruturação taxonômica e o tratamento de dados não se limitassem a um estudo analítico estático, a etapa de apresentação dos resultados foi desenvolvida utilizando o *software* de *Business Intelligence Power BI*. A escolha dessa

ferramenta se justifica pela necessidade de estabelecer uma rotina de atualização de dados mais prática e ágil, garantindo que as informações de confiabilidade fiquem permanentemente disponíveis e acessíveis para consulta de todo o corpo de engenharia de manutenção.

A disposição visual do painel gerencial foi projetada estrategicamente para auxiliar na análise crítica durante as reuniões de apresentação de resultados. O layout adota uma hierarquia da informação que fornece uma visão detalhada e, ao mesmo tempo, facilita a rastreabilidade dos dados. Na porção central e à esquerda do painel, a visualização é composta por dois gráficos de Pareto interativos e complementares:

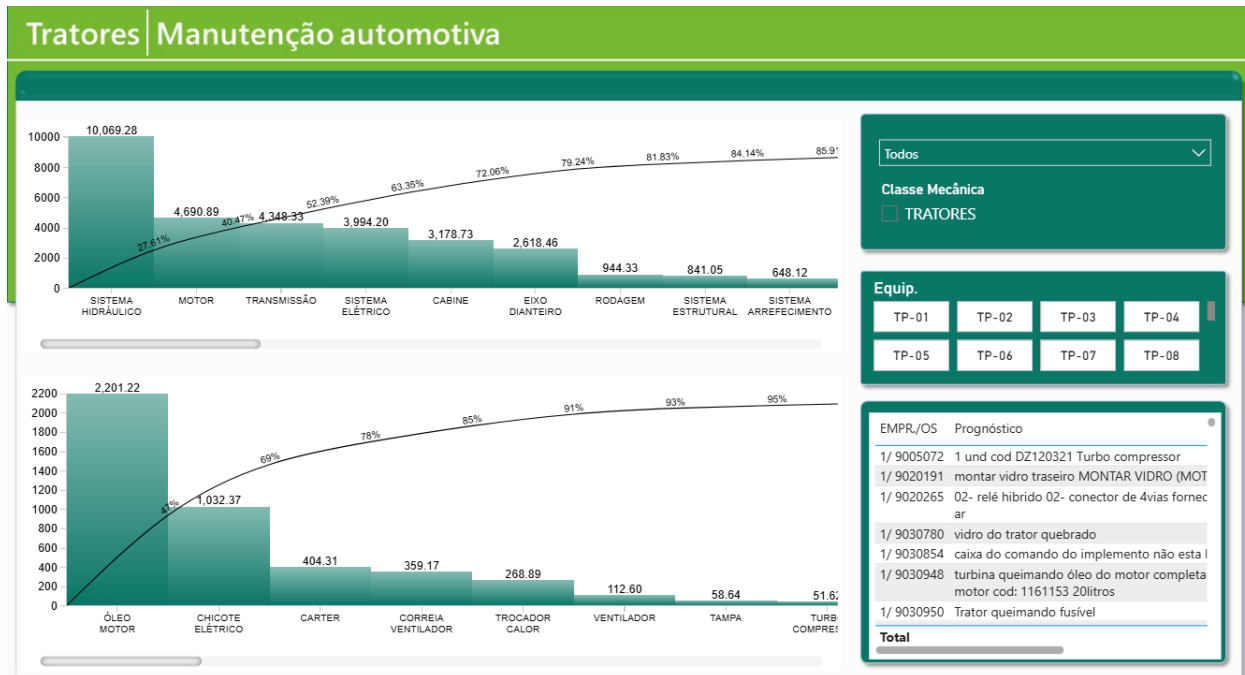
6.2.1 Pareto Principal (Superior)

Apresenta os dados macro consolidados e classificados pelos Sistemas veiculares do trator (como Sistema Hidráulico, Motor e Transmissão) em função das horas paradas, permitindo a identificação imediata do sistema ofensor.

6.2.2 Pareto Secundário (Inferior)

Estratifica os dados em um nível de detalhamento superior, exibindo os Locais e Componentes. A interatividade da ferramenta permite que, ao selecionar um sistema específico no gráfico superior, o gráfico inferior seja automaticamente filtrado. Dessa forma, a tela passa a exibir exclusivamente os componentes atrelados aquele sistema específico, orientando a investigação técnica. A Figura 8 mostra o *Dashboard* interativo construído em *Power BI*.

Figura 8 – Dashboard Diagrama de Pareto.



Fonte: Autoria própria.

Para garantir a flexibilidade da análise, a lateral direita do painel dispõe de filtros dinâmicos por "Classe Mecânica" e por período de abrangência. Abaixo desses seletores, apresenta-se a relação da frota de equipamentos (identificados por tags como TP-01, TP-02, etc.). Estes elementos funcionam como filtros cruzados de usabilidade intuitiva: ao selecionar uma máquina específica, todos os gráficos do painel são recalculados em tempo real para exibir apenas o histórico corretivo daquele ativo em questão, permitindo comparações de desempenho isoladas.

Por fim, para conectar o dado estatístico a realidade da operação florestal, o canto inferior direito do painel exibe um quadro analítico com as Ordens de Serviço (OS) que alimentam os gráficos esboçados. Esta tabela apresenta o número da OS, o tempo de permanência de cada intervenção e o campo de "Prognóstico" — o espaço descritivo onde o mecânico detalha, com suas próprias palavras e direto do campo, a falha encontrada ou o serviço realizado. Esse recurso é vital para a engenharia, pois permite que o analista parta da barra do gráfico de Pareto e chegue até o relato exato da causa raiz, fechando o ciclo completo de rastreabilidade da informação metodológica.

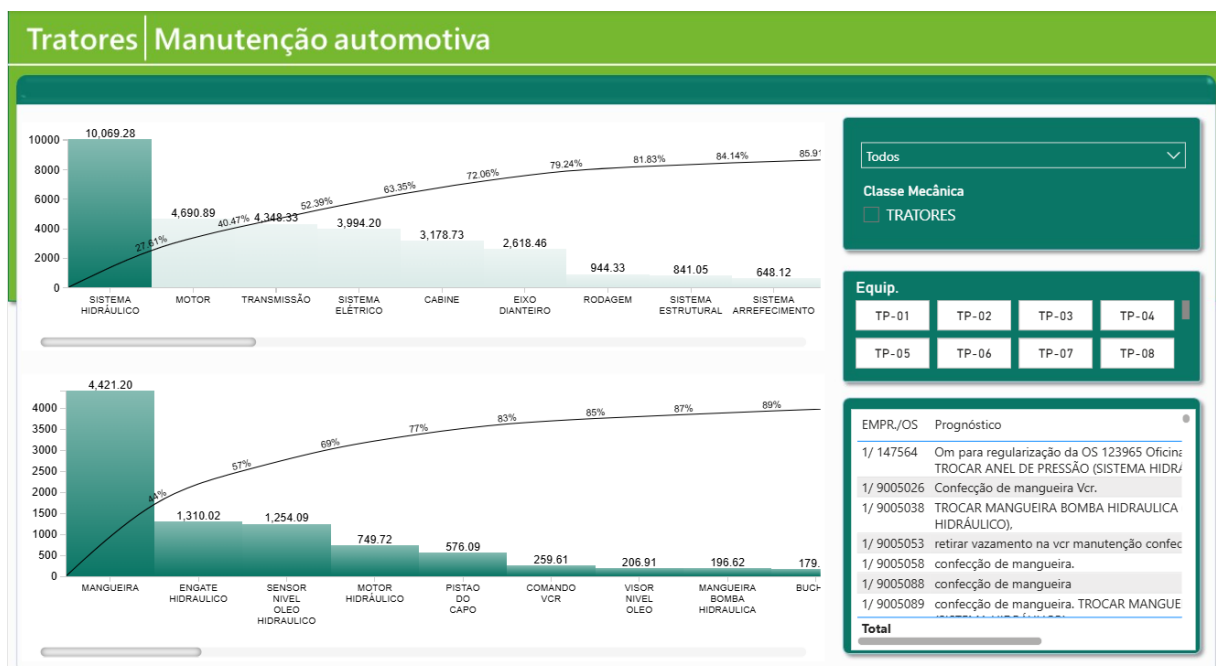
6.3 ANÁLISE TÉCNICA DOS PRINCIPAIS OFENSORES

A estruturação dos dados e a visualização gráfica através do diagrama de Pareto cumprem o papel de direcionar o foco da gestão, mas o verdadeiro valor da engenharia de manutenção reside na interpretação técnica desses números. A identificação de um sistema ofensor é apenas a primeira etapa do processo de melhoria contínua; a segunda etapa consiste em utilizar a rastreabilidade da taxonomia para descer ao nível do componente (Nível 8 da ISO 14224) e investigar os mecanismos de falha que justificam essa alta indisponibilidade.

6.3.1 O Sistema Hidráulico e a Vulnerabilidade de Mangueiras e Engates

Conforme evidenciado pelo diagrama de Pareto principal, o Sistema Hidráulico consolidou-se como o gargalo crítico da operação de tratores na silvicultura, sendo responsável por 27,61% das perdas totais (10.069 horas de máquina parada). Ao utilizar o recurso de interatividade do painel gerencial para filtrar este sistema específico, o gráfico de Pareto secundário revelou os reais causadores dessa indisponibilidade. A Figura 9 mostra o *Dashboard* evidenciando as falhas do sistema hidráulico.

Figura 9 – Dashboard Diagrama de Pareto (Sistema Hidráulico).



Fonte: Autoria própria.

A estratificação por componentes demonstra que as "Mangueiras" lideram isoladamente as falhas do sistema, acumulando 4.421 horas paradas (representando 44% de todas as quebras hidráulicas), seguidas pelos "Engates Hidráulicos" (1.310 horas) e "Sensores de Nível" (1.254 horas). A leitura do campo de prognóstico das ordens de serviço corrobora esse cenário, evidenciando uma alta frequência de serviços de "confeção e troca de mangueiras" e "retirada de vazamentos em VCRs" (Válvulas de Controle Remoto).

Sob a ótica da engenharia mecânica e das condições de operação florestal, essa alta incidência de falhas funcionais nestes componentes é justificada por três fatores técnicos primários:

6.3.1.1 Severidade do Ambiente e Impacto Mecânico

Diferentemente de aplicações agrícolas convencionais, o preparo de solo e o plantio de eucalipto ocorrem em terrenos com alta presença de tocos, galhos secos e palhada. As mangueiras hidráulicas, especialmente aquelas que fazem a interface entre o trator e o implemento, ficam expostas. O choque mecânico constante contra esses obstáculos físicos causa o rompimento súbito das tramas de aço de reforço da mangueira, gerando vazamentos catastróficos e a parada imediata do equipamento por falta de fluido ou perda de pressão no sistema.

6.3.1.2 Abrasão e Fadiga Dinâmica

As linhas hidráulicas de tratores florestais operam sob altos picos de pressão e sofrem constante articulação durante as manobras. O atrito contínuo (abrasão) das mangueiras contra o chassi da máquina, contra outras mangueiras ou contra partes móveis do implemento degrada a cobertura externa de borracha. Somado a isso, os ciclos de pressurização e despressurização geram fadiga no material, culminando no estouro prematuro do componente antes do fim de sua vida útil projetada.

6.3.1.3 Contaminação e Desgaste de Engates

A rotina operacional exige o acoplamento e desacoplamento frequente de diferentes implementos. No ambiente do talhão, que possui alta concentração de material particulado (poeira abrasiva), essas conexões estão altamente suscetíveis à contaminação. A entrada de sílica nos engates rápidos e VCRs durante a troca de implementos atua como um agente abrasivo interno, desgastando os anéis de vedação (*O-rings*), riscando camisas de válvulas e gerando vazamentos crônicos e perda de carga no sistema.

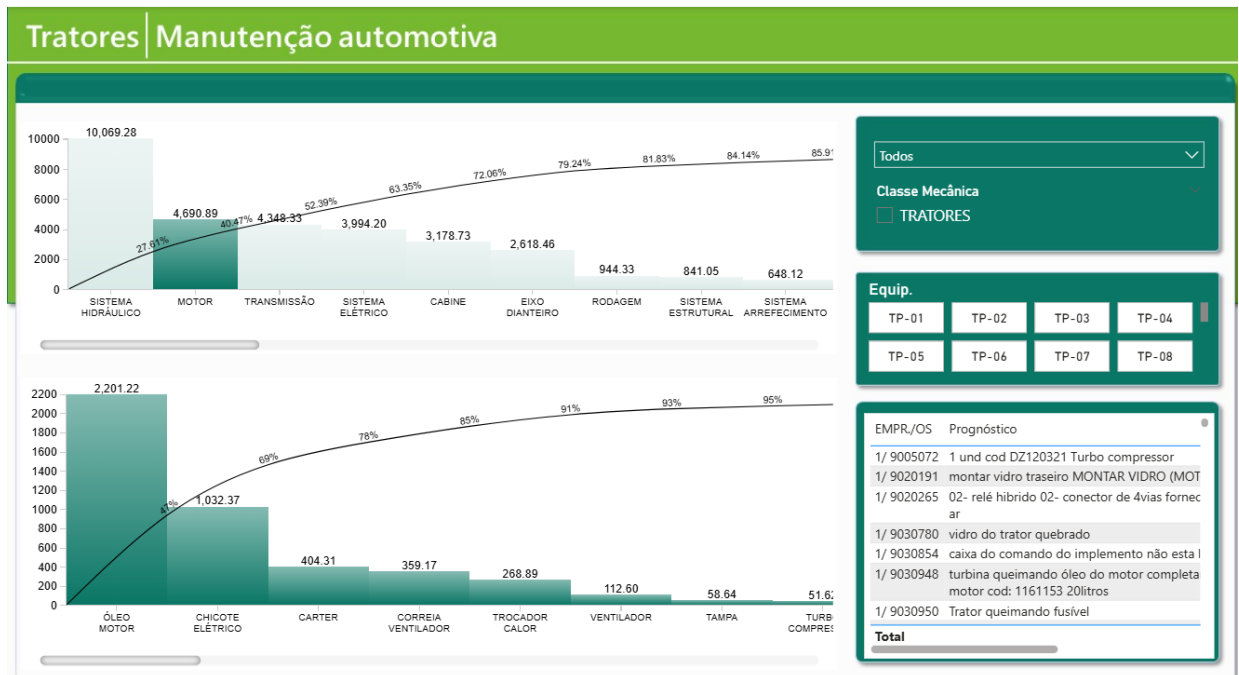
6.3.1.4 Direcionamento e Planos de Ação

A partir dessa análise de causa raiz baseada em dados, a engenharia de confiabilidade possui o embasamento necessário para propor melhorias direcionadas. Para mitigar o impacto do Sistema Hidráulico, recomenda-se a revisão do "Conjunto de Proteções" (mapeado na taxonomia) para blindar os feixes de mangueiras mais expostos, utilizando espirais plásticas de alta densidade ou malhas metálicas. Adicionalmente, o plano de manutenção preventiva deve ser ajustado para incluir rotinas rigorosas de inspeção visual de abrasão em mangueiras, promovendo a substituição preditiva do componente antes do rompimento no campo, além do treinamento constante dos operadores quanto a limpeza dos engates antes de qualquer acoplamento.

6.3.2 O Sistema Propulsor (Motor) e o Impacto do Regime Severo

Ocupando a segunda posição no diagrama de Pareto macro, o Motor foi responsável por 4.690,89 horas de indisponibilidade, elevando a porcentagem acumulada de perdas da frota para 40,47%. Ao aplicar o filtro neste sistema específico no painel de *Business Intelligence*, Figura 10, o gráfico secundário estratificou as falhas, revelando uma forte concentração em três itens manuteníveis principais: "Óleo do Motor" (2.201,22 horas, representando 47% das paradas deste sistema), "Chicote Elétrico" do motor (1.032,37 horas) e o "Cárter" (404,31 horas).

Figura 10 - Dashboard Diagrama de Pareto (Motor).



Fonte: Autoria própria.

A análise cruzada destes componentes com os campos de prognóstico das Ordens de Serviço (onde relata-se, por exemplo, "turbina queimando óleo do motor" e "trator queimando fusível") permite a engenharia diagnosticar os mecanismos de falha atrelados a severidade da operação florestal:

6.3.2.1 Degradação e Consumo Anômalo de Óleo

A liderança do "Óleo do Motor" como ofensor corretivo indica falhas funcionais ligadas ao consumo excessivo de lubrificante e perda de propriedades físico-químicas. Na silvicultura, os tratores operam em regime de alto torque e baixa velocidade, o que gera um estresse térmico severo no bloco propulsor. O relato de queima de óleo pela turbina evidencia o desgaste prematuro dos mancais e selos de vedação do turbocompressor. Esse desgaste é frequentemente acelerado pela admissão de micropartículas de poeira (comum no preparo de solo) que ultrapassam os filtros de ar e atuam como abrasivos nas palhetas da turbina e nas camisas dos cilindros, gerando *blow-by* (passagem de compressão) e alto consumo de óleo.

6.3.2.2 *Avarias no Chicote Elétrico*

O chicote elétrico do motor está submetido a um ambiente de altíssima vibração mecânica e ciclos extremos de temperatura. No entanto, no ambiente de colheita e plantio, soma-se a isso o atrito constante com galhos e cipós que eventualmente invadem o compartimento do motor. A fricção rompe a isolação dos cabos, causando curtos-circuitos em contato com o bloco metálico (justificando a queima constante de fusíveis e falhas de comunicação com a ECU – *Electronic Control Unit*, Unidade de Controle Eletrônico).

6.3.2.3 *Choque Mecânico no Câster*

O registro de mais de 400 horas paradas devido a manutenções no câster ilustra perfeitamente o risco do terreno florestal. Tratores agrícolas adaptados para a silvicultura frequentemente trafegam sobre tocos e remanescentes de colheita. Quando os conjuntos de proteção inferior falham ou são insuficientes, o choque mecânico direto dos tocos contra o fundo do motor causa o amassamento ou o trincamento do câster, resultando em vazamento massivo de óleo e risco de fundir o motor por falta de lubrificação.

6.3.2.4 *Direcionamento e Planos de Ação*

Para a contenção destas falhas, a engenharia deve atuar em frentes distintas. Para o controle do consumo de óleo e preservação do turbo, recomenda-se a intensificação do plano de manutenção preditiva através da análise físico-química do óleo lubrificante, permitindo identificar o desgaste interno antes da quebra funcional. Além disso, deve-se revisar rigorosamente as rotinas de limpeza e troca dos elementos do "Sistema de Alimentação de Ar".

Para o chicote elétrico, sugere-se a aplicação de conduítes corrugados de alta temperatura e reposicionamento das rotas de cabos mais expostas. Por fim, a reincidência de quebras no câster exige uma ação estrutural: a engenharia deve redimensionar o "Conjunto de Proteções" (peito de aço inferior), garantindo a blindagem total da parte inferior do bloco do motor contra o impacto de tocos.

6.4 IMPACTOS GERENCIAIS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO

A estruturação taxonômica e a geração do diagrama de Pareto transcendem a análise puramente mecânica das falhas. A eficiência do setor florestal depende da capacidade de transformar esses registros de reparo em inteligência para a tomada de decisão. A consolidação do perfil de perdas promove uma transformação direta na forma como a engenharia administra seus processos diários, gerando impactos em três esferas gerenciais fundamentais:

6.4.1 Otimização de Recursos

Historicamente, gestores de manutenção sem acesso a dados estruturados tendem a diluir seus esforços técnicos e orçamentos de forma igualitária por todos os sistemas da máquina. O emprego da metodologia proposta quebra esse paradigma. O diagrama de Pareto se baseia no princípio de que, na maioria dos processos, 80% das consequências advêm de 20% das causas.

Ao evidenciar que o Sistema Hidráulico e o Motor concentram a esmagadora maioria das paradas, a aplicação sistêmica dessa ferramenta permite priorizar recursos escassos em problemas de maior impacto. A alocação de capital humano (direcionando os mecânicos mais experientes) e financeiro (verba para melhorias e proteções) passa a ser focada exclusivamente na resolução dos ofensores principais. Essa ação assertiva garante um retorno sobre o investimento (ROI) muito mais rápido no aumento da disponibilidade física da frota.

6.4.2 Gestão de Estoque (MTTR)

O indicador de Manutenibilidade (MTTR - Tempo Médio Para Reparo) é profundamente impactado pela logística e suprimentos. Quando uma máquina quebra no talhão, o tempo que ela permanece parada não é composto apenas pelas horas de serviço do mecânico, mas, muitas vezes, pelo tempo aguardando a chegada de peças.

A partir da estratificação do Pareto por locais (Nível 8 da ISO 14224), a engenharia tem o mapeamento exato das peças que mais falham na operação

corretiva. Ao constatar que mangueiras, engates de VCR e componentes de vedação do motor lideram a indisponibilidade, o setor de planejamento e o almoxarifado recebem uma diretriz estatística clara de consumo. Garantir o dimensionamento correto do estoque mínimo (curva ABC) para esses componentes críticos reduz drasticamente as horas de espera, derrubando o MTTR e colocando o trator rapidamente de volta em operação.

6.4.3 Retroalimentação do Plano Preventivo

No ambiente severo da silvicultura, a gestão deve evoluir da simples reparação (manutenção corretiva) para estratégias baseadas na condição e no tempo de operação (manutenção preditiva e preventiva). O levantamento do perfil de perdas atua como o principal indicador da eficácia das estratégias atuais.

Um alto índice de intervenções corretivas em um sistema específico é o sintoma claro de que o atual plano de manutenção preventiva possui lacunas ou não está sendo cumprido adequadamente. O painel gerencial atua como uma ferramenta de retroalimentação contínua: os dados de quebra indicam onde a preventiva falhou. Se os chicotes elétricos ou as mangueiras hidráulicas apresentam falhas frequentes no campo, a engenharia deve revisar o plano mestre, reduzindo os intervalos de inspeção, incluindo novas rotinas de lubrificação ou substituindo o componente preditivamente antes do fim de sua vida útil. Dessa forma, cria-se um ciclo de melhoria contínua orientado por dados.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu com êxito os objetivos propostos ao demonstrar a viabilidade e a importância da implementação sistêmica do diagrama de perfil de perdas (Pareto) na gestão da manutenção automotiva florestal. Diante da alta complexidade gerada pela diversidade de equipamentos no ciclo do eucalipto, o estudo comprovou que a engenharia de confiabilidade não pode atuar de forma eficiente sem a garantia de dados de qualidade. O registro genérico de falhas, que historicamente inviabilizava a análise estatística, foi solucionado através da criação de padrões técnicos de entrada de dados.

A aplicação das diretrizes normativas da ABNT NBR ISO 14224 provou ser o alicerce fundamental para esta padronização. O desenvolvimento da taxonomia e da árvore de ativos, utilizando a classe de Tratores como modelo, permitiu sanar os problemas estruturais de "dados sujos" nos *softwares* de gestão. Ao definir limites de fronteira claros e estabelecer níveis hierárquicos focados em sistemas e componentes manuteníveis, o apontamento das ordens de manutenção no campo se tornou rastreável e fidedigno.

Com o banco de dados saneado, o processamento e a estratificação das horas de máquina parada validaram na prática o princípio estatístico de Pareto na silvicultura. A elaboração dos painéis gerenciais interativos evidenciou que a indisponibilidade da frota não ocorre de forma aleatória ou uniforme, mas concentra-se em "poucos vitais". A identificação do Sistema Hidráulico e do Motor como os maiores ofensores corretivos forneceu a gestão a inteligência necessária para atuar de forma assertiva na causa raiz dos problemas.

Isto porque os resultados quantitativos comprovaram a aplicabilidade empírica do princípio de Pareto no setor, evidenciando que 79,24% das horas paradas da frota se concentraram em apenas seis sistemas vitais. O Sistema Hidráulico despontou como o mais crítico, representando 27,61% das perdas totais de disponibilidade, sendo fortemente impactado pelo rompimento de mangueiras e desgaste de engates devido a severidade do ambiente no campo.

Conclui-se que a união entre a estruturação de dados e a estratificação visual transforma a rotina do setor. A gestão evolui de uma postura de simples reparação para uma atuação estratégica. O direcionamento de planos de ação focados nos componentes críticos otimiza os recursos financeiros e humanos, melhora os

indicadores de manutenibilidade (MTTR) através do dimensionamento correto de estoques, e fornece a retroalimentação essencial para o aprimoramento contínuo dos planos de manutenção preventiva. Dessa forma, o trabalho entrega uma metodologia sólida e replicável para aumentar a disponibilidade física e a rentabilidade das operações florestais mecanizadas.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para futuros trabalhos:

- Expandir e validação da taxonomia completa para os equipamentos de alta complexidade da linha de colheita (*harvesters* e *forwarders*);
- Integração da árvore de ativos com sistemas de telemetria embarcada e sensores IoT (Internet das Coisas), que implicaria na automatização da abertura de ordens de serviço por falhas potenciais e elevaria a gestão da frota ao patamar da manutenção preditiva 4.0.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14224: Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos. Rio de Janeiro, 2011.

COSTA, A.F.B.; EPPRECHT, E.K.; CARPINETTI, L.C.R. Controle Estatístico da Qualidade, Atlas, 2 ed., 2009.

DEERE, J. Peças John Deere | Peças e Serviços | John Deere BR. Disponível em: Disponível em: <<https://partscatalog.deere.com/jdrc/>>. Acesso em: 23 fev. 2026.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. Manutenção: função estratégica. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

MONTGOMERY, D.C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade, LTC, 4 ed., 2004.

NBR 5462. Confiabilidade e manutenibilidade – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

SIQUEIRA, I. P. Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2005.

VIANA, Herbert. Manual de Gestão da Manutenção: Volume 1. 1. ed. Brasília: ENGETELES Editora, 2020.

VIANA, Herbert. Manual de Gestão da Manutenção: Volume 2. 1. ed. Brasília: ENGETELES Editora, 2021.

XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva. [s.l.] Falconi Editora, 2014.