



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MATEUS DO AMARAL DUTRA ARAUJO

**DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE GESTÃO DE
MANUTENÇÃO DE CARRETAS E CAVALOS EM
OPERAÇÕES LOGÍSTICAS FLORESTAIS**

Área: Engenharia De Operações E Processos Da Produção

Campo Grande, MS
2025



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MATEUS DO AMARAL DUTRA ARAUJO

**DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO DE
CARRETAS E CAVALOS EM OPERAÇÕES LOGÍSTICAS
FLORESTAIS**

Área: Engenharia De Operações E Processos Da Produção

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul.
Orientador: Marcos Lucas de
Oliveira

Campo Grande, MS
2025



RESUMO

A eficiência da manutenção de frotas pesadas em operações florestais é decisiva para a disponibilidade operacional e para a continuidade do fluxo logístico. Este estudo teve por objetivo avaliar o sistema de gestão de manutenção dos ativos utilizados nas composições com seis carretas de uma empresa de celulose. Trata-se de pesquisa aplicada, descritiva e quantitativa, conduzida como estudo empírico, com análise das ordens de manutenção registradas no SAP (Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados) entre maio e outubro de 2025. Foram calculados os indicadores MTBF (Tempo Médio Entre Falhas), MTTR (Tempo Médio para Reparo), disponibilidade mecânica, aderência preventiva, padrões de falhas e consumo de materiais, além da aplicação da análise de Pareto para identificar as causas mais significativas. Os resultados mostraram MTTR baixo, porém acompanhado de queda do MTBF e da disponibilidade, evidenciando alta recorrência de falhas e desgaste acelerado de componentes. As falhas concentraram-se em sistemas estruturais, reforçando o impacto das condições operacionais sobre a confiabilidade. A elevada aderência preventiva não evitou falhas prematuras. Portanto, o sistema de manutenção apresenta limitações relacionadas à prevenção, ao controle de backlog e à qualidade dos registros, exigindo revisão dos intervalos preventivos e reforço das inspeções nos subsistemas críticos. Trabalhos futuros poderão ampliar a série histórica, aplicar técnicas preditivas por condição, avaliar melhorias estruturais e elevar a acurácia dos registros no SAP para aumentar a confiabilidade dos indicadores.

Palavras-chave: Confiabilidade; Disponibilidade; Logística Florestal; Manutenção.



ABSTRACT

The efficiency of maintenance in heavy fleets operating in forestry logistics is decisive for operational availability and continuity of the supply flow. This study aimed to evaluate the maintenance management system of the assets used in six-trailer compositions of a pulp company. It is an applied, descriptive, and quantitative research conducted as an empirical study, based on the analysis of maintenance orders recorded in SAP (Systems, Applications, and Products in Data Processing) between May and October 2025. The indicators MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time to Repair), mechanical availability, preventive adherence, failure patterns, and material consumption were calculated, and Pareto analysis was applied to identify the most significant causes. The results showed a low MTTR accompanied by a decline in MTBF and mechanical availability, indicating a high recurrence of failures and accelerated component wear. Failures were concentrated in structural systems, reinforcing the influence of operating conditions on reliability. The high preventive adherence did not prevent premature failures, highlighting limitations in the preventive plan, backlog control, and data quality. Future studies may expand the historical series analyzed, apply condition-based predictive techniques, evaluate structural interventions to reduce repeated failure modes, and improve the accuracy of maintenance records in SAP to increase the reliability of the indicators.

Keywords: Availability; Forestry Logistics; Maintenance; Reliability.



LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CMMS – *Computerized Maintenance Management System* (Sistema Computadorizado de Gestão da Manutenção)

DM – Disponibilidade Mecânica

ISO – *International Organization for Standardization*

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

MTTR – *Mean Time to Repair* (Tempo Médio para Reparo)

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

RCM – *Reliability-Centered Maintenance* (Manutenção Centrada na Confiabilidade)

SAP – *Systems, Applications, and Products in Data Processing*

TPM – *Total Productive Maintenance* (Manutenção Produtiva Total)



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre literatura e situação real	30
---	----



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cavalo mecânico	11
Figura 2 – Carreta unitária	11
Figura 3 – Fluxograma do processo de manutenção da Empresa Alfa.....	18
Figura 4 – Indicadores gerais da frota no período de maio a outubro de 2025.....	19
Figura 5 – MTBF mensal da frota (maio a outubro de 2025).....	20
Figura 6 – MTTR mensal da frota (maio a outubro de 2025).....	22
Figura 7 – Disponibilidade mecânica da frota (maio a outubro de 2025)	23
Figura 8 – Aderência acumulada à manutenção preventiva (maio a outubro de 2025).....	24
Figura 9 – Pareto de falhas por sistema (maio a outubro de 2025).....	26
Figura 10 – Pareto de falhas por causa (maio a outubro de 2025).....	26
Figura 11 – Pareto de materiais por custo (maio a outubro de 2025).....	28
Figura 12 – Pareto de materiais por quantidade (maio a outubro de 2025).....	28



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	10
2.1 Logística florestal e operações de transporte.....	10
2.2 Fundamentos de engenharia de manutenção	12
2.3 PCM.....	12
2.4 RCM	13
2.5 TPM.....	14
2.6 Sistemas informatizados de gestão da manutenção e a gestão da informação	14
2.7 Indicadores de desempenho na manutenção de frotas pesadas	15
2.8 Desafios específicos na manutenção de cavalos mecânicos e carretas em operações florestais.....	15
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	18
4.1 Análise do MTBF	19
4.2 Análise do MTTR.....	21
4.3 Análise da DM.....	22
4.4 Aderência à preventiva	23
4.5 Análise das falhas	24
4.6 Análise do consumo de materiais	27
4.7 Análise do backlog	29
4.8 Síntese integrada da análise dos resultados	29
5 CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS	33



1 INTRODUÇÃO

A logística florestal desempenha papel estratégico na competitividade da cadeia de produção de base florestal, pois a eficiência no transporte de madeira influencia diretamente o abastecimento das unidades fabris e o desempenho operacional do sistema como um todo. Em ambientes de operação com condições intensas, marcados por longas distâncias, vias não pavimentadas, cargas elevadas e condições climáticas variáveis, a confiabilidade da frota torna-se determinante para a continuidade do fluxo logístico. A literatura de engenharia de manutenção destaca que, em tais cenários, níveis elevados de esforço mecânico e variação operacional aceleram o desgaste dos ativos, ampliam a probabilidade de falhas e exigem sistemas estruturados de manutenção capazes de assegurar disponibilidade e desempenho (Mobley, 2004).

A Empresa Alfa (nome fictício), inserida neste contexto, opera composições com seis carretas atreladas destinadas ao transporte de toras de eucalipto de 2,5 metros, percorrendo estradas internas, rodovias e vias urbanas. A adversidade dessas condições impõe demandas significativas aos cavalos mecânicos e carretas, tornando imprescindível o uso de práticas robustas de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), Gestão de Ativos alinhada à norma ISO 55001 e Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), a fim de reduzir intervenções corretivas, aumentar a confiabilidade do processo e orientar decisões baseadas em risco (ISO 55001, 2021; Moubray, 1997; Mobley, 2004). Essas abordagens reforçam a importância de indicadores como *Mean Time to Repair* (MTTR), *Mean Time Between Failures* (MTBF), backlog e aderência ao plano preventivo como métricas essenciais para avaliar a eficácia do sistema de manutenção (Moreira, 2015; Fagundes; Andrade; Machado, 2016).

Entretanto, estudos apontam que grande parte das organizações enfrenta barreiras significativas na operacionalização desses sistemas, como falhas na padronização de registros, inconsistências nos tempos de intervenção, baixa confiabilidade dos dados e dificuldades na análise integrada dos indicadores (Abraman, 2023). Na Empresa Alfa, que possui aproximadamente 20 composições tracionadas, evidenciam-se desafios semelhantes.

A análise dos dados extraídos do SAP, referentes ao período de 01/05/2025 a 31/10/2025, revela variações expressivas nos tempos de reparo, espera por mecânico e disponibilidade de materiais, além de sinais de *backlog* acumulado e divergências entre programado e executado. Esses padrões são consistentes com problemas típicos de sistemas de manutenção ainda imaturos ou parcialmente estruturados, amplamente documentados na



literatura técnica (Mobley, 2004; Mayeski, 2023).

Diante desse cenário, formula-se a seguinte questão de pesquisa: em que medida o sistema atual de gestão de manutenção das carretas e cavalos utilizados nas composições da Empresa Alfa atende às boas práticas de manutenção e gestão de ativos, e quais lacunas contribuem para o aumento da indisponibilidade operacional? Essa pergunta atende aos critérios de clareza, objetividade e relevância científica propostos por Gil (2010) e por Lakatos e Marconi (2017) para formulação de problemas de pesquisa.

Assim, o objetivo geral deste estudo é avaliar o sistema de gestão de manutenção dos ativos utilizados nas composições com seis carretas de uma empresa de celulose. Os objetivos específicos incluem: (i) mapear o processo atual de manutenção corretiva e preventiva; (ii) identificar requisitos teóricos de um sistema robusto de manutenção; (iii) comparar o processo real com o modelo teórico; (iv) analisar dados operacionais relativos a MTTR, tempos de desvio, backlog e aderência ao plano; (v) avaliar impactos operacionais e financeiros da indisponibilidade; e (vi) verificar consistência dos registros de manutenção.

A relevância deste estudo manifesta-se em três dimensões: operacional, ao identificar causas de indisponibilidade que afetam o fluxo logístico; econômica, ao evidenciar o impacto direto no custo por tonelada transportada; e gerencial, ao fortalecer o processo decisório com base em indicadores e práticas de gestão de ativos reconhecidas internacionalmente. Este artigo está organizado conforme a estrutura clássica de artigos científicos: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre manutenção, PCM, confiabilidade e gestão de ativos; a Seção 3 detalha os procedimentos metodológicos; a Seção 4 expõe e analisa os resultados; a Seção 5 reúne conclusões, limitações e recomendações para estudos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Logística florestal e operações de transporte

A logística florestal caracteriza-se pela movimentação contínua de madeira entre áreas de colheita e unidades industriais, normalmente em condições adversas de operação. Essas rotas incluem estradas não pavimentadas, trechos com declividade acentuada, elevada carga transportada e longos ciclos diários, o que intensifica o desgaste dos ativos e aumenta a probabilidade de falhas mecânicas (Mayeski, 2023).

O desempenho logístico depende da confiabilidade e da disponibilidade da frota, uma vez que falhas nos cavalos mecânicos (Figura 1) ou carretas (Figura 2) podem interromper o fluxo produtivo e elevar os custos por tonelada transportada. Nesses ambientes, a alta solicitação e operacional reforça a necessidade de sistemas de manutenção estruturados, capazes de monitorar, prevenir e mitigar falhas decorrentes de vibração, contaminação, deformações estruturais e solicitações repetitivas. A Figura 1 ilustra o cavalo mecânico utilizado na operação, componente responsável pela tração das composições e diretamente exposto às solicitações mecânicas decorrentes do transporte florestal.

Figura 1 – Cavalo mecânico



Fonte: Matheus Günter Froehlich (2015).

A Figura 2 apresenta a carreta unitária empregada na formação das composições, evidenciando sua estrutura e os componentes mais sujeitos ao desgaste provocado pelas condições da operação.

Figura 2 – Carreta unitária



Fonte: METALESP (2020).

2.2 Fundamentos de engenharia de manutenção

A engenharia de manutenção apresenta diferentes estratégias aplicáveis à gestão de frotas pesadas. Entre os modelos clássicos, destacam-se a manutenção corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção corretiva consiste na intervenção após a falha e implica elevados custos, maior tempo de parada e impactos diretos sobre a disponibilidade do ativo (Mobley, 2004). A manutenção preventiva fundamenta-se em intervalos pré-estabelecidos, buscando reduzir falhas, embora possa gerar intervenções desnecessárias quando não baseada em condição real.

Por sua vez, a manutenção preditiva utiliza variáveis de monitoramento para antecipar o momento ótimo de intervenção, alinhando decisões a parâmetros de desgaste, vibração, temperatura ou contaminação, e reduzindo custos associados a reparos emergenciais (Zhu *et al.*, 2019).

A avaliação do desempenho da manutenção baseia-se em indicadores consolidados, como o *Mean Time Between Failures* (MTBF) e o *Mean Time to Repair* (MTTR). O MTBF expressa a confiabilidade do ativo, enquanto o MTTR indica a rapidez de recuperação após uma falha. A relação entre ambos determina a disponibilidade operacional (A), conforme a expressão $A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$ (Fagundes; Andrade; Machado, 2016; Moreira, 2015).

Assim como as seguintes fórmulas:

$$(I) \text{ MTBF} = \frac{\text{Tempo total de operação}}{\text{Número de falhas}}$$

$$(II) \text{ MTTR} = \frac{\text{Tempo total de reparo}}{\text{Número de reparos}}$$

$$(III) \text{ Disponibilidade (alternativa)} = \frac{T_{\text{total}} - T_{\text{parado}}}{T_{\text{total}}}$$



$$(IV) \text{ Aderência} = \frac{\text{Número de preventivas realizadas no prazo}}{\text{Número de preventivas programadas}}$$

Esses indicadores constituem referência central na análise de frotas submetidas a condições adversas de utilização.

2.3 PCM

O Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) constitui um dos pilares estruturantes da gestão de ativos, sendo responsável pela organização, priorização e acompanhamento das intervenções de manutenção. Conforme apresentado por Mobley (2004), o PCM integra atividades de programação, alocação de recursos e retroalimentação de informações, possibilitando que a execução seja conduzida de forma padronizada e sistemática. A eficiência desse processo depende da consistência dos registros, da definição de prioridades e do alinhamento entre demanda e capacidade de atendimento.

Nos dados analisados da Empresa Alfa, verificam-se oscilações significativas nos tempos de reparo, períodos prolongados de espera por mecânico e por materiais, além de indícios de backlog acumulado. Esses padrões são característicos de sistemas de manutenção em que a etapa de planejamento apresenta fragilidades, comprometendo a execução e dificultando a aderência ao plano preventivo. Assim, o referencial teórico sobre PCM é fundamental para interpretar as variações observadas nos indicadores operacionais e compreender como a ausência de padronização e de controle adequado contribui para a indisponibilidade da frota.

2.4 RCM

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), estruturada originalmente por Moubray (1997), estabelece um processo sistemático de identificação das funções de um ativo, dos modos de falha associados e das consequências operacionais decorrentes dessas falhas. O enfoque da RCM na criticidade permite definir estratégias de manutenção alinhadas ao risco, priorizando intervenções que preservem a confiabilidade e evitem consequências adversas para o processo produtivo.

A aplicação dos princípios da RCM é particularmente relevante para frotas operando



em condições adversas, como no transporte florestal. A repetição de falhas, os elevados tempos de reparo e a sensibilidade dos componentes às condições ambientais observados nos dados da Empresa Alfa reforçam a importância de uma abordagem orientada à causa-raiz. Conforme discutido por Mobley (2004), estratégias de manutenção baseadas apenas em tempo tornam-se insuficientes em ambientes de alta variabilidade operacional, demandando métodos que considerem o comportamento real dos ativos. Dessa forma, a RCM fornece o suporte conceitual para analisar a frequência das falhas identificadas no estudo e justificar a necessidade de intervenções preventivas ou preditivas mais bem direcionadas.

2.5 TPM

A Manutenção Produtiva Total (TPM) integra práticas voltadas à eliminação de perdas e ao aumento da confiabilidade por meio da participação ativa dos operadores e da padronização das rotinas de inspeção. Segundo Mobley (2004), o TPM busca fortalecer a disciplina operacional por meio de atividades simples de cuidado básico, como limpeza, lubrificação e verificação de anomalias, criando um ambiente de manutenção mais preventivo e menos dependente de intervenções emergenciais.

A relevância do TPM para o contexto deste estudo relaciona-se ao conjunto de falhas e desvios observados nos dados da empresa, que incluem inconsistências nos registros de ordens de serviço, divergências entre atividades programadas e executadas e ocorrências que poderiam ter sido evitadas por inspeções rotineiras. Em operações florestais pequenos defeitos tendem a evoluir rapidamente para falhas graves devido às condições adversas de operação. Dito isto, a implementação de práticas de TPM pode reduzir o número de corretivas, melhorar a qualidade da informação registrada no sistema e apoiar a evolução do PCM. Para tanto, o TPM se apresenta como componente fundamental para alcançar níveis superiores de confiabilidade e eficiência operacional.

2.6 Sistemas informatizados de gestão da manutenção e a gestão da informação

Os sistemas informatizados de gestão da manutenção (CMMS), como o SAP utilizado pela Empresa Alfa, desempenham papel central na organização das atividades de manutenção e na confiabilidade dos dados que subsidiam a tomada de decisão. A literatura aponta que a efetividade desses sistemas depende da consistência dos registros, da padronização das ordens



de serviço e da precisão das informações de tempo, recursos e materiais empregados (Mobley, 2004). Em ambientes de alta demanda operacional, a ausência de dados completos tende a comprometer a análise de indicadores e a interpretação das causas de indisponibilidade.

A análise realizada no período de referência para este estudo evidencia variações consideráveis nos tempos de reparo, espera por mecânico e disponibilidade de peças, além de divergências entre o programado e o executado. Esses padrões são amplamente documentados por autores que discutem maturidade de sistemas de manutenção, indicando a necessidade de aprimoramento nos processos de registro e fechamento das ordens de serviço para garantir maior confiabilidade aos indicadores extraídos. Assim, o CMMS deixa de ser apenas um repositório de informações e passa a constituir ferramenta estratégica, cuja eficácia depende diretamente da qualidade dos dados inseridos e da disciplina operacional associada ao PCM.

2.7 Indicadores de desempenho na manutenção de frotas pesadas

A avaliação do desempenho da manutenção em frotas de transporte pesado baseia-se em indicadores amplamente consolidados na literatura técnica. Entre eles, destacam-se o MTTR e o MTBF, que segundo Moreira (2015) e Fagundes, Andrade e Machado (2016), constituem métricas essenciais para caracterizar a rapidez da recuperação após falhas e a confiabilidade do ativo ao longo do tempo. A relação entre esses indicadores determina a disponibilidade operacional, parâmetro crítico em sistemas logísticos que dependem da continuidade do fluxo produtivo.

Além desses indicadores clássicos, operações florestais requerem monitoramento sistemático de elementos como backlog, aderência ao plano preventivo, tempo de espera por recursos e custos de manutenção, pois tais fatores influenciam diretamente o comportamento dos indicadores principais. A literatura aponta que atrasos na execução preventiva, acúmulo de ordens não atendidas e falhas no suprimento de materiais constituem fatores que aumentam a frequência de falhas e ampliam a variabilidade dos tempos de parada, produzindo oscilações semelhantes às observadas nos dados da Empresa Alfa. Dessa forma, os indicadores não apenas quantificam o desempenho, mas revelam a maturidade do sistema de manutenção.



2.8 Desafios específicos na manutenção de cavalos mecânicos e carretas em operações florestais

A manutenção de frotas pesadas utilizadas no setor florestal apresenta particularidades relacionadas ao ambiente de operação, que intensifica o desgaste dos componentes e aumenta a probabilidade de falhas em comparação com aplicações rodoviárias convencionais. Estudos aplicados à manutenção industrial e logística florestal demonstram que a combinação de vibração intensa, poeira, umidade, sobrecarga e irregularidades do terreno acelera a deterioração de sistemas mecânicos, pneumáticos, hidráulicos e estruturais, exigindo estratégias de manutenção mais frequentes e orientadas por condição (Mayeski, 2023; Mobley, 2004).

Essas particularidades explicam a ocorrência de falhas recorrentes, tempos elevados de reparo e variações associadas à espera por materiais e mão de obra, fenômenos evidenciados nos dados da Empresa Alfa. Zhu *et al.* (2019) destacam que ambientes adversos demandam estratégias preditivas baseadas em monitoramento sistemático da condição dos ativos, de modo a reduzir intervenções corretivas e aumentar a confiabilidade operacional. Em operações florestais, a ausência de práticas robustas de inspeção, padronização e análise contínua dos indicadores contribui para oscilações na disponibilidade da frota e para custos elevados de manutenção, reforçando a necessidade de integração entre PCM, RCM e gestão da informação.



3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e natureza descritiva, orientada à análise do sistema de manutenção de uma frota de composições com seis carretas utilizadas no transporte florestal. Conforme Gil (2010), pesquisas aplicadas buscam produzir conhecimento voltado à solução de problemas específicos, enquanto estudos descritivos têm como objetivo observar, registrar, analisar e correlacionar variáveis sem intervenção direta do pesquisador. A escolha por essa abordagem se justifica pela necessidade de compreender o comportamento operacional da frota por meio de indicadores extraídos do sistema corporativo, sem modificação das condições originais do processo.

O procedimento técnico adotado foi o estudo empírico, modalidade adequada quando se pretende investigar fenômenos contemporâneos em seu contexto real, especialmente quando há múltiplas variáveis e fontes de evidência (Lakatos; Marconi, 2017). O caso analisado corresponde à Empresa Alfa, que opera cerca de 20 conjuntos tracionados destinados ao transporte de madeira. O estudo contemplou o exame sistemático das ordens de manutenção registradas no SAP, referentes ao período de 01/05/2025 a 31/10/2025, abrangendo atividades corretivas e preventivas, tempos de intervenção, disponibilidade de recursos e registros de materiais utilizados. Os dados foram acessados em 23/11/2025.

Os dados foram coletados diretamente do SAP por meio de extrações estruturadas, contemplando variáveis operacionais relevantes para a avaliação da manutenção, como tempos de reparo, tempos de espera, backlog, aderência ao plano preventivo, frequência de falhas e indicadores MTTR e MTBF. Prodanov e Freitas (2013) ressaltam que a coleta sistemática de dados operacionais constitui etapa fundamental para pesquisas que visam à análise quantitativa de processos.

Em complemento, adotaram-se princípios de confiabilidade e análise de falhas descritos na literatura técnica (Mobley, 2004; Moreira, 2015), de forma a garantir que o processamento dos dados refletisse as métricas consolidadas na engenharia de manutenção. Ressalta-se que a acurácia dos registros no SAP depende da qualidade do apontamento operacional, podendo haver inconsistências, campos incompletos ou divergências de tempo, o que representa limitação inerente à base de dados utilizada. O tratamento dos dados seguiu as orientações metodológicas de Gil (2008) para pesquisas quantitativas, iniciando-se pela organização e verificação crítica das informações, com o objetivo de identificar registros incompletos, duplicações e inconsistências.



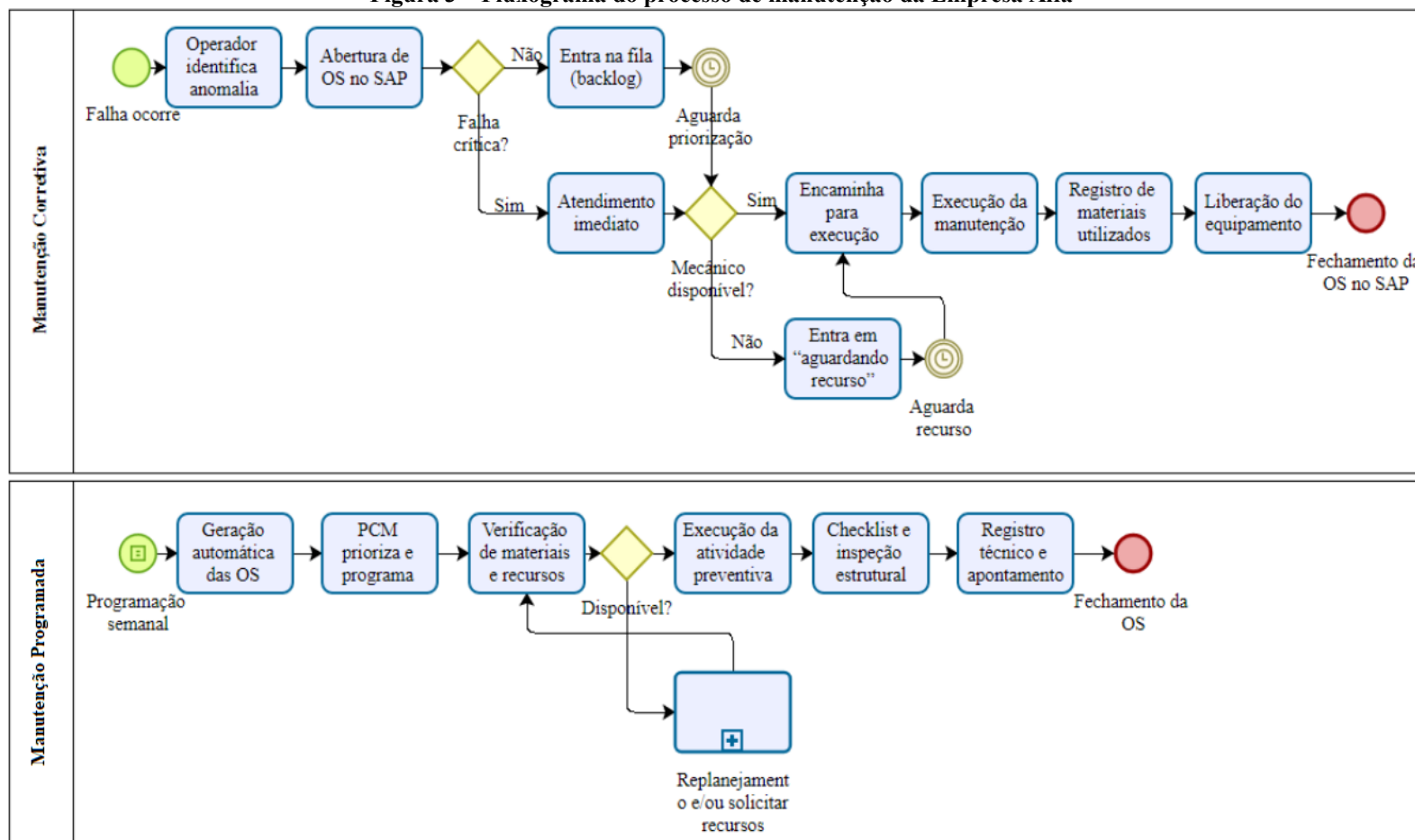
Após essa etapa, os dados foram classificados, codificados e tabulados de forma sistemática, conforme recomendado pelo autor, possibilitando a aplicação de procedimentos de Estatística Descritiva para caracterização das variáveis analisadas. Em seguida, calcularam-se indicadores de desempenho da manutenção (MTTR, MTBF, disponibilidade e backlog), além de se realizar a comparação entre as atividades programadas e executadas no plano preventivo. Essa etapa permitiu avaliar a maturidade do sistema de manutenção e identificar lacunas relacionadas à execução das atividades.

A análise foi conduzida de forma integrada, articulando os indicadores obtidos com o referencial teórico sobre PCM, RCM, TPM, gestão de ativos e manutenção em condições adversas. Essa triangulação metodológica permite, conforme orientam Lakatos e Marconi (2017), fortalecer a validade das interpretações ao combinar evidências empíricas, dados operacionais estruturados e fundamentos teóricos consolidados. Ferramentas computacionais como ChatGPT e NotebookLM foram utilizadas exclusivamente como apoio para organização lógica, verificação de consistência metodológica e revisão de referências, sem interferência na análise crítica nem na autoria das interpretações.

Por fim, os resultados foram organizados em categorias de análise que refletem os principais construtos da engenharia de manutenção: desempenho operacional, eficiência da programação, comportamento das falhas e impacto das indisponibilidades. Essa estrutura permitiu identificar relações entre variáveis de manutenção e indicadores logísticos, fundamentando o diagnóstico do sistema de gestão de manutenção atual. A Figura 3, apresenta os fluxogramas do processo de manutenção da empresa.



Figura 3 – Fluxograma do processo de manutenção da Empresa Alfa



Fonte: Autoria própria (2025).

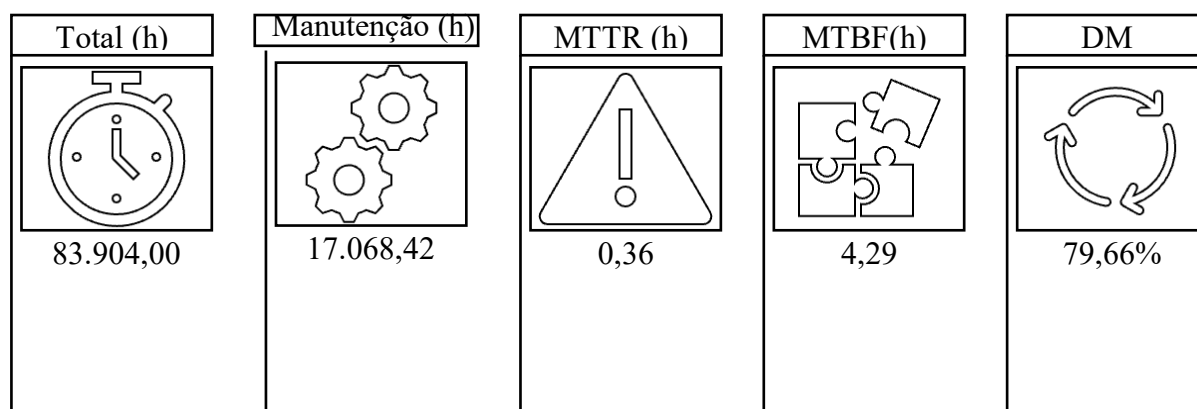
4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados extraídos do sistema SAP e dos dashboards corporativos permitiu avaliar o desempenho da frota utilizada nas operações de transporte de madeira durante o período de 01/05/2025 a 31/10/2025. Os resultados evidenciaram comportamento instável nos principais indicadores de confiabilidade, refletindo tanto as condições adversas de operação quanto limitações estruturais no processo de manutenção, em linha com o que a literatura aponta para frotas submetidas a ambientes severos (Mobley, 2004; Mayeski, 2023).

Durante o semestre analisado, a frota apresentou variações significativas nos índices de disponibilidade mecânica, tempos de falha e desempenho preventivo. Esses resultados mostraram que a manutenção não atuou de maneira plenamente eficaz para sustentar níveis estáveis de operação, o que foi perceptível pela redução gradativa da disponibilidade, pela inconsistência no intervalo entre falhas e pelo aumento relativo das horas de manutenção conforme o semestre avançou.

A adversidade das condições operacionais e a predominância de falhas estruturais e de rodante reforçaram o impacto do ambiente de trabalho sobre o desgaste acelerado dos componentes, fenômeno amplamente descrito em operações florestais e de mineração (Mobley, 2004; Mayeski, 2023). A Figura 4 apresenta os indicadores gerais consolidados para o período, permitindo visualizar a relação entre horas totais, horas de manutenção, disponibilidade mecânica, MTBF e MTTR ao longo dos seis meses analisados.

Figura 4 – Indicadores gerais da frota no período de maio a outubro de 2025



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).



Os resultados mostraram uma tendência de queda constante da disponibilidade mecânica, acompanhada por aumento das horas de manutenção. O comportamento do MTBF (Figura 5) indicou instabilidade no intervalo entre falhas, enquanto o MTTR (Figura 6) permaneceu em níveis baixos e relativamente constantes. Em conjunto, esses indicadores demonstraram que, embora o tempo de reparo tenha se mantido reduzido, a frequência das falhas aumentou ao longo do período, comprometendo a eficiência operacional da frota, em concordância com o efeito combinado entre confiabilidade e manutenibilidade descrito por Moreira (2015) e Fagundes, Andrade e Machado (2016).

4.1 Análise do MTBF

O MTBF apresentou variação significativa ao longo do período analisado, oscilando entre 3,55 e 6,15 horas. Observou-se queda no intervalo entre falhas durante os meses de maio a julho, seguida de uma recuperação parcial nos meses subsequentes, embora sem alcançar valores que indicassem estabilidade operacional. Essa oscilação evidenciou que os componentes mais críticos da frota sofreram degradação acelerada ao longo do semestre, o que reforçou o caráter adverso do ambiente de transporte florestal. Esse comportamento está alinhado ao observado por Mayeski (2023), que aponta a combinação de vias não pavimentadas, ciclos longos e altas cargas como fatores que reduzem o tempo médio entre falhas.

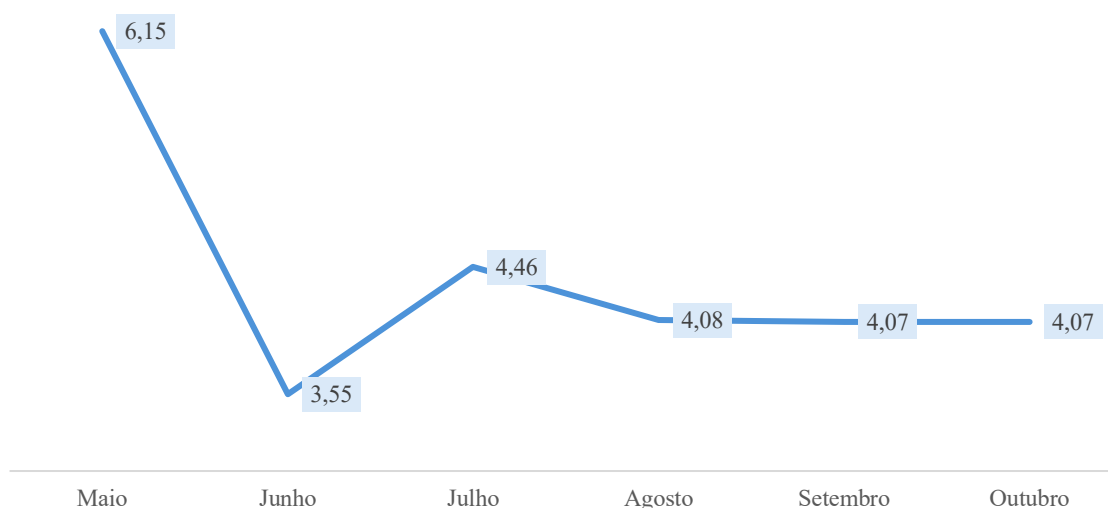
Importante destacar que essa degradação não está relacionada à sazonalidade da demanda de produção, uma vez que o transporte de madeira ocorre de forma contínua ao longo do ano, mantendo níveis relativamente constantes de utilização da frota. Assim, a redução do MTBF decorre predominantemente das condições de operação e da estratégia de manutenção adotada, e não de variações de volume transportado em curto prazo.

A redução do MTBF ao longo do período confirmou que os modos de falha ocorreram com frequência superior à desejável, especialmente em sistemas estruturais e rodantes, tal como demonstrado nos Paretos na seção 4.5. Esse comportamento foi coerente com estudos que identificaram aumento de falhas quando as condições de operação impuseram esforços vibratórios e cargas dinâmicas intensas aos ativos (Mobley, 2011).

No caso da Empresa Alfa, as condições das vias internas e o perfil de utilização contribuíram para elevar a incidência de trincas estruturais, rompimentos de componentes do rodante e falhas no sistema de freios, fatores que reduziram o tempo médio entre falhas. A

Figura 5 apresenta a evolução mensal do MTBF no período de maio a outubro, permitindo visualizar a tendência de perda de confiabilidade ao longo do semestre.

Figura 5 – MTBF mensal da frota (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).

4.2 Análise do MTTR

O MTTR apresentou comportamento estável ao longo do período analisado, variando entre 0,24 h e 0,49 h entre maio e outubro de 2025. Os valores permaneceram consistentemente baixos, o que indicou que, uma vez iniciada a intervenção, os reparos foram executados de forma rápida pelas equipes de manutenção. Esse resultado sugere agilidade na execução direta das atividades corretivas, principalmente no atendimento em campo.

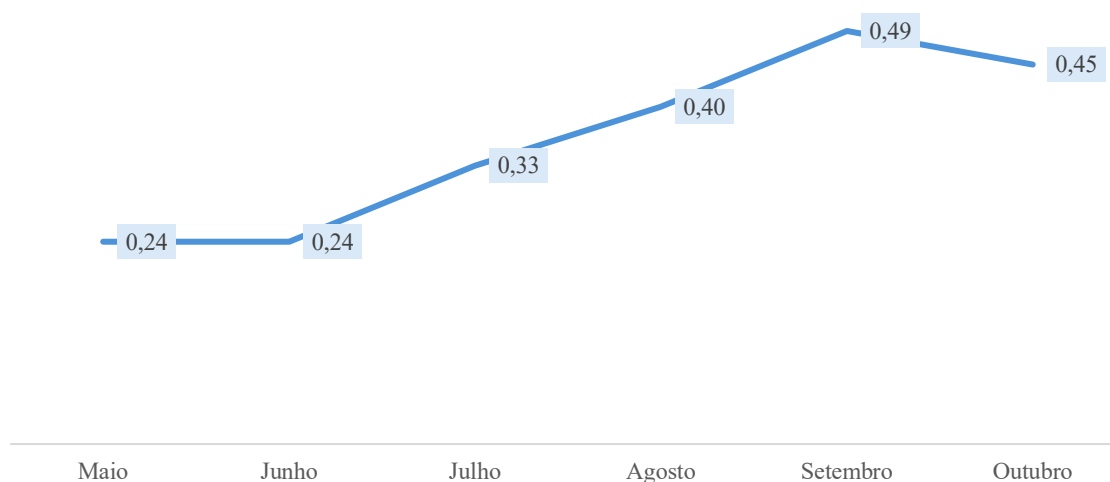
Entretanto, é provável que esse MTTR reflita apenas o tempo apontado pelo mecânico como mão de obra direta, sem considerar integralmente o Lead Time da parada, que inclui espera por mecânico, disponibilidade de peças, movimentação do equipamento e eventuais filas de atendimento. Essa prática, comum em sistemas informatizados de manutenção quando o apontamento não é rigidamente padronizado, pode mascarar parte da indisponibilidade real da frota, em consonância com as advertências de Mobley (2004) e Moreira (2015) quanto à importância da acurácia dos registros para a interpretação de indicadores de manutenibilidade.

Apesar do desempenho favorável no tempo de reparo registrado, o MTTR não refletiu melhoria no desempenho global da frota, já que a redução da disponibilidade mecânica e a instabilidade do MTBF mostraram que as falhas ocorreram com maior frequência ao longo do

semestre. A manutenção rápida, portanto, não impediu o aumento do volume de falhas. Esse comportamento demonstrou que, embora o processo de execução tenha se mostrado ágil na ótica do tempo apontado, o sistema de manutenção como um todo não atuou de maneira plenamente eficaz para reduzir a incidência de ocorrências corretivas.

O contraste entre um MTTR reduzido e um MTBF relativamente baixo sugeriu que o problema central não esteve associado ao tempo de reparo, mas sim à recorrência das falhas. Essa evidência reforçou a necessidade de aprimorar o planejamento das ações preventivas, o controle de backlog e as inspeções dos sistemas mais vulneráveis, especialmente os ligados ao rodante, estrutura e freios, conforme indicado nos Paretos levantados para o período. A Figura 6 apresenta a variação mensal do MTTR, permitindo visualizar o comportamento estável do indicador ao longo dos seis meses analisados.

Figura 6 – MTTR mensal da frota (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).

4.3 Análise da DM

A disponibilidade mecânica apresentou tendência de queda ao longo do período analisado, passando de valores superiores a 85% nos primeiros meses para patamares próximos a 72% ao final de outubro de 2025. Essa redução evidenciou a crescente dificuldade da frota em permanecer operacional durante o ciclo logístico, o que impactou diretamente o desempenho do transporte de madeira. A diminuição da disponibilidade ocorreu em paralelo ao aumento das horas destinadas à manutenção, indicando que o volume de intervenções corretivas

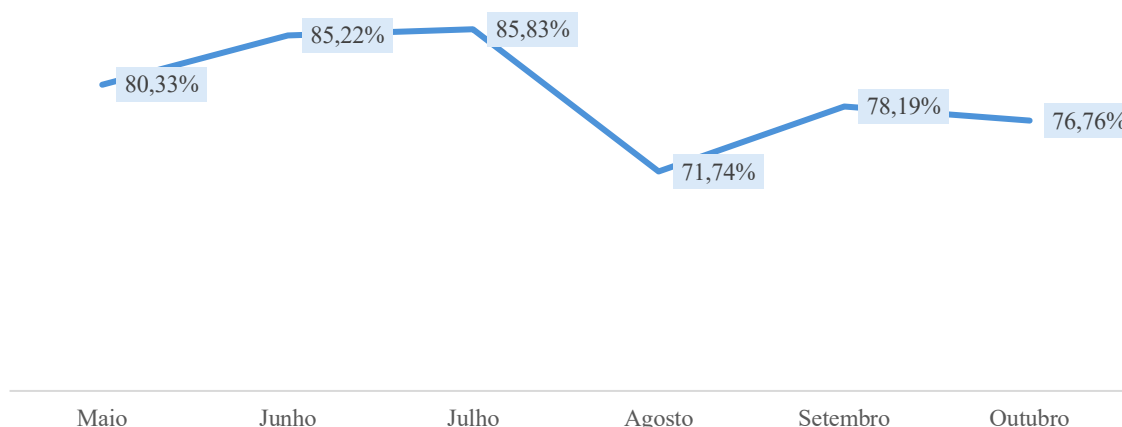


creceu progressivamente ao longo do semestre.

A variação negativa observada na disponibilidade confirmou que o sistema de manutenção não conseguiu compensar o aumento da frequência de falhas identificado no MTBF. Mesmo com um MTTR reduzido, a quantidade de eventos de falha e o consequente tempo de parada acumulado resultaram em menor proporção de horas disponíveis para operação. Esse comportamento mostrou que a eficiência no reparo, ainda que aparente, não foi suficiente para preservar o nível de disponibilidade desejado, reforçando que o problema esteve associado à origem e recorrência das falhas, e não ao tempo despendido em cada reparo individual. Essa relação entre MTBF, MTTR e disponibilidade está em consonância com a literatura de confiabilidade e manutenção de frotas pesadas (Moreira, 2015; Fagundes; Andrade; Machado, 2016).

A relação entre a queda da disponibilidade e o desgaste acelerado dos componentes também refletiu as condições adversas do ambiente florestal. O aumento das falhas estruturais, de rodante e de freios contribuiu diretamente para a redução do tempo produtivo da frota, uma vez que esses sistemas estão entre os mais críticos para a continuidade da operação. A soma dos tempos de parada associada ao acúmulo de ordens corretivas indicou que o sistema de manutenção operou sob demanda crescente, o que favoreceu a formação de backlog e dificultou o cumprimento integral das rotinas preventivas dentro das janelas previstas. A Figura 7 apresenta a evolução mensal da disponibilidade mecânica, permitindo visualizar a tendência de queda observada ao longo dos seis meses de estudo.

Figura 7 – Disponibilidade mecânica da frota (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).



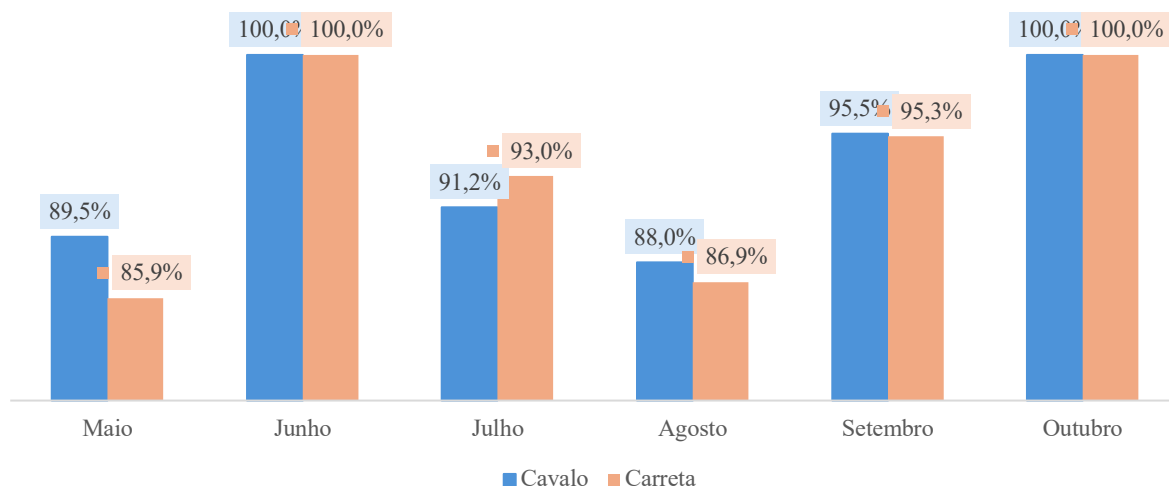
4.4 Aderência à preventiva

A aderência ao plano de manutenção preventiva apresentou desempenho satisfatório durante o período analisado, atingindo valor acumulado de 93,33% entre maio e outubro de 2025. Esse índice mostrou que a maior parte das intervenções previstas foi efetivamente executada pelas equipes de manutenção, o que indicou disciplina operacional no cumprimento dos planos estabelecidos. Esse resultado encontra-se acima da meta interna definida pela Empresa Alfa, de 90% de aderência às manutenções programadas.

Entretanto, a análise qualitativa revelou que parte das intervenções ocorreu em decorrência de falhas antecipadas, e não exclusivamente dentro das janelas planejadas. O comportamento da aderência sugeriu que o plano preventivo não atuou com a eficácia esperada para evitar a recorrência dos modos de falha críticos identificados nos Paretos. Embora a manutenção preventiva tenha sido executada na maior parte das vezes, a ocorrência de falhas antes da data programada indicou que os intervalos previstos para inspeção e substituição de componentes não foram suficientes para mitigar o desgaste acelerado característico das operações florestais, conforme discutido por Mobley (2004) e Mayeski (2023) em contextos similares.

A relação entre a aderência elevada e o crescimento da quantidade de falhas também sugeriu que o sistema de manutenção atuou no limite de sua capacidade ao longo do período. À medida que o volume de corretivas aumentou, tornou-se mais difícil manter o cumprimento pontual das preventivas, o que favoreceu a antecipação de paradas e a necessidade de intervenções não planejadas. O conjunto desses fatores indicou que, embora o indicador de aderência tenha apresentado bom desempenho numérico, ele não refletiu integralmente a eficácia do plano preventivo na contenção das falhas mais recorrentes. A Figura 8 apresenta o comportamento da aderência à manutenção preventiva ao longo do período analisado, permitindo visualizar o índice consolidado.

Figura 8 – Aderência acumulada à manutenção preventiva (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).

4.5 Análise das falhas

A análise das falhas realizadas ao longo do período de maio a outubro de 2025 revelou forte concentração de ocorrências em um grupo principal: sistemas estruturais. Os Paretos de frequência (Figura 12) e de custo (Figura 11) mostraram que esse grupo representou a maior parcela das intervenções corretivas realizadas na frota, tanto em número de falhas quanto em impacto financeiro. A predominância desses sistemas indicou que as falhas não ocorreram de forma aleatória, mas seguiram um padrão consistente ao longo dos seis meses analisados, comportamento coerente com o relatado na literatura para operações em vias não pavimentadas (Mobley, 2004; Mayeski, 2023).

O grupo estrutural apresentou a maior quantidade de ocorrências, evidenciando desgaste acelerado de componentes como suportes, longarinas, travessas e elementos construtivos sujeitos a vibração contínua. Essa recorrência caracterizou um comportamento típico de operações em ambiente florestal, onde irregularidades do terreno e cargas dinâmicas elevadas aumentam o risco de trincas, desalinhamentos e deformações. As carretas, por serem mais expostas ao impacto direto das vias de circulação, contribuíram significativamente para esse cenário. Esse padrão é compatível com o que Mobley (2004) descreve sobre o efeito acumulado de vibração e cargas dinâmicas em estruturas metálicas submetidas a ciclos repetitivos de carga.

O sistema de rodante também apresentou elevado número de falhas, com destaque para

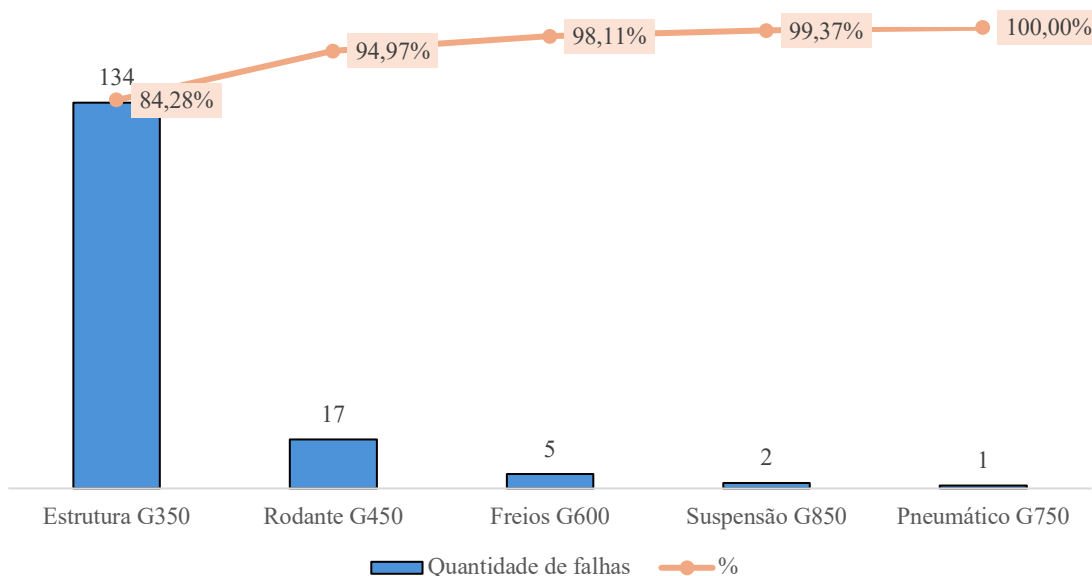


problemas em buchas, pivôs, molas e demais itens ligados à suspensão. A dinâmica operacional dos conjuntos, associada à combinação de carga elevada e longos ciclos diários, favoreceu a degradação desses componentes. Esse comportamento reforça os achados de Mayeski (2023), que identificou que a combinação entre irregularidade das vias e ciclos longos acelera a fadiga dos elementos da suspensão. A sequência de falhas observada indica que o intervalo entre inspeções e substituições preventivas não foi suficiente para evitar o desgaste prematuro desses itens críticos.

O sistema de freios completou o conjunto dos três grupos mais recorrentes. As falhas relacionadas a lonas, tambores, câmaras e linhas pneumáticas indicaram que o esforço repetitivo de frenagem em vias irregulares e deslocamentos com carga total acelerou o desgaste desses componentes. Embora tais falhas tenham ocorrido com menor frequência do que as estruturais e do rodante, elas apresentaram impacto direto na segurança operacional e contribuíram para o aumento das horas de manutenção, padrão também documentado pela literatura de manutenção de frotas pesadas (Mobley, 2004).

Os resultados obtidos demonstraram que as falhas se concentraram nos mesmos subsistemas durante todo o semestre, evidenciando a necessidade de revisão do plano preventivo com foco em inspeções reforçadas nos pontos mais vulneráveis. O padrão repetitivo das ocorrências indicou que o sistema de manutenção não conseguiu atuar de maneira proativa para eliminar ou reduzir os modos de falha críticos, o que contribuiu diretamente para a redução da disponibilidade mecânica observada no período. A Figura 9 apresenta o Pareto de falhas por sistema, permitindo identificar quais subsistemas concentraram a maior parte das ocorrências corretivas.

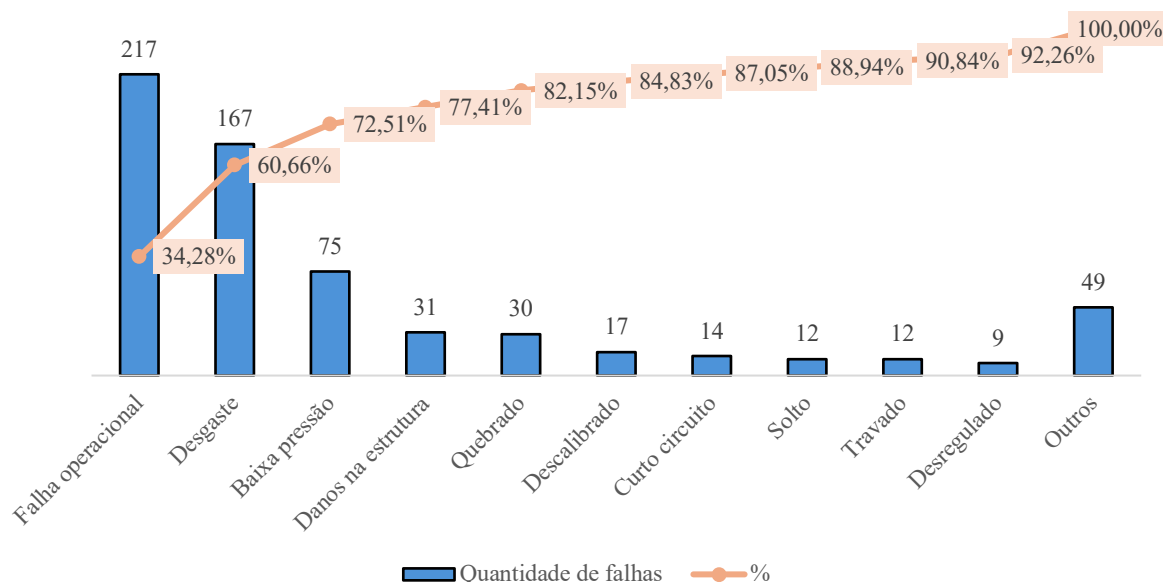
Figura 9 – Pareto de falhas por sistema (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).

A Figura 10 detalha as principais causas das falhas registradas, complementando a análise do comportamento da frota e destacando os modos de falha de maior impacto.

Figura 10 – Pareto de falhas por causa (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).

4.6 Análise do consumo de materiais

A avaliação do consumo de materiais no período de maio a outubro de 2025 apresentou



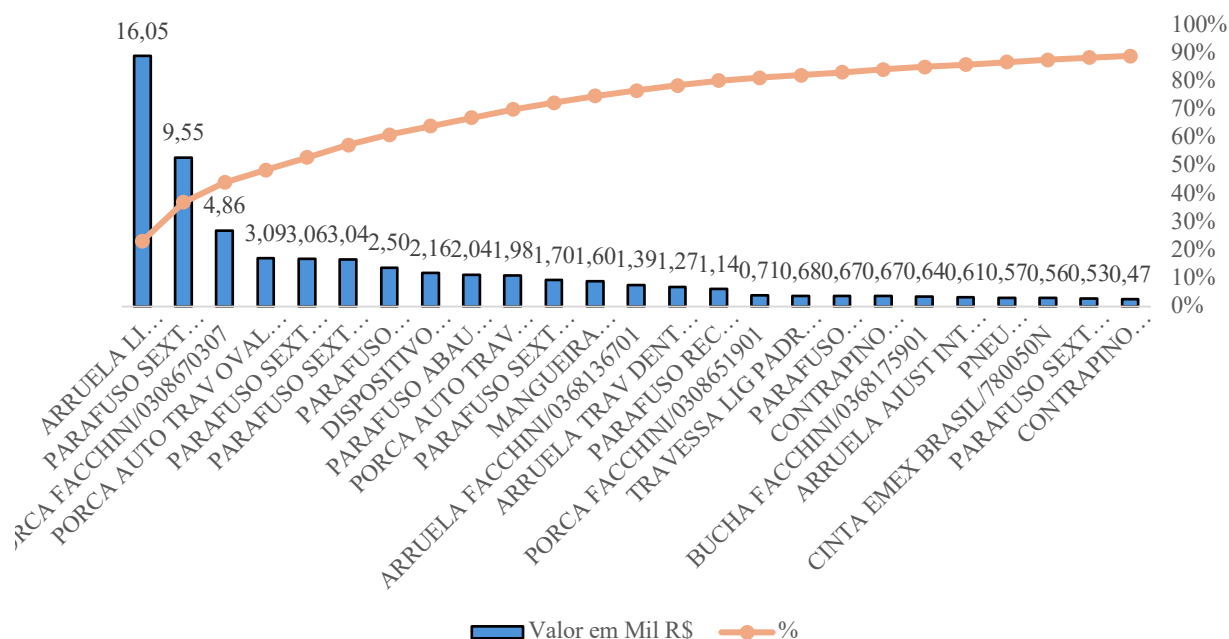
forte correlação com os padrões de falha observados nos sistemas estruturais, rodantes e de freios. Os dados extraídos mostraram que os itens mais demandados pela manutenção foram justamente aqueles associados aos modos de falha mais recorrentes, como buchas, componentes da suspensão, lonas de freio, parafusos estruturais, suportes, pivôs e elementos ligados à geometria e estabilidade das carretas. Esse comportamento confirma a relação direta entre falhas recorrentes e demanda de materiais, conforme discutido por Mobley (2004) e Smith e Hinchcliffe (2004).

A frequência elevada de substituição de materiais relacionados à suspensão e ao rodante refletiu diretamente o efeito da vibração contínua, das irregularidades do terreno e da carga dinâmica própria das frotas, condições inerentes ao transporte florestal. A necessidade recorrente de reposição desses itens indicou que o desgaste ocorreu de forma mais rápida do que o previsto no plano preventivo, fato que contribuiu para o volume de corretivas registrado e para o aumento das horas de manutenção, reforçando a necessidade de revisão dos intervalos e critérios de inspeção.

Além disso, o consumo significativo de materiais estruturais ao longo do período reforçou o impacto das falhas repetitivas nesse subsistema. Trincas, quebras de travessas e desalinhamentos estruturais resultaram em elevado uso de reforços, reparos e substituições de componentes metálicos, elevando o custo operacional da manutenção, fenômeno descrito por Moreira (2015) como típico quando o desgaste estrutural não é mitigado por inspeções preditivas.

A relação entre o Pareto de falhas e o Pareto de materiais demonstrou que os recursos foram majoritariamente direcionados para corrigir problemas já conhecidos, sem que houvesse redução efetiva da incidência dessas ocorrências ao longo dos meses. Isso indica que o volume de intervenções corretivas consumiu parte significativa da capacidade de manutenção, restringindo o espaço para ações preventivas de maior profundidade. A Figura 11 apresenta o Pareto de materiais por custo, evidenciando quais itens demandaram maior investimento para reparos durante o período.

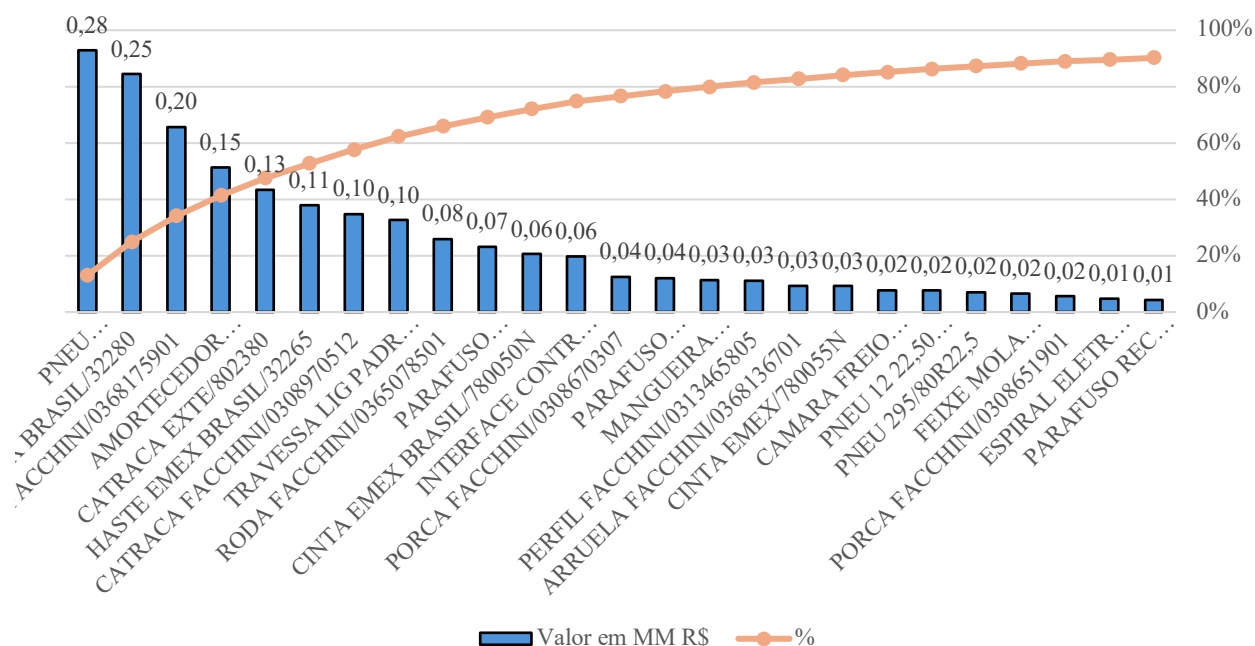
Figura 11 – Pareto de materiais por custo (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).

A Figura 12 complementa a análise apresentando o Pareto por quantidade, permitindo identificar os materiais mais frequentemente utilizados nas intervenções.

Figura 12 – Pareto de materiais por quantidade (maio a outubro de 2025)



Fonte: Dados operacionais da Empresa Alfa (2025).



4.7 Análise do backlog

A análise do backlog enfrentou limitações decorrentes da indisponibilidade de dados isolados da frota analisada. A extração realizada por meio da transação IW38 não permitiu segmentar exclusivamente as ordens referentes aos cavalos e carretas utilizados, uma vez que a base retornou ordens abertas de múltiplos subsistemas e áreas operacionais. Essa restrição impossibilitou o cálculo quantitativo preciso do backlog acumulado no período.

Apesar dessa limitação, o comportamento dos demais indicadores analisados ao longo do semestre forneceu evidências claras de que houve aumento do volume de ordens pendentes de execução. A redução progressiva da disponibilidade mecânica, somada ao aumento das horas destinadas à manutenção e à recorrência de falhas nos mesmos sistemas, sugeriu que a capacidade de atendimento da equipe de manutenção não acompanhou a demanda gerada pela operação. Esse comportamento está de acordo com o modelo de PCM descrito por Mobley (2004), que associa backlog crescente à predominância de falhas repetitivas, insuficiência de recursos ou plano preventivo inadequado.

A literatura de Planejamento e Controle da Manutenção destaca que o backlog tende a aumentar quando há discrepância entre demanda de intervenções e capacidade de atendimento, sobretudo em cenários de operação contínua, como transporte florestal. Esse comportamento foi coerente com o padrão observado nos sistemas estruturais e de rodante, que concentraram a maior parte das falhas e exigiram intervenções corretivas frequentes, contribuindo para o aumento da carga de trabalho acumulada ao longo dos meses.

Dessa forma, embora não tenha sido possível quantificar o backlog da frota de forma isolada, os resultados operacionais indicaram sua presença e sugeriram que ele desempenhou papel relevante na redução da disponibilidade mecânica e na intensificação das rotinas corretivas durante o período analisado.

4.8 Síntese integrada da análise dos resultados

A integração dos resultados obtidos no período de maio a outubro de 2025 evidenciou um comportamento operacional marcado pela instabilidade dos indicadores de confiabilidade e pela predominância de falhas em subsistemas críticos da frota. Os dados demonstraram que o MTBF apresentou variações significativas e permaneceu em níveis inferiores ao desejável, refletindo a recorrência de falhas nos sistemas estruturais, de rodante e de freios. Essa tendência



contribuiu diretamente para a redução progressiva da disponibilidade mecânica ao longo do semestre, mesmo diante de um MTTR consistentemente baixo.

A análise consolidada indicou que, embora os reparos tenham sido executados de forma ágil segundo os registros, a frequência de falhas impôs aumento significativo das horas de manutenção e diminuição proporcional das horas produtivas da frota. A aderência acumulada à manutenção preventiva foi elevada, porém não evitou que parte das intervenções ocorresse após a manifestação das falhas, sugerindo que os intervalos e escopos das rotinas não foram suficientes para neutralizar os modos de falha mais recorrentes.

Esse comportamento foi reforçado pela associação entre o Pareto de falhas e o Pareto de consumo de materiais, que revelaram sobrecarga específica em sistemas já identificados como críticos. A análise do backlog, embora limitada pela indisponibilidade de dados segregados exclusivamente para a frota avaliada, apresentou indícios de crescimento ao longo do período, observados por meio do aumento das corretivas, da redução da disponibilidade e da necessidade de replanejamento de intervenções.

Considerados em conjunto, esses elementos demonstraram que os efeitos do ambiente adverso de operação foram amplificados pela dificuldade em absorver a demanda crescente por manutenção, o que influenciou diretamente o comportamento dos indicadores. Essa síntese dos achados reforça o que a literatura aponta sobre a importância de estratégias de manutenção baseadas em confiabilidade (RCM), com revisão contínua dos modos de falha e maior alinhamento entre capacidades de execução e criticidade dos ativos (Moutbray, 1997; Smith; Hinchcliffe, 2004). Diante disso, a Tabela 1 apresenta os comparativos entre a literatura e a situação observada.

Tabela 1 – Comparativo entre literatura e situação real

Referência	Achado teórico	Achado prático da Empresa Alfa	Evidência
RCM	Modos críticos devem ser mapeados	Falhas repetitivas em rodante/estrutura	Pareto 11 e 12
PCM	Backlog deve ser controlado	Indícios de acúmulo	DM e horas manutenção
TPM	Operador reduz falhas	Sem práticas formais	AS repetidas

Fonte: Autoria própria (2025).



De forma integrada, os resultados evidenciaram que os parâmetros de confiabilidade (MTBF, MTTR, disponibilidade, manutenção preventiva e consumo de materiais) convergiram para um cenário em que a frota operou sob elevadas exigências mecânicas e com progressiva perda de desempenho. Essa síntese fornece base para compreender as vulnerabilidades do sistema de manutenção vigente e sustenta a necessidade de aprofundar a análise em termos de causas técnicas e processuais.



5 CONCLUSÕES

Este estudo teve por objetivo avaliar o sistema de gestão de manutenção dos ativos utilizados nas composições com seis carretas de uma empresa de celulose. A análise dos indicadores operacionais evidenciou que, apesar do MTTR permanecer baixo, o MTBF instável, a queda da disponibilidade mecânica e a predominância de falhas estruturais revelaram perda progressiva de confiabilidade ao longo do período analisado. Esses resultados mostram que o sistema de manutenção não atuou de forma plenamente eficaz para sustentar o desempenho esperado.

O mapeamento do processo de manutenção, confrontado com a literatura, revelou inconsistências entre o modelo teórico e a prática, especialmente no controle do backlog, na antecipação dos modos de falha e na efetividade da manutenção preventiva. Apesar da boa aderência numérica às rotinas preventivas, essa aderência não evitou a reincidência de falhas antes das janelas programadas, apontando que a periodicidade atual pode não refletir as condições reais de degradação em ambiente florestal. Adicionalmente, a sazonalidade da demanda industrial não exerce influência significativa sobre o comportamento da manutenção, uma vez que o transporte florestal opera de forma contínua, mantendo níveis constantes de desgaste e exposição mecânica.

A análise do consumo de materiais reforçou o padrão de falhas identificado, demonstrando que componentes críticos sofreram desgaste acelerado, impactando os custos e a disponibilidade da frota. A pesquisa apresentou limitações relevantes, incluindo a extração dos dados diretamente do SAP, cuja acurácia depende da disciplina de apontamento e pode conter registros incompletos ou inconsistentes, introduzindo potenciais vieses na interpretação dos indicadores. Além disso, o período reduzido de observação limita a generalização dos resultados e a identificação de tendências de longo prazo.

Considera-se, portanto, que o aprimoramento do sistema de manutenção é essencial para ampliar a confiabilidade dos ativos e reduzir a indisponibilidade operacional nas operações florestais da empresa. Trabalhos futuros poderão ampliar a série histórica analisada, incorporar técnicas preditivas baseadas em condição, avaliar intervenções estruturais que reduzam a reincidência dos modos de falha e elevar a acurácia dos registros no SAP para garantir indicadores mais confiáveis.



REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COBRE – ABCOBRE. Gestão de ativos: guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 55001. 2021. Disponível em: <https://abcobre.org.br/wp-content/uploads/2021/04/gestao-de-ativos-guia-para-aplicacao-da-norma-abnt-nbr-iso-55001.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.
- FAGUNDES, J.; ANDRADE, A.; MACHADO, J. Disponibilidade de sistemas a partir de MTBF e MTTR. *Revista Espacios*, v. 37, n. 12, 2016. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a16v37n12/16371217.html>. Acesso em: 20 set. 2025.
- GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MAYESKI, Lisiane Paula. Análise da melhoria da disponibilidade operacional em empresas brasileiras e portuguesas com a adoção da manutenção preditiva. IFRS, 2023. Disponível em: <https://dspace.ifrs.edu.br/handle/123456789/2289>. Acesso em: 12 set. 2025.
- MOBLEY, R. K. *Maintenance Fundamentals*. 2nd ed. Burlington: Elsevier, 2004. Disponível em: <https://nibmehub.com/opac-service/pdf/read/Maintenance%20Fundamentals-%202nd%20Ed.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.
- MOREIRA, J. Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. UTFPR, 2015. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26929/1/manutencaopreventivapcmpredictiva.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.
- MOUBRAY, John. *Reliability-centered maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997. Disponível em: <http://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2013/11/Reliability-Centered-Maintenance-II.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.
- PRODANOV, Cleber; FREITAS, Ernani. Metodologia do Trabalho Científico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
- SMITH, Anthony; HINCHCLIFFE, G. RCM: Gateway to World Class Maintenance. Oxford: Elsevier, 2004. Disponível em: <https://dl.mpendia.ir/e-books/16-%5BAnthony-Smith,Glenn-Hinchcliffe%5DRCM-Gateway-worldclass-maintenance%5Bmpendia.ir%5D.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.
- UFSC. Metodologia do Trabalho Científico. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- ZHU, Tianwen *et al.* A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. arXiv, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1912.07383.pdf>. Acesso em:



20 set. 2025.