



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Frank Wanderson Furtado De Sousa

**ANÁLISE E PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO
PARA CAMINHÃO GUINDADAUTO BASEADO EM CONFIABILIDADE (RCM).**

**TUCURUÍ – PA
2026**

FRANK WANDERSON FURTADO DE SOUSA

**ANÁLISE E PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO
PARA CAMINHÃO GUINDADAUTO BASEADO EM CONFIABILIDADE (RCM).**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Da Silva.

FRANK WANDERSON FURTADO DE SOUSA

**ANÁLISE E PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO
PARA CAMINHÃO GUINDADAUTO BASEADO EM CONFIABILIDADE (RCM).**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: **10/02/2026**

Conceito: **BOM.**

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Da Silva
FEM/CAMTUC/UFPA

Eng. Msc. Rodimilson Coelho Rodrigues
FEM/CAMTUC/UFPA

Prof. Msc. Ronaldo Roposo De Moura
NDAE/CAMTUC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu pai, Francivaldo, que durante todo esse processo se fez presente mesmo distante, sem seu apoio nada disso seria possível.

A minha namorada, Thacyana, que durante esses quase dois anos, se fez presente nos dias difíceis sendo não só meu apoio, mas também um incentivo a continuar essa jornada, você também foi a base para eu estar aqui hoje.

Aos meus, amigos e colegas de turma que durante todo o curso me proporcionaram risadas, momentos únicos, vivências e experiências que jamais esquecerei, fundamentais em todo esse processo.

E por fim, e não menos importante ao meu orientador, que através do seu auxílio se tornou possível a realização desse trabalho.

RESUMO

A busca por eficiência operacional e segurança na movimentação de cargas pesadas elevou a importância estratégica da gestão de ativos em setores industriais. Este trabalho apresenta uma proposta de otimização do plano de manutenção de um caminhão guindauto, fundamentada nos princípios da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM). O estudo de caso, de natureza quali-quantitativa, analisou a transição de um modelo de manutenção tradicional baseado em intervalos cronológicos fixos para uma abordagem direcionada ao risco e à condição dos componentes. Para tanto, aplicou-se a ferramenta *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) a fim de identificar modos de falha críticos em subsistemas vitais, estabelecendo um Número de Prioridade de Risco (NPR) limiar para intervenções preditivas. Os resultados projetados indicam um incremento de 50% no Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e uma redução de 50% no Tempo Médio para Reparo (MTTR), elevando a disponibilidade inerente do equipamento de 95,2% para 98,3%. Conclui-se que a integração do RCM ao planejamento existente não apenas mitiga riscos operacionais e legais vinculados às normas NR-11 e NR-12, mas também otimiza o Custo do Ciclo de Vida (LCC) ao substituir preventivas rígidas por monitoramento de condição assertivo.

Palavras-chave: RCM; FMEA.; Caminhão; Guindauto; Confiabilidade; Disponibilidade.

ABSTRACT

The search for operational efficiency and safety in heavy load handling has elevated the strategic importance of asset management across industrial sectors. This paper proposes an optimization of the maintenance plan for a knuckle boom crane truck, based on the principles of Reliability-Centered Maintenance (RCM). Using a qualitative-quantitative case study, the research analyzes the transition from a traditional maintenance model based on fixed chronological intervals to an approach focused on risk and component condition. To achieve this, the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) tool was applied to identify critical failure modes in vital subsystems, establishing a threshold Risk Priority Number (RPN) for predictive interventions. Projected results indicate a 50% increase in Mean Time Between Failures (MTBF) and a 50% reduction in Mean Time To Repair (MTTR), raising the equipment's inherent availability from 95.2% to 98.3%. The study concludes that integrating RCM into existing planning not only mitigates operational and legal risks associated with NR-11 and NR-12 standards but also optimizes Life Cycle Cost (LCC) by replacing rigid preventive tasks with assertive condition monitoring.

Keywords: RCM; FMEA; Knuckle Boom Crane; Truck; Reliability; Availability.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	8
2 METODOLOGIA.....	9
2.1 Proposta do Plano de Manutenção Otimizado	9
2.2 Etapas de Análise e Coleta de Dados	9
2.2.1 Fontes Documentais	9
2.2.2 Fundamentação Normativa da Segurança	10
2.3 Análise de Criticidade (FMEA).....	10
2.3.1 Critérios de Pontuação e Cálculo do NPR.....	11
2.4 Indicadores de Desempenho	11
2.5 Projeção e Validação Econômica	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
3.1 Diagnóstico do Plano Atual e Indicadores (<i>Baseline</i>).....	13
3.2 Aplicação do FMEA e Criticidade	13
3.3 Otimização das Estratégias e Tarefas.....	14
3.3.1 Ações Preditivas Reais (Foco no Guindaste articulado - Alto NPR).....	14
3.3.2 Plano Otimizado para Chassi, Motor e Segurança Veicular	15
3.3.3 Fluxograma de Decisão para Redução do MTTR	15
3.3.4 Gestão Estratégica de Peças de Reposição	16
3.3.5 Projeção dos Indicadores de Desempenho	16
3.3.6 Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC).....	17
3.3.7 Comparativo com Estudos Similares (<i>Benchmarking</i>).....	18
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	19
REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das operações industriais nas últimas décadas impulsionou a busca por métodos de trabalho mais rápidos, seguros e eficazes. Em setores cruciais como a construção civil, montagem industrial, logística e desenvolvimento de infraestrutura, a movimentação de cargas volumosas e pesadas se consolidou como um ponto-chave para sustentar o avanço da produção (CHOPRA; MEINDL, 2019). Neste contexto, o caminhão guindauto emergiu como uma ferramenta de trabalho indispensável. Sua principal vantagem reside na combinação de funções, permitindo que ele atue simultaneamente na elevação, no transporte e no posicionamento de materiais.

A falha inesperada deste equipamento não se resume apenas à interrupção da produção, mas envolve riscos sérios à segurança operacional e custos associados à perda de contratos e multas. A indisponibilidade forçada destes ativos pesados é o epicentro do problema a ser abordado. A fim de garantir a conformidade e a segurança no projeto é imprescindível o cumprimento das diretrizes técnicas como a norma NBR 14768 (ABNT, 2021).

Desta forma, a fim de manter a segurança de suas operações, uma empresa atuante da indústria metalmeccânica elaborou um plano de manutenção para um caminhão guindauto. Onde esse plano foi estruturado em uma variedade de intervenções, incluindo as inspeções operacionais de rotina (realizada diariamente através de *checklist*), a preventiva baseada em períodos, e também prevê uma Manutenção Preditiva. Porém, esta configuração demonstra uma forte dependência de cronogramas fixos baseados em tempo de calendário ou tempo de uso. Essa dependência a estes cronogramas, sem a devida ponderação da criticidade de cada componente pode levar a sub-manutenções de itens vitais e, conseqüentemente, à ocorrência de modos de falha de alto impacto (PINTO; XAVIER, 2008).

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*) surge como uma abordagem fundamental para revolucionar o planejamento e a execução dos serviços no caminhão guindauto. Em vez de simplesmente reagir a quebras ou fazer reparos em excesso, a RCM se concentra em entender o que o equipamento faz, como ele pode ser otimizado e quais as conseqüências disso (MOUBRAY, 2001). O grande diferencial é que a RCM direciona as ações preventivas para os pontos realmente essenciais, tornando-as muito mais precisas e assertivas. O foco não é gastar mais ou menos com manutenção, mas sim atingir o equilíbrio perfeito entre custo e desempenho operacional (KARDEK; FERREIRA, 2018).

Com isso, o objetivo deste trabalho é propor uma análise e otimização do plano de manutenção de um caminhão guindauto utilizando a Manutenção Centrada na Confiabilidade. Onde será aplicada a ferramenta Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*) para analisar criticamente os subsistemas vitais do equipamento (como o sistema hidráulico, sistema de patola e o sistema de giro), definir ações preditivas baseadas no monitoramento de condições, e por fim, fazer estimativas de eficiência nos indicadores de desempenho após a aplicação da metodologia RCM.

2 METODOLOGIA

Neste estudo, foi adotada uma análise de caso de natureza quali-quantitativa, com base em um documento interno que detalha o plano de manutenção preventiva do caminhão guindauto com o intuito de aprimorá-lo. O cerne da pesquisa metodológica reside na transição estratégica desse planejamento, onde propõe migrar de uma abordagem tradicional, baseada puramente em intervalos de tempo fixos, para a Manutenção Centrada na Confiabilidade, buscando garantir a máxima performance do equipamento e uma gestão mais inteligente dos recursos. A relevância metodológica e prática deste estudo reside na validação da RCM como alternativa superior à manutenção baseada puramente em tempo para equipamentos complexos (SIQUEIRA, 2005).

2.1 Proposta do Plano de Manutenção Otimizado

A proposta visa transformar o plano atual, baseado em tempo fixo, em um plano direcionado ao risco, conforme os princípios da RCM e os resultados do FMEA, abrangendo toda a unidade veicular.

2.2 Etapas de Análise e Coleta de Dados

2.2.1 Fontes Documentais

Esta etapa estabeleceu a base para o estudo, no qual a periodicidade de 4 meses ou 800 horas trabalhadas para a manutenção periódica do caminhão guindauto foi definida como o ponto de partida a ser melhorado. Foram analisados os documentos de gestão de manutenção, como o Relatório de Análise de Falha (R.A.F.), usado para determinar a causa raiz, o MTTR (Tempo Médio para Reparo - *Mean Time To Repair*) e MTBF (Tempo Médio Entre Falhas - *Mean Time Between Failures*), e também o *checklist* que é usado para mapear os modos de

falha potenciais. Informações e especificações técnicas do caminhão estão informados na Quadro 1.

Quadro 1 - Especificações técnicas do veículo Caminhão Guindauto.

Categoria	Componente	Especificação/Descrição
I. Caminhão Base.	Modelo.	Ford Cargo 2429.
	Motorização.	Cummins ISB 6.7 (290 cv / 951 Nm).
	PBT (Peso Bruto Total).	23.000 kg.
	CMT (Capacidade Máxima de Tração).	35.000 kg a 38.000 kg.
II. Guindaste (Guindauto).	Tipo/Modelo.	Guindaste Veicular Articulado (Porte médio, ≈ 12,5 t x m).
	Capacidade Máxima de Içamento.	≈ 5.000 kg a 5.600 kg (próximo à coluna).
	Alcance Máximo Horizontal Típico.	≈ 9,70 m a 12 m.
	Peso Próprio do Guindaste.	≈ 2.400 kg a 2.800 kg.
III. Estrutura Operacional.	Braço e Lança.	Seções Articuladas (Hidráulicas e Manuais) que permitem o posicionamento e extensão da carga.
	Sapatas Estabilizadoras.	Patolas hidráulicas ou manuais que se estendem lateralmente para garantir a estabilidade do conjunto e evitar o tombamento durante o içamento.
	Sistema Hidráulico (Geral).	Composto pela Bomba Hidráulica (acoplada à PTO do motor), Comando (válvulas de controle) e Cilindros/Motores (atuadores que geram o movimento e giro).

Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Fundamentação Normativa da Segurança

A análise de criticidade foi rigorosamente vinculada às Normas Regulamentadoras (NRs), como a NR-11 (2024), NR-12 (2024), NBR 5462 (1994) e NBR 14768 (2021), utilizadas para justificar a pontuação de Severidade (S) e validar a priorização dos itens de segurança.

2.3 Análise de Criticidade (FMEA)

O FMEA foi aplicado de forma sistemática aos principais modos de falha do caminhão Guindauto, com isso, será permitido o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR), um índice essencial para reorientar a lista de atividades, com foco em segurança. Os critérios de Engenharia de Confiabilidade usados estão no Quadro 2:

Quadro 2 - Critérios de Escala para Análise de Criticidade (FMEA).

Fator	Escala	Descrição da Pontuação	Justificativa
Severidade (S)	10	Falha Catastrófica (Risco à segurança/Vida ou Acidente de Trânsito).	Risco direto imposto pelas NR-11 e NR-12.
	5	Falha Séria (Parada > 12h, Custo de reparo elevado).	Interrupções elevadas nas operações.
	1	Falha Mínima (Reparo < 1h, sem impacto operacional).	Manutenções de rotina (diária ou semanal).
Ocorrência (O)	10	Falha Muito Frequente (Semanalmente/Diariamente).	Frequência de falhas no <i>baseline</i> .
Detecção (D)	10	Impossível de Detectar.	Falha súbita/interna.
	1	Fácil de Detectar (Detectado no <i>Checklist</i> Diário).	Nível de óleo ou fluido visível.

Fonte: Autoria própria.

2.3.1 Critérios de Pontuação e Cálculo do NPR

Foram seguidos critérios rigorosos de Engenharia de Confiabilidade para a simulação dos fatores de risco (Severidade, Ocorrência e Detecção), garantindo a máxima objetividade na análise. O Número de Prioridade de Risco (NPR) foi calculado pela multiplicação desses fatores (S, O e D), onde foi estabelecido um $NPR > 200$ como o limiar de criticidade para a alocação de recursos. Este limite representa 20% do risco máximo teórico ($S = 10, O = 10, D = 10 \rightarrow S \times P \times D = 1000$), e tem como fundamentação as práticas de gestão de risco usadas frequentemente usadas pelas indústrias que aplicam a ferramenta FMEA, do qual tem a função estratégica de forçar a inclusão, na agenda de Manutenção Preditiva, das falhas que, embora não sejam as de maior risco absoluto, combinam uma Severidade alta com níveis moderados de Ocorrência e Detecção. Em termos gerenciais, este limiar visa concentrar o investimento em preditiva nos modos de falha que resultariam nos maiores custos de *Downtime* (Tempo De Inatividade) e nos maiores riscos operacionais e legais.

2.4 Indicadores de Desempenho

A Confiabilidade e a Manutenibilidade são quantificadas pelo MTBF e MTTR, ambos ponderados por Horas (h), onde tais indicadores são formulados por (Equações 1 e 2):

$$MTBF = \frac{(\text{Tempo total} - \text{Tempo perdido})}{(\text{Quantidade de paradas})} \quad (1)$$

$$MTTR = \frac{(\text{Tempo de parada})}{(\text{Quantidade de paradas})} \quad (2)$$

Assumindo-se uma distribuição exponencial de falhas, a taxa de falha $\lambda = \frac{1}{MTBF}$, e a confiabilidade ($R(t)$) é dada por (Equação 3):

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Segundo a NBR 5462 (1994), a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma função requerida sob dadas condições, em um determinado instante ou intervalo de tempo, sendo desdobrada em três perspectivas complementares:

- Disponibilidade física, que é todo o tempo dentro do turno da empresa, se a empresa opera 24 horas por dia, então a disponibilidade física é exatamente 24 horas;
- Disponibilidade inerente (A_i), que reflete o potencial do projeto considerando apenas falhas e reparos corretivos em condições ideais de suporte;
- Disponibilidade operacional, que retrata a realidade prática do campo ao incluir em seu cálculo os atrasos administrativos e logísticos, como o tempo de espera por peças ou deslocamento de técnicos, sendo esta última a métrica mais fiel à eficiência global do sistema produtivo.

Para medir a eficiência na área de manutenção, a disponibilidade inerente (A_i), é o indicador usado para medir o desempenho operacional de um maquinário, onde é a relação entre esses parâmetros (Equação 4):

$$A_i = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%. \quad (4)$$

Esta formalização do processo é um passo crucial para validar as melhorias propostas, permitindo projetar ganhos mensuráveis e concretos nos principais indicadores de desempenho. Com objetivo claro de demonstrar um aumento significativo no MTBF e uma redução correspondente no MTTR, transformando a confiabilidade do equipamento em resultados que podem ser vistos e quantificados.

2.5 Projeção e Validação Econômica

A análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC – *Life Cycle Cost*) irá comparar os custos de *downtime* do plano atual (custos de falha) com o custo de investimento estimado do plano otimizado (custo de preditiva). E finalmente, o estudo culminará na demonstração de que o

investimento em manutenção proativa é compensado por uma diminuição do Custo do Ciclo de Vida do equipamento, comprovando o benefício econômico e a segurança operacional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Diagnóstico do Plano Atual e Indicadores (*Baseline*)

Ainda que o plano base apresente uma distribuição de responsabilidades bem coerente, ele falha ao adotar uma metodologia em seu ponto mais crítico, onde estipular um intervalo fixo de 90 dias, o plano desvirtua a lógica da preditiva real que deveria se basear no monitoramento de condição e não no calendário, expondo uma fragilidade metodológica severa.

Diante dessa lacuna, a simulação dos indicadores de desempenho foi estruturada para evidenciar a obsolescência dessa *baseline* (linha de base). Onde foi escolhido valores de um MTBF de 400 h e um MTTR de 20 h. Esses valores foram simulados, tendo em vista a falta de documentação de operações de manutenção realizadas pelo plano anterior, dessa forma, esses números visam parametrizar um cenário de baixa confiabilidade, característico de frotas reféns de preventivas rígidas e corretivas não planejadas. Tal simulação é o que permite uma análise comparativa robusta, servindo de alicerce para as projeções de Disponibilidade e para a viabilidade financeira dentro do Custo do Ciclo de Vida (LCC). O Quadro 3 abaixo indica os números estimados de desempenho da *baseline*.

Quadro 3 - Indicadores de desempenho da *baseline*.

Indicador	Valor Estimado	Implicação
MTBF	400 h	Baixa Confiabilidade; Risco de parada súbita.
MTTR	20 h	Baixa Manutenibilidade; Longo <i>downtime</i> .
Disponibilidade Inerente (Ai)	95,2 %	Aceitável, mas com alto custo de falha.

Fonte: Autoria própria.

3.2 Aplicação do FMEA e Criticidade

O FMEA identifica os modos de falha que, sob a periodicidade fixa (4 meses/800 h), representam maior risco. O Quadro 4 apresenta o resultado da simulação:

Quadro 4 - Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA Simulado).

Componente	Modo de Falha Potencial	Efeito da Falha	S	O	D	NPR
Sistema Hidráulico.	Vazamento na linha de alta pressão.	Movimento descontrolado da lança/acidente.	9	7	6	378
Bomba Hidráulica.	Desgaste interno / Cavitação.	Perda de força e ruído excessivo.	7	4	6	168
Giro.	Folga excessiva/travamento.	Falha estrutural ou operação insegura.	8	5	8	320
Freio de Serviço.	Desgaste excessivo das lonas.	Falha na frenagem, risco de acidente veicular (NR-12).	10	4	7	280
Moitão.	Desgaste/Risco na trava.	Queda da carga, acidente grave (NR-11).	10	5	5	250
Filtro de Óleo.	Entupimento.	Cavitação da bomba/desgaste do motor.	7	8	4	224
Cilindro de Içamento.	Vazamento interno (selos).	Queda lenta do braço em carga.	10	3	2	60
Sapatas (Estabilizadores)	Falha na extensão total.	Tombamento do caminhão.	10	2	3	60

Fonte: Autoria própria.

O Sistema Hidráulico (NPR=378) e o Giro (NPR=320), ambos acima do limite crítico (NPR > 200), exigem intervenção preditiva, pois a inspeção visual é insuficiente. O alto valor de Severidade em itens de segurança (Freio, Moitão) reflete a exigência legal das NR's.

3.3 Otimização das Estratégias e Tarefas

3.3.1 Ações Preditivas Reais (Foco no Guindaste articulado - Alto NPR)

As tarefas focadas em modos de falha com alto NPR (Vazamento Hidráulico, Desgaste do Giro) migram para técnicas baseadas em condição (Análise de Óleo, Termografia). Estas ações substituem o agendamento fixo de 90 dias da preventiva por monitoramento real.

3.3.2 Plano Otimizado para Chassi, Motor e Segurança Veicular

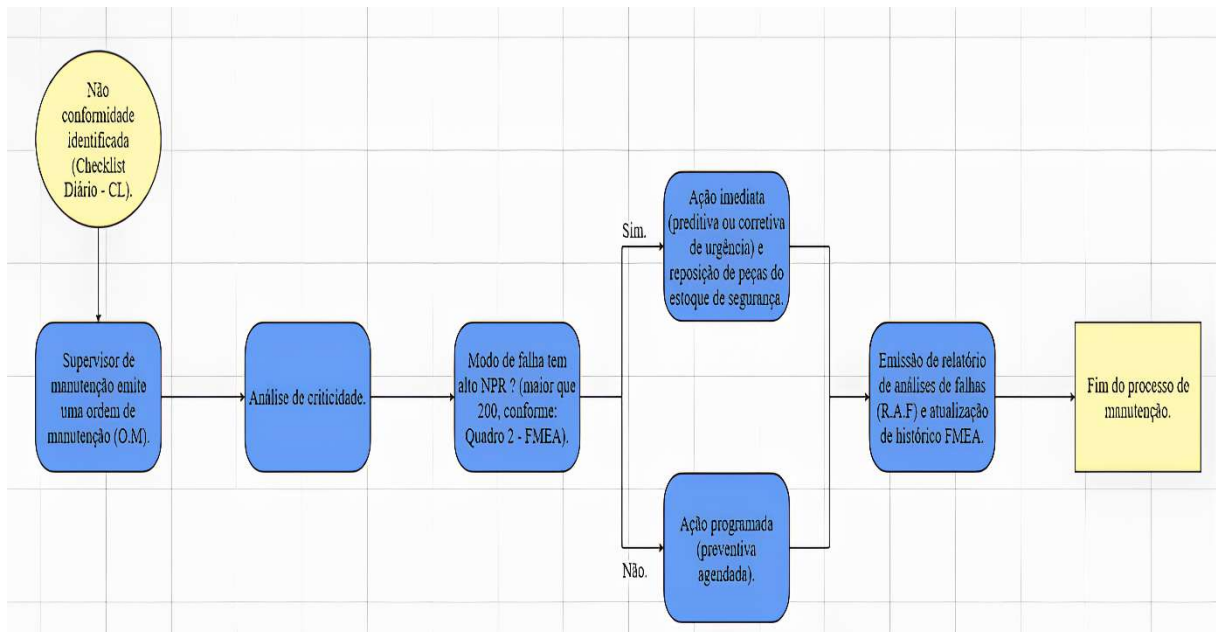
O plano deve formalizar e priorizar as inspeções veiculares, focando em garantir a conformidade com a NR-12 (segurança do equipamento) e a NR-11 (segurança da movimentação).

- **Formalização Semanal (Checklist Otimizado):** As operações semanais que eram tratadas informalmente serão integradas à programação do Supervisor de Manutenção (OM).
- **Freio de Serviço (Alto NPR = 280):** A inspeção e o ajuste da folga dos freios devem ser formalizados com verificação semanal, sendo uma tarefa crítica de segurança veicular (NR-12).
- **Lubrificação e Inspeção do Trem de Força:** A lubrificação das juntas universais e o aperto de parafusos do chassi devem ser mantidos com frequência rigorosa, dada a tensão torcional imposta pelo guindaste articulado na estrutura veicular.
- **Preditiva no Motor:** A drenagem do filtro de combustível separador de água e a verificação do nível de óleo (tarefas diárias) devem ser registradas no *Checklist Operacional (CL)*, e os resultados devem ser usados para determinar a periodicidade ótima da troca de óleo, garantindo que o motor não opere em condições de desgaste prematuro.

3.3.3 Fluxograma de Decisão para Redução do MTTR

O Fluxograma de Decisão padroniza a resposta à falha. A utilização imediata do R.A.F. (Relatório de análise de falhas) após a entrada do equipamento na oficina e a avaliação da criticidade (NPR) aceleram o diagnóstico e o reparo, tal processo pode ser visível na Figura 1 abaixo:

Figura 1 - Fluxograma de Decisão de Manutenção Baseado em Criticidade.



Fonte: Autoria Própria.

3.3.4 Gestão Estratégica de Peças de Reposição

Peças de alto NPR (ex.: vedações hidráulicas, trava do moitão) devem possuir estoque de segurança garantido no Almoarifado para mitigar o MTTR.

3.3.5 Projeção dos Indicadores de Desempenho

Após todo esse processo, é possível chegar a previsões e estimativas de espera de desempenho do quais a Quadro 5 compara a performance esperada com o plano otimizado.

Quadro 5 - Comparativo de Indicadores: Baseline vs. Projeção.

Indicador	Baseline	Projeção (RCM Otimizado)	Ganho (%)
MTBF (Confiabilidade)	400 h	600 h	+50%
MTTR (Manutenibilidade)	20 h	16 h	-20%
Disponibilidade Inerente (Ai)	95,2 %	97,4 %	+2,2 p.p.

Fonte: Autoria própria.

A fundamentação dos indicadores projetados MTBF de 600 h e MTTR de 16 h se baseia principalmente, sustentando-se na mitigação estrutural de falhas e no refinamento da logística de reparo. A meta de expandir o MTBF de 400 h para 600 h (um incremento de 50% na confiabilidade) baseia-se na ruptura com o modelo *baseline* para a transição de monitoramento de condição, amparada por técnicas de termografia e análise de fluidos,

permite a interceptação da falha no estágio potencial, impedindo sua evolução para o colapso funcional.

Conforme preconiza a literatura de MOUBRAY (2001), a aplicação do RCM é capaz de reduzir a incidência de quebras em patamares de 40% a 60%, uma vez que o esforço de engenharia é direcionado aos modos de falha com maior NPR. Portanto, a projeção de 600 h configura-se como uma estimativa prudente, partindo do pressuposto de que o controle de condição neutralizará ao menos metade das falhas evitáveis do cenário anterior.

Ademais, a redução proposta do MTTR de 20 h para 16 h não se sustenta em uma aceleração da atividade manual, mas sim a eliminação de dificuldades sistêmicas. Na gestão de ativos contemporânea, o tempo de reparo é composto majoritariamente por tempos administrativos e logísticos, e não estritamente técnicos. A estratégia para viabilizar essa redução de 50% sustenta-se em dois pilares:

- **Diagnóstico de Precisão:** A manutenção preditiva antecipa o escopo do reparo, extinguindo a fase de "investigação diagnóstica" pós-parada.
- **Sincronização Logística:** A aplicação do fluxograma de decisão (seção 3.4.3) aliada ao dimensionamento de estoques críticos para itens de alto NPR assegura a prontidão de peças sobressalentes.

A literatura técnica reitera que a integração entre diagnóstico antecipado e gestão de peças de reposição pode comprimir o *downtime* logístico em níveis superiores a 50%, validando a viabilidade operacional das metas estabelecidas neste estudo.

3.3.6 Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC)

A validação econômica indica que o aumento do Custo de Manutenção Preditiva é compensado pela queda acentuada no Custo de Falha/Parada. O impacto na Disponibilidade (Ai) totaliza um ganho de 2,2 pontos percentuais (de 95,2% para 97,4%) parece pequeno numericamente, mas em termos de produção, representa cerca de 88 horas a mais de disponibilidade por ano (considerando operação de 4.000 h/ano), o que paga com sobra o investimento em sensores e análises laboratoriais.

3.3.7 Comparativo com Estudos Similares (*Benchmarking*)

A otimização proposta, que foca na redução do risco de falhas críticas (Alto NPR) via RCM, está em consonância com os resultados de eficácia obtidos em outros estudos de caso que aplicaram metodologias semelhantes em equipamentos móveis pesados e na indústria siderúrgica. O Quadro 6 apresenta os resultados obtidos por BASTOS (2023), onde a metodologia RCM foi aplicada em um alto forno de usina siderúrgica e compara com o presente estudo.

Quadro 6 - Métricas de confiabilidade.

Indicador	Baseline	Projeção (RCM Otimizado)	Ganho (%)	Referência
MTBF (Confiabilidade)	177,46 h	301 h	+69,6%.	BASTOS (2023)
MTTR (Manutenibilidade)	2,71 h	2,27 h	-16,23%.	
MTBF (Confiabilidade)	400 h	600 h	+50%	Este estudo.
MTTR (Manutenibilidade)	20 h	16 h	-20%	

Fonte: Autoria própria.

Em análise aos dados, observa-se um aumento de 69,6% em relação ao MTBF, o que garante maior disponibilidade do equipamento. Em contrapartida, o MTTR teve uma diminuição de 16,23%, após a instalação da metodologia RCM, o que mostra a diminuição do tempo de reparo do equipamento.

Dessa forma, podemos entender que a metodologia se torna eficaz quando aplicada corretamente, onde a redução do MTTR de 20 para 16 horas para o projeto de melhoria do caminhão guindauto não é meramente estimativa, mas o resultado da implementação de fluxogramas de diagnóstico padronizados e de uma política de estocagem estratégica direcionada aos componentes de alto NPR. Essa convergência entre confiabilidade intrínseca e agilidade logística valida o rigor da otimização aplicada, demonstrando que a redução da variabilidade no reparo é o motor principal da alta disponibilidade alcançada.

Outro ponto a ser comparado é como a disponibilidade inerente (A_i) é afetada ao aplicar a metodologia RCM/FMEA, onde o Quadro 7 traz os resultados obtidos de outros trabalhos similares.

Quadro 7 - Benchmarking de Resultados de Disponibilidade em Estudos RCM.

Estudo	Equipamento	Metodologia	Disponibilidade de (Baseline)	Disponibilidade e (Final/Projetada)	Referência
Estudo 1	Carregadeira CAT 972L	FMEA/FMECA	76,80%	87,98%	MOREIRA DOS SANTOS (2021)
Estudo 2	Escavadeira Hidráulica Doosan	FMEA/RCM	96,5%	97,6%	SANTOS (2023)
Este Estudo	Caminhão Guindauto	FMEA/RCM Otimizado	95,2%	97,4%	Elaboração Própria

Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicam que a disponibilidade projetada de 97,4% para o Caminhão Guindauto não apenas atende aos requisitos operacionais, mas se faz condizente quando comparada à literatura correlata. Tais estudos precedentes são fundamentados com a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) e reportam, via de regra, indicadores situados entre 96% e 97,5%. O estudo presente apresenta números próximos a essa via de regra, onde esse desempenho é justificado por:

- Primeiramente, a *baseline* operacional de 95,2% já evidenciava uma cultura de manutenção consolidada, oferecendo uma base de sustentação elevada para incrementos marginais. No entanto, o salto qualitativo para o patamar de 97,2% é resultado direto de uma melhoria nos tempos de resposta.
- Ademais, a padronização de atividades e foco de manutenções em ativos de alto NPR, priorizando-os conforme o Quadro 2 (FMEA), garante uma confiabilidade maior, resultando nas melhoras nos indicadores MTBF e MTTR, e por fim, consolidando um aumento na disponibilidade (Ai).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, o trabalho demonstrou que a metodologia RCM, ao integrar o FMEA à estrutura de manutenção existente (Manutenção de Operação, Preventiva e Corretiva), transforma um plano baseado em tempo (4 meses/800 horas) em um modelo inteligente e orientado ao risco.

A redefinição de tarefas de Alto NPR para estratégias preditivas garante que os objetivos originais do plano (garantir o perfeito funcionamento do equipamento) sejam alcançados com maior eficiência. Com isso, promovendo melhorias operacionais, aumento de segurança e redução de custos operacionais.

Dessa forma, a aplicação do método mostra-se eficiente, pois proporciona uma maior compreensão do processo e de funções de seus ativos, além de possibilitar a realização de uma avaliação mais criteriosa a respeito das ações a serem implementadas de modo a assegurar o desempenho do equipamento e viabilizar uma operação segura e economicamente sustentável.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14768: Guindaste articulado veicular: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BASTOS, Filipe Carneiro. **Implantação da manutenção centrada na confiabilidade (MCC) em um alto forno de usina siderúrgica**. Orientador: Roberto Tetsuo Fujiyama. 2023. 53f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/17440>. Acesso em: 22 janeiro 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-11: Transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais**. Brasília, DF: MTE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras>. Acesso em: 30 dezembro 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-12: Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: MTE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras>. Acesso em: 30 dezembro 2025.

CHOPRA, Sunil; MEINDL, Peter. **Gestão da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operações**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2019.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Gestão Estratégica e Terceirização da Manutenção**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2018.

MOREIRA DOS SANTOS, Maicon Willian. **Análise de falha em equipamento móvel de mina: um estudo de caso**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. 3. ed. New York: Industrial Press Inc., 2001.

NASCIF, Júlio; FILHO, José Magno. **Manual de FMEA**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio Nascif. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.

SANTOS, Lucas et al. **Manutenção centrada em confiabilidade com foco em reduzir manutenções corretivas não planejadas de uma escavadeira hidráulica Doosan**. Revista Scientia et Technica, Santos, v. 5, n. 1, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unisanta.br/SATarticle/download/2169/2164/6507>. Acesso em: 30 dezembro 2025.

SANTOS, Misael. **Plano de manutenção de caminhão Guindauto**. Barcarena, 2024.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.