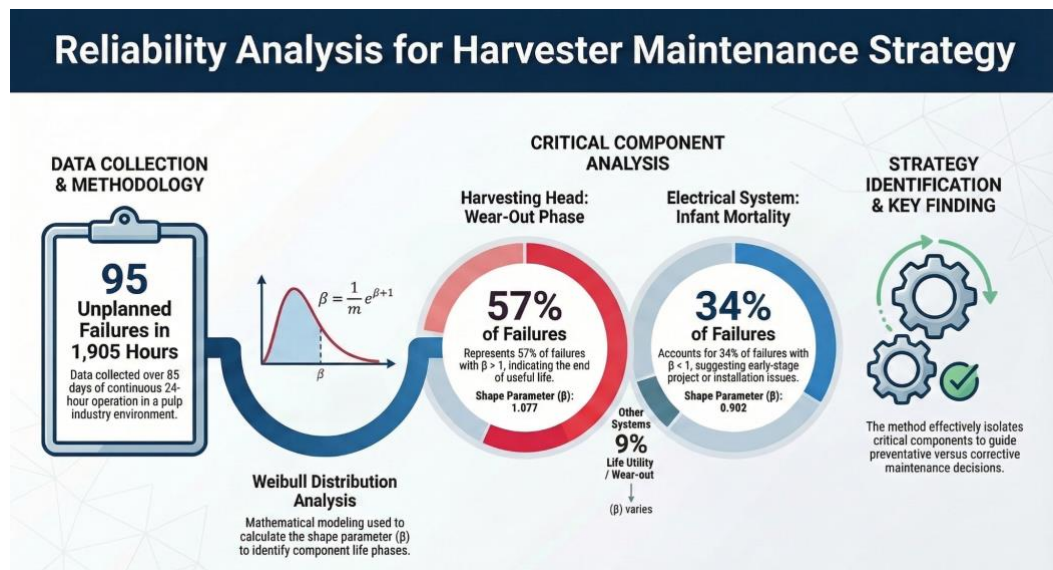


GRAPHICAL ABSTRACT



Reliability analysis of a Komatsu PC200 harvester using Weibull distribution, identifying the harvesting head as the most critical system and guiding strategic maintenance decisions

ESTUDO DE CONFIABILIDADE BASEADO NA ANÁLISE DE DADOS DE FALHAS DE UMA HARVESTER (COLHEITADEIRA FLORESTAL) NO SETOR DE CELULOSE

RELIABILITY STUDY BASED ON FAILURE DATA ANALYSIS OF A FOREST HARVESTER IN THE PULP INDUSTRY

Diego dos Santos Altoé¹, Henver Effgen Ludovico Ramos¹, Walber Ronconi dos Santos¹ e Leonardo Belichi Vieira¹, João Paulo Barbosa¹*

¹Coordenadoria de Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo Campus São Mateus, 29032-540 São Mateus – ES, Brasil

* jpbbarbosa@ifes.edu.br

Artigo submetido em 21/03/2026, aceito em 28/08/2026 e publicado em 03/09/2026.

ORCID – Diego dos Santos Altoé: <https://orcid.org/0009-0005-0380-2548>

ORCID – Henver Effgen Ludovico Ramos: <https://orcid.org/0009-0000-0734-1113>

ORCID – Walber Ronconi dos Santos: <https://orcid.org/0000-0002-9092-7920>

ORCID – Leonardo Belichi Vieira: <https://orcid.org/0000-0002-9660-1147>

ORCID – João Paulo Barbosa: <https://orcid.org/0000-0002-9659-8056>

Resumo: O presente estudo aborda a aplicação da engenharia de confiabilidade na gestão de ativos florestais, especificamente em *harvesters* operantes em uma indústria de celulose, visando mitigar a indisponibilidade não programada e otimizar custos operacionais. O método consistiu em um estudo de caso exploratório fundamentado na análise de falhas de um equipamento Komatsu PC200F durante 85 dias de operação contínua (1905 horas), totalizando 96 falhas não programadas. Utilizou-se a Distribuição de Weibull para modelar o comportamento de falha dos subconjuntos estratificados: cabeçote, motor, sistemas elétrico, hidráulico e de arrefecimento. O processamento estatístico foi realizado via *software* Weibull++ para estimativa dos parâmetros de forma (β) e escala (η). Os resultados demonstraram que o cabeçote (57% das incidências) e o sistema elétrico (34%) são os subconjuntos críticos. A análise global ($\beta = 1,03$; $\eta = 963,25$ h) indicou um ativo em regime de vida útil com tendência ao envelhecimento. O cabeçote ($\beta = 1,07$; $\eta = 975,26$ h) revelou-se na fronteira crítica do desgaste senil, corroborando a estratégia de substituição da empresa. O sistema elétrico ($\beta = 0,90$; $\eta = 822,89$ h) apresentou comportamento típico do período inicial de taxa de falhas, indicando a ocorrência de falhas prematuras possivelmente associadas à insuficiência de testes iniciais de funcionamento (*burn-in*), destinados a identificar defeitos de fabricação ou de montagem antes da entrada em serviço. O indicador B_{10} global de 107 horas evidencia a suscetibilidade a falhas em estágios iniciais. O estudo comprova a eficácia da modelagem de Weibull na antecipação de diagnósticos e no suporte a decisões estratégicas de manutenção.

Palavras-chave: confiabilidade; distribuição de weibull; harvester; manutenção florestal, dados de falhas.

Abstract: The present study addresses the application of reliability engineering in the management of forestry assets, specifically in harvesters operating in a cellulose industry, aiming to mitigate unscheduled unavailability and optimize operational costs. The method consisted of an exploratory case study based on the failure analysis of a Komatsu PC200F equipment during 85 days of continuous operation (1905 hours), totaling 95 unplanned failures. The Weibull Distribution was used to model the failure behavior of the stratified subassemblies: cylinder head, engine, electrical, hydraulic, and cooling systems. Statistical processing was carried out via Weibull++ software to estimate the shape (β) and scale (η) parameters. The results demonstrated that the head (57% of incidents) and the electrical system (34%) are the critical subassemblies. The overall analysis ($\beta = 1.03$; $\eta = 963.25$ h) indicated an asset in a useful life regime with a tendency to aging. The head ($\beta = 1.07$; $\eta = 975.26$ h) proved to be at the critical threshold of senile wear, corroborating the company's replacement strategy. The electrical system ($\beta = 0.90$; $\eta = 822.89$ h) exhibited behavior typical of the early failure rate period, indicating the occurrence of premature failures possibly associated with insufficient initial operational testing (*burn-in*) intended to identify manufacturing or assembly defects prior to entry into service. The global B_{10} indicator of 107 hours highlights susceptibility to failures in early stages. The study proves the effectiveness of Weibull modeling in anticipating diagnoses and supporting strategic maintenance decisions.

Keywords: reliability; weibull distribution; harvester; forest maintenance, failure data.

1 INTRODUÇÃO

A competitividade global no setor de celulose e papel impõe uma busca incessante pela otimização de processos e redução de gargalos produtivos. Nesse panorama, a gestão de manutenção transcende a mera reparação de ativos, consolidando-se como uma função estratégica para garantir a continuidade operacional e a rentabilidade (Kardec; Nascif, 2009). A transição para modelos de manutenção proativa fundamentados em análise estatística permite a mitigação de falhas operacionais intermitentes e o aumento da disponibilidade física dos ativos críticos (Freitas *et al.*, 2020).

No cerne da exploração florestal mecanizada, colheitadeira *harvester* figura como o ativo de maior relevância. Trata-se de um equipamento multicomponente complexo, responsável pelas funções simultâneas de derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento de madeira em regime de operação severa (24 horas/dia) (Bonazza *et al.*, 2023). Dada a densidade tecnológica e o elevado custo de aquisição e operação do modelo Komatsu PC200F que pode chegar a dois milhões de reais, a aplicação de conceitos de confiabilidade é imperativa para a sustentabilidade do negócio (Souza; Pires, 2008). Nesse contexto, a confiabilidade em *harvesters* tem sido objeto de crescente investigação na literatura recente (Li, 2025; Wang, 2025; Xu, 2025).

A NBR 5462 destaca que a confiabilidade é definida como a probabilidade de um item desempenhar sua função requerida sob condições específicas em um intervalo de tempo determinado (ABNT, 1994). De acordo com Farsi (2024), a confiabilidade global de um sistema é determinada pela performance de seus componentes críticos. Nesse sentido, a melhoria do comportamento operacional do equipamento está diretamente vinculada à integridade desses elementos, os quais demandam investigação detalhada para a otimização dos índices de disponibilidade.

A relevância da análise de componentes principais para a confiabilidade também é ratificada no estudo de Nascimento *et al.* (2020), onde os autores evidenciam o impacto direto desses elementos na performance de uma *harvester* para cana de açúcar.

A análise de confiabilidade em sistemas de engenharia tornou-se um pilar estratégico para a otimização da manutenção e redução de custos operacionais (Elsayed, 2021). Nesse contexto, a Distribuição de Weibull destaca-se como uma das funções de densidade de probabilidade mais versáteis e amplamente aplicadas para a modelagem do tempo de vida de ativos mecânicos (Aldallal, 2026; Santos *et al.*, 2025).

A predominância deste modelo estatístico na literatura e na prática industrial justifica-se pela flexibilidade de seus parâmetros de forma (β) e escala (η), que permitem o ajuste preciso a diferentes taxas de falha. Conforme discutido por Xu e Mao (2025), a metodologia de Weibull apresenta elevada aderência aos fenômenos descritos pela Curva da Banheira, permitindo a caracterização analítica das três fases distintas do ciclo de vida de um componente: as falhas prematuras, a taxa de falha constante e o regime de falhas por desgastes.

Adicionalmente, autores como Odeyar *et al.* (2022) e Fakoor e Kaklar (2023) reiteram que, ao contrário de distribuições mais rígidas como a Exponencial, a distribuição de Weibull permite identificar se um equipamento está operando sob estresse mecânico severo ou fadiga, tornando-a indispensável para a elaboração de planos de manutenção preventiva e preditiva em sistemas complexos.

Estudos recentes demonstram a aplicação da distribuição de Weibull para a modelagem de dados de falha e para a avaliação da confiabilidade de ativos

industriais, permitindo a identificação de padrões de degradação e o suporte à tomada de decisão em estratégias de manutenção (Rocha; Morais, 2020; Gomes; Andrade, 2020; Kozlowski *et al.*, 2024).

Apesar da ampla utilização da distribuição de Weibull na análise de confiabilidade de equipamentos industriais, ainda são limitados os estudos aplicados a máquinas de colheita florestal operando em regime severo, especialmente considerando a análise de sistemas específicos do equipamento. Nesse contexto, o presente estudo objetiva aplicar a engenharia de confiabilidade em uma *harvester*, identificando sistemas críticos e diagnosticando o estágio do ciclo de vida dos componentes por meio da Distribuição de Weibull, fornecendo subsídios técnicos para o refinamento do plano de manutenção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 OBJETO DE ESTUDO E ESTRATIFICAÇÃO

O objeto de análise é uma *harvester* Komatsu PC200F, no qual foi adotada a estratificação de subconjuntos, subdividindo o ativo em cinco sistemas: cabeçote, sistema elétrico (bateria, iluminação, painéis), sistema hidráulico (válvulas, bombas, mangueiras), sistema de arrefecimento e motor.

2.2 COLETA DE DADOS DE FALHAS E REGIME OPERACIONAL

Os dados de falhas foram coletados pela equipe de operação e manutenção ao longo de 85 dias, totalizando 1905 horas de operação efetiva, conforme o Quadro 1. Os registros correspondem ao tempo acumulado de operação até a ocorrência de cada falha, obtidos diretamente do software de monitoramento do equipamento no qual foram apresentadas cores distintas em que representam os tipos de falhas encontradas.

Para fins de análise de confiabilidade, foi considerado como marco inicial da observação o instante imediatamente posterior à realização de uma manutenção preventiva programada, assumindo-se, portanto, que o equipamento se encontrava em condições operacionais adequadas no início do período de monitoramento.

Quadro 1 - Tempos para falha estratificado (em horas)

3,2	3,3	19,5	31,1	58,9
69,2	69,3	70,1	71,7	120,7
146,5	169,9	191,6	192,6	194,1
196,6	196,7	237,5	301,0	381,6
385,1	385,3	385,3	387,3	406,8
413,0	413,0	462,7	469,0	469,3
470,9	485,1	491,7	502,4	505,8
512,8	535,8	537,7	554,9	558,7
565,8	566,4	585,7	600,0	618,2
629,8	642,2	734,1	896,4	896,4
902,8	914,1	928,5	934,5	936,7
993,4	998,5	1051,0	1085,9	1093,0
1103,6	1106,5	1109,0	1129,1	1132,9
1133,9	1134,8	1221,6	1256,3	1275,0
1345,6	1384,3	1385,4	1396,5	1403,1
1416,0	1428,2	1511,6	1519,8	1537,2
1537,3	1623,6	1649,6	1771,0	1775,2
1780,2	1790,9	1811,7	1825,6	1828,6
1834,3	1852,5	1855,6	1872,2	1904,3

Legenda:

Cab.	Motor	Sis. Arref.	Sis. Elét.	Sis. Hidr.
------	-------	-------------	------------	------------

Fonte: Autores.

2.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA VIA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A Distribuição de Weibull foi selecionada devido à sua versatilidade para modelar diferentes comportamentos de falha, desde componentes eletrônicos até sistemas mecânicos sujeitos a fadiga (Fogliatto; Ribeiro, 2009). As funções

fundamentais de Confiabilidade $R(t)$ e Taxa de Falhas $h(t)$ são expressas por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

Onde β representa o parâmetro de forma (determinante da fase do ciclo de vida) e η representa o parâmetro de escala ou vida característica (tempo para o qual a probabilidade de falha é de 63,2%) (Fogliatto; Ribeiro, 2009). Os parâmetros foram calculados através do *software* Weibull++ (*Reliasoft*).

Em análises de confiabilidade baseadas na distribuição de Weibull, é comum utilizar percentis de vida para interpretar o comportamento de falhas dos componentes (Elsayed, 2021). O indicador B_{10} representa o tempo no qual 10% da população analisada já apresentou falha, correspondendo a um nível de 90% de confiabilidade. A partir da função $R(t)$ de Weibull, o tempo associado ao percentil B_{10} pode ser obtido adotando-se $R(t) = 0,9$, resultando em:

$$B_{10} = \eta[-\ln(0,9)]^{1/\beta} \quad (3)$$

2.4 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA (CURVA DA BANHEIRA)

A interpretação do parâmetro de forma β permite classificar o comportamento da taxa de falhas ao longo do tempo, possibilitando associar o comportamento do sistema às diferentes fases da "Curva da Banheira":

$\beta < 1$ (Período inicial de taxa de falhas): Taxa de falhas decrescente, associada a falhas devido à insuficiência de testes iniciais de funcionamento (*burn-in*), defeitos de fabricação ou erros de instalação.

$\beta \approx 1$ (Vida Útil): Taxa de falhas constante, caracterizada por falhas aleatórias e imprevisíveis.

$\beta > 1$ (Desgaste/Senescência): Taxa de falhas crescente, indicando envelhecimento e fadiga de materiais (Teles, 2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTRATIFICAÇÃO E INCIDÊNCIA DE FALHAS

Registraram-se 95 interrupções não programadas no período. A Tabela 1 evidencia a severidade das falhas no Cabeçote e no Sistema Elétrico, que juntos representam 91% da indisponibilidade do ativo.

Esse resultado é um indicativo de que os subsistemas diretamente associados ao processamento da madeira e ao controle eletrônico do equipamento concentram a maior parte dos eventos de falha, justificando a priorização dessas áreas em estratégias de manutenção preventiva e preditiva.

Tabela 1: Distribuição de incidências de falha por subconjunto

Subconjunto	Incidências	Porcentagem (%)
Cabeçote	54	57%
Sistema Elétrico	32	34%
Sistema Hidráulico	4	4%
Sistema de Arrefecimento	3	3%
Motor	2	2%
Total	95	100%

Fonte: Autores.

3.2 ANÁLISE GLOBAL E ESPECÍFICA POR WEIBULL

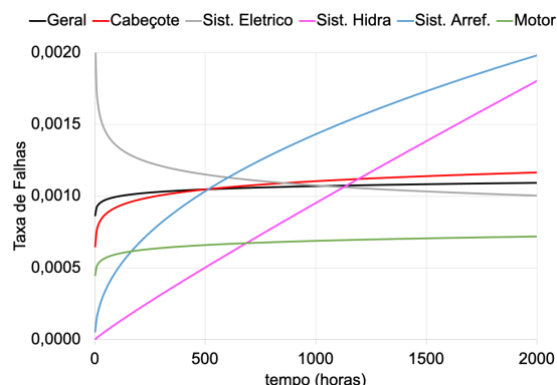
O comportamento global do Komatsu PC200F apresentou $\beta = 1,030677$ e $\eta = 963,25$ horas. Tais valores indicam que o equipamento opera majoritariamente em sua fase de vida útil, mas com uma transição iminente para a fase de envelhecimento acelerado.

Os parâmetros de forma encontrados ficam claros na Figura 1, onde é possível observar um comportamento decrescente para o sistema elétrico, enquanto os sistemas hidráulicos e de arrefecimento tem um comportamento crescente, tendo o cabeçote, motor e as falhas em geral um comportamento próximo do constante que representa falhas aleatórias, destacando-se que o motor possui uma quantidade bem menor de taxa de falha.

A análise dos parâmetros de forma, consolidados na Figura 1, revela distinções fundamentais nos dados de falhas estudados. Observa-se que o sistema elétrico apresenta um regime de falhas decrescente, ao passo que os sistemas hidráulico e de arrefecimento exibem taxas de falha crescentes. O cabeçote, o motor e o agregado de falhas gerais apresentam taxa de falha aproximadamente constante, sugerindo a predominância de falhas aleatórias. Ressalta-se, contudo, que o motor apresenta a menor taxa de falha entre os componentes analisados.

Análise do Cabeçote: O cabeçote obteve $\beta = 1,07687$ e $\eta = 975,26$ horas. Embora o valor de β seja numericamente próximo da unidade, tecnicamente ele situa o componente na fronteira crítica do desgaste senil. A alta densidade de falhas (57%) corrobora a confirmação da empresa de que este subconjunto operava no limite de horas previsto para substituição total, refletindo a deterioração estrutural inerente ao regime de operação severa durante o processamento da madeira.

Figura 1: Taxa de Falhas geral da *harvester* e dos seus subsistemas



Fonte: Autores.

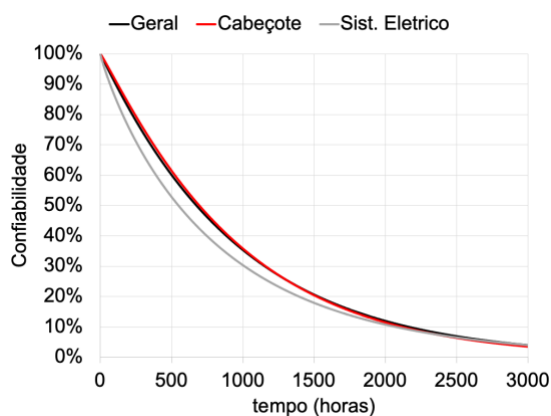
Análise do Sistema Elétrico:

Diferente da estrutura mecânica, o sistema elétrico apresentou $\beta = 0,90172$ e $\eta = 822,89$ horas. O diagnóstico é do período inicial de taxa de falhas, um sintoma clássico de instabilidade pós-intervenção ou falhas de qualidade em componentes de reposição. Sugere-se a ocorrência de falhas associadas à insuficiência de testes iniciais de funcionamento (*burn-in*) ou erros de instalação em sensores e chicotes, demandando revisão dos protocolos de controle de qualidade nas oficinas.

Conforme ilustrado na Figura 2, o cabeçote e o sistema elétrico da *harvester* apresentam comportamentos de confiabilidade análogos ao geral do equipamento, destacando-se como os subsistemas de maior criticidade operacional em relação aos demais conjuntos analisados.

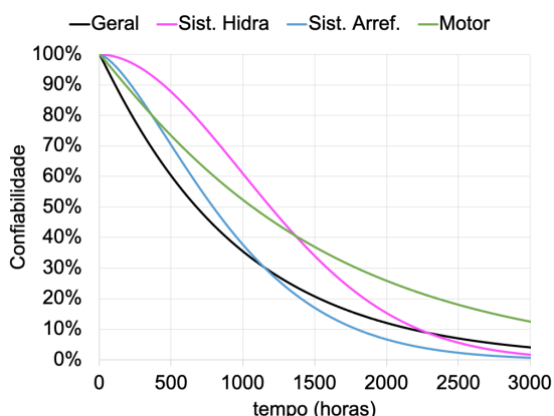
Em contrapartida, a Figura 3 demonstra que a confiabilidade do motor e do sistema hidráulico diverge do comportamento global do equipamento. Tal discrepância é atribuída à baixa incidência de falhas registradas nesses subsistemas, o que os caracterizam como componentes de baixa criticidade operacional no período avaliado, diferente do sistema de arrefecimento.

Figura 2: Confiabilidade para os dados de falhas geral da *harvester*, do cabeçote e do sistema elétrico



Fonte: Autores.

Figura 3: Confiabilidade para os dados de falhas geral da *harvester*, do motor, sist. hidráulico e sist. de arrefecimento



Fonte: Autores.

3.3 DEGRADAÇÃO DA CONFIABILIDADE NO TEMPO

A Tabela 2 apresenta a comparação da evolução da confiabilidade entre os sistemas analisados. Observa-se que o sistema elétrico apresenta confiabilidade inferior à do cabeçote nos primeiros ciclos de operação, comportamento associado à tendência de taxa de falha decrescente do período inicial de taxa de falhas observada para esse subsistema. Por outro lado, no longo prazo, o cabeçote tende a concentrar maior número absoluto de falhas, refletindo o efeito cumulativo do desgaste associado às elevadas solicitações mecânicas durante a operação do equipamento.

Tabela 2: Evolução da Confiabilidade por Subconjunto em intervalos de manutenção (~300h)

Tempo (h)	Cabeçote	Sist. Elétrico	Sist. Hidráulico	Motor
301	75,4%	66,8%	95,2%	83,4%
936	38,4%	32,5%	64,6%	54,7%
1904	12,8%	11,9%	18,1%	27,7%

Fonte: Autores.

Os dados revelam que ao atingir 1904 horas, a confiabilidade estimada pela função $R(t)$ de todos os sistemas críticos é inferior a 30%, o que valida a necessidade de intervenções preventivas estruturadas em ciclos de aproximadamente 300 horas para evitar que a confiabilidade do equipamento fique abaixo de 70%, desta forma evitando falhas.

3.4 ANÁLISE DO PERCENTIL DE VIDA B_{10}

Aplicando-se a Equação 3 ao equipamento global, obteve-se um valor aproximado de 107 horas para o B_{10} , indicando que, após esse intervalo de operação, cerca de 10% das falhas já podem ser esperadas. Para o cabeçote, subsistema com maior incidência de falhas, o valor estimado foi de aproximadamente 120 horas, sugerindo níveis relativamente elevados de confiabilidade nas primeiras horas de operação, com maior concentração de falhas em períodos posteriores. Por fim, o sistema elétrico apresentou B_{10} inferior, da ordem de 68 horas, comportamento compatível com o parâmetro de forma $\beta < 1$, característico de taxa de falha decrescente, frequentemente associada a fenômenos do período inicial de taxa de falhas, falhas de instalação ou instabilidade em componentes recém-substituídos.

4 CONCLUSÃO & PERSPECTIVAS

A aplicação da Distribuição de Weibull demonstrou ser um método consistente para o diagnóstico do comportamento de falhas da *harvester* analisado. Os resultados evidenciaram que o cabeçote encontra-se em fase inicial de desgaste, caracterizando o início de uma obsolescência funcional e justificando sua substituição programada. Essa conclusão é reforçada tanto pelo início do aumento no número de ocorrências quanto pelo parâmetro de forma $\beta > 1$, indicativo de envelhecimento.

Paralelamente, a identificação de $\beta < 1$ no sistema elétrico revelou um padrão típico do período inicial de taxa de falhas, sugerindo vulnerabilidades decorrentes de intervenções recentes, inconsistências no processo de manutenção ou possível variabilidade na qualidade dos componentes instalados. Essa tendência aponta para a necessidade de revisão dos procedimentos adotados, incluindo auditorias técnicas e melhorias no controle de sobressalentes.

A análise do percentil de vida B_{10} corrobora os resultados da modelagem de Weibull, indicando falhas em intervalos relativamente curtos de operação. Os valores de 107 horas para o equipamento global, 120 horas para o cabeçote e 68 horas para o sistema elétrico evidenciam maior suscetibilidade a falhas nas fases iniciais, especialmente no sistema elétrico. Embora o intervalo de aproximadamente 300 horas adotado pela empresa para manutenções preventivas se mostre coerente, os resultados indicam que reduções nesse intervalo, sobretudo para subsistemas críticos, podem contribuir para mitigar falhas e aumentar a disponibilidade do equipamento.

Assim, o estudo confirma a efetividade da metodologia de confiabilidade para subsidiar decisões de manutenção, permitindo identificar

componentes críticos, antecipar falhas prováveis e orientar ações destinadas a aumentar a disponibilidade e prolongar a vida útil do equipamento. Com registros mais detalhados e dados mais estratificados, essa abordagem tende a oferecer diagnósticos ainda mais precisos e estratégicos.

Como perspectivas para a continuidade operacional da empresa de celulose, recomenda-se:

1. Análise de Causa Raiz da Falha (ACRF): Investigar a instabilidade prematura do sistema elétrico.

2. Refinamento de Registros: Aumentar a granularidade dos dados no *software* de gestão, detalhando o componente específico (sensor, bateria, válvula) falhado.

3. Monitoramento Dinâmico: Implementar o cálculo recorrente dos parâmetros de Weibull para ajustar os intervalos de manutenção conforme o envelhecimento real do ativo, maximizando sua produtividade e vida útil.

REFERÊNCIAS

- ALDALLAL, Ramy Abdelhamid. Bayesian estimation and prediction of Weibull current records with application to Saudi industrial data. **AIMS Mathematics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 3450-3472, fev. 2026
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462**: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BONAZZA, Marcelo; SAMPIETRO, Jean Alberto; DENEGA, Alaercio; ALVES, Flávio Henrique Schallenberger; MARSARO, Altimar; DOBNER JÚNIOR, Mário. O desempenho de harvester de pequeno porte no primeiro desbaste de pinus é superior em método totalmente seletivo. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 26, n. 48, p. 361-365, maio de 2023.

FAKOOR, H.; KAKLAR, Javad Alizadeh. A modification in Weibull parameters to achieve a more accurate probability distribution function in fatigue applications. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, art. 17537, p. 1-11, 16 oct. 2023

FARSI, Mohammad Ali. Reliability prediction of a mechanical refiner. **International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application**, vol. 7, n. 2, pp. 71-78, 2024.

ELSAYED, Elsayed A. **Reliability Engineering**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FREITAS, Carlos Alberto de; REAL SILVA, Adriano; SILVA DE AGUIAR, Diogo; MANOEL DA SILVA, Marcio; DA SILVA CARDOSO, Aline; REIS MARTINS, Deocleciano; SANTOS DE ARRUDA, Antonio Carlos. A evolução da segurança no trabalho aplicada na manutenção industrial 4.0. **REMIPE - Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec Osasco**, [S.I.], v. 6, n. 2, p.229-251, 2020.

GOMES, João Pedro Silva; ANDRADE, Paulo César de Resende. Análise dos tempos de parada para manutenção de uma pá carregadeira. **Revista Thema**, v. 17, n. 3, p. 699–710, 2020.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

KOZŁOWSKI, Edward; BORUCKA, Anna; OLESZCZUK, Piotr; LESZCZYŃSKI, Norbert. Evaluation of readiness of the technical system using the semi-Markov model with selected sojourn

time distributions. **Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability**, v. 26, n. 4, art. 191545, 2024.

LI, Xuchun; YU, Zhiwu; YANG, Deyong; LIANG, Zhenwei. From Passive Redundancy to Active Perception: A Comprehensive Review of AI-Enhanced Fault Diagnosis and Digital Twin Simulation for Combine Harvesters. **Applied Sciences**, v. 16, n. 14, art. 7319, p. 1-58, 2026.

NASCIMENTO, Diego Carvalho do; RAMOS, Pedro Luiz; ENNES, André; COCOLO, Camila; NICOLA, Márcio José; ALONSO, Carlos; RIBEIRO, Luiz Gustavo; LOUZADA, Francisco. A reliability engineering case study of sugarcane harvesters. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 27, n. 4, e4569, 2020.

ODEYAR, Prerita; APEL, Derek B.; HALL, Robert; Zon, Brett; SKRZYPKOWSKI, Krzysztof. A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining. **Energies**, v. 15, n. 17, art. 6263, p. 1-27, 2022.

ROCHA, Daniele Aline Pessoa da; MORAIS, Willy Ank de. Análise dos dados de vida para ativos industriais utilizando distribuição Weibull 3P. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 17, n. 1, p. 53–60, 2020.

SANTOS, Carlos Eduardo dos; SOARES, Cleriston Silva; SILVA, Matheus Coelho da; COSTA, David Julio; MARTINS, Deocleciano Reis. Análise de Confiabilidade Aplicada à Gestão da Manutenção Industrial. **Revista FT**, [s. l.], ed. 145, jun. 2025.

SOUZA, M. A. de; PIRES, C. B. Colheita florestal: mensuração e análise dos efeitos das variáveis no custo das atividades de corte e descasque mecanizado. **Revista de**

Contabilidade e Organizações, v. 2, n. 3, p. 73-99, 2008.

TELES, Jhonata. **Bíblia do RCM**: o guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na indústria 4.0. 2. ed. Brasília: Engeteles Editora, 2021.

WANG, Haiyang; LAO, Liyun; ZHANG, Honglei; TANG, Zhong; QIAN, Pengfei; HE, Qi. Structural Fault Detection and Diagnosis for Combine Harvesters: A Critical Review. **Sensors**, v. 25, n. 13, p. 3851, 2025.

XU, Jiaojiao; JING, Tiantian; FANG, Meng; LI, Pengcheng; TANG, Zhong. Failure state identification and fault diagnosis method of vibrating screen bolt under multiple excitation of combine harvester. **Agriculture**, v. 15, n. 5, p. 455, 2025.

XU, Meng; MAO, Huachao. q-Weibull Distributions: Perspectives and Applications in Reliability Engineering. **IEEE Transactions on Reliability**, [s. l.], v. 74, n. 3, p. 812-825, set. 2025.