

UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Rogério Akita Ono

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE MANUTENÇÃO DE
COLHEDORAS EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara - UNIARA - como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

Prof. Dr. Anderson Rogério Faia Pinto
Orientador

Araraquara, SP - Brasil
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

O68a Ono, Rogério Akita.

Análise estatística dos tempos de manutenção de colhedoras em uma usina sucroalcooleira/Rogério Akita Ono. – Araraquara: Universidade de Araraquara, 2026.
70f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara-UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Anderson Rogério Faia Pinto

1. Usina. 2. Colhedora. 3. Cana de açúcar. 4. Manutenção. 5. Análise Estatística. I. Título.

CDU 62-1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Ono, Rogerio. Análise estatística dos tempos de manutenção de colhedoras em uma usina sucroalcooleira. 2026.70f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade de Araraquara, Araraquara-SP.

ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rogerio Akita Ono

TÍTULO DO TRABALHO: Análise estatística dos tempos de manutenção de colhedoras em uma usina sucroalcooleira.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2026

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede a Universidade de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO AKITA ONO**
Data: 17/09/2026 20:24:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rogério Akita Ono

Universidade de Araraquara - UNIARA

Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801-340, Araraquara-SP

Email (do autor): rogerio.akita@yahoo.com.br



UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA - UNIARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

NOME DO AUTOR: **ROGÉRIO AKITA ONO**

TÍTULO DO TRABALHO:

DISSERTAÇÃO INTITULADA “ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE MANUTENÇÃO DE COLHEDORAS EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA.”

Assinatura do(a) Examinador(a)

Conceito

 Documento assinado digitalmente
ANDERSON ROGÉRIO FAIA PINTO
Data: 10/05/2024 08:53:55 (GMT)
Verifique em: <https://validar.dig.br>

Prof. Dr. Anderson Rogério Faia Pinto (orientador)
Universidade de Araraquara - UNIARA

☐ Aprovado ☐ Reprovado

 Documento assinado digitalmente
FABIO FERRAZ JÚNIOR
Data: 10/05/2024 14:14:14 (GMT)
Verifique em: <https://validar.dig.br>

Prof. Dr. Fabio Ferraz Júnior
Universidade de Araraquara - UNIARA

☐ Aprovado ☐ Reprovado

 Documento assinado digitalmente
ANTÔNIO FERNANDO CREPALDI
Data: 27/05/2024 14:34:08 (GMT)
Verifique em: <https://validar.dig.br>

Prof. Dr. Antônio Fernando Crepaldi
Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP

☒ Aprovado ☐ Reprovado

Versão definitiva revisada pelo(a) orientador(a) em: ____/____/____

 Documento assinado digitalmente
ANDERSON ROGÉRIO FAIA PINTO
Data: 10/05/2024 08:55:17 (GMT)
Verifique em: <https://validar.dig.br>

Prof. Dr. Anderson Rogério Faia Pinto (orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão ao professor Anderson Rogério Faia Pinto, cujo trabalho e dedicação foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Seu conhecimento e orientação foram fundamentais para minha trajetória acadêmica, proporcionando insights valiosos e contribuindo significativamente para a qualidade deste estudo.

Também agradeço à Universidade de Araraquara (Uniarara), instituição que me ofereceu o suporte necessário para o avanço deste trabalho. O ambiente acadêmico estimulante, os recursos disponibilizados e o incentivo à pesquisa foram determinantes para minha formação.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, meu mais sincero agradecimento.

“O verdadeiro conhecimento vem da experiência.”

Albert Einstein

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma análise estatística dos tempos de parada para manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar em uma usina sucroalcooleira localizada no estado de São Paulo, Brasil. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso voltado à análise dos tempos de permanência das colhedoras em manutenção. Os dados foram obtidos a partir das Ordens de Serviço (OS) de manutenção registradas no sistema *Enterprise Resource Planning* (ERP) da empresa, referentes ao ano de 2024. Inicialmente, foram aplicadas técnicas de estatística descritiva para caracterizar os custos e os tempos de permanência das intervenções. Posteriormente, os tempos de permanência foram submetidos à transformação logarítmica na base natural ($\ln$), possibilitando a aplicação da Análise de Variância (ANOVA). Os resultados demonstraram diferença estatisticamente significativa entre os modelos de colhedoras para a variável “Valor Total” ($p = 0,003$). O modelo John Deere CH570 apresentou o maior custo médio de manutenção, estimado em aproximadamente R\$ 468.101 por safra, enquanto os modelos Case apresentaram custos médios inferiores. As comparações múltiplas de Fisher indicaram que o custo médio do modelo John Deere CH570 foi significativamente superior aos modelos Case A8810 e Case A9900, não sendo identificada diferença estatisticamente significativa entre os dois modelos Case. Em relação aos tempos de permanência, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os modelos ($p = 0,491$) ou entre os motivos de entrada ($p = 0,128$), apesar da elevada variabilidade observada, principalmente nas intervenções de manutenção corretiva. Essa categoria apresentou predominância na base analisada e maior dispersão dos tempos de permanência, evidenciando menor previsibilidade das intervenções não planejadas. A análise dos principais ofensores identificou o sistema hidráulico e as mangueiras como uma das principais fontes de indisponibilidade, acumulando aproximadamente 4.095 horas de máquina parada. A partir desse diagnóstico, foram propostas ações de melhoria relacionadas à padronização dos procedimentos de manutenção, capacitação das equipes, inspeções sistemáticas e aprimoramento da qualidade dos registros das OS. Os resultados fornecem subsídios para o aprimoramento da gestão da manutenção, da qualidade das informações registradas no sistema ERP e da disponibilidade operacional das colhedoras do setor sucroenergético no Brasil.

Palavras-chave: Colhedoras de cana-de-açúcar; Manutenção; Tempo de parada; Análise estatística; Gestão da manutenção.

ABSTRACT

This research presents a statistical analysis of maintenance downtime for sugarcane harvesters at a sugar-energy plant located in the state of São Paulo, Brazil. The study is characterized as a case study focused on analyzing the time that harvesters remain under maintenance. Data were obtained from Maintenance Work Orders (WOs) recorded in the company's *Enterprise Resource Planning* (ERP) system for the year 2024. Initially, descriptive statistical techniques were applied to characterize the costs and maintenance duration of the interventions. Subsequently, maintenance duration data were transformed using the natural logarithmic scale ($\ln$), enabling the application of Analysis of Variance (ANOVA). The results demonstrated a statistically significant difference among harvester models for the "Total Value" variable ($p = 0.003$). The John Deere CH570 model presented the highest average maintenance cost, estimated at approximately BRL 468,101 per harvest, whereas the Case models presented lower average costs. Fisher's multiple comparison test indicated that the average maintenance cost of the John Deere CH570 was significantly higher than those of the Case A8810 and Case A9900 models, while no statistically significant difference was identified between the two Case models. Regarding maintenance duration, no statistically significant differences were identified among the harvester models ($p = 0.491$) or among the reasons for maintenance entry ($p = 0.128$), despite the high variability observed, particularly in corrective maintenance interventions. Corrective maintenance represented the predominant category in the analyzed database and exhibited greater dispersion in maintenance duration, indicating lower predictability of unplanned interventions. The analysis of the main maintenance contributors identified the hydraulic system and hoses as one of the main sources of equipment downtime, accounting for approximately 4,095 hours of machine downtime. Based on this diagnosis, improvement actions were proposed involving the standardization of maintenance procedures, team training, systematic inspections, and enhancement of the quality of WO records. The results provide support for improving maintenance management, the quality of information recorded in the ERP system, and the operational availability of harvesters in the sugar-energy sector in Brazil.

Keywords: Sugarcane harvesters; Maintenance; Downtime; Statistical analysis; Maintenance management.

Lista de Figuras

Figura 1 - Principais métodos de aplicação em gestão de manutenção.....	24
Figura 2 - Fluxograma do processo de seleção das publicações.....	28
Figura 3 – Mapa de relações das palavras-chave.....	29
Figura 4 - Classificação dos publicações por tipo e natureza metodológica.....	30
Figura 5 – Distribuição geográfica dos publicações.....	30
Figura 6 - Áreas de colheita da cana.....	32
Figura 7 - Distribuição modelo de colhedora por ano.....	34
Figura 8 - Boxplot valores totais por modelo.....	34
Figura 9 - Intervalo de confiança individual de 95% de Fisher.....	36
Figura 10 - Quantidade de Ordens de Serviço por causa.....	39
Figura 11 - Boxplot Comparativo do Custo Total por Motivo de Entrada.....	39
Figura 12 - Intervalos de confiança de Fisher para a diferença entre médias do valor total.....	42
Figura 13 - Boxplot tempo de permanência por modelo.....	46
Figura 14 - Intervalo de confiança individual de 95% de Fisher diferença entre médias.....	47
Figura 15 - Boxplot permanência por motivo de entrada.....	51
Figura 16 - Intervalos de confiança 95% Fisher tempo de permanência por motivo de entrada.....	54
Figura 17 - Ocorrências de hidráulica.....	55
Figura 18 - Maiores tempo acumulado de manutenção safra 2024.....	56
Figura 19 - Diagrama de Ishikawa.....	57
Figura 20 - Custo médio por hora de operação por modelo.....	58
Figura 21 - Padronização das mangueiras e componentes hidráulicos.....	59
Figura 22 - Sala de hidráulica e controle de componentes.....	60

Lista de Quadros

Quadro 1 - Relação autores e métodos.....	23
Quadro 2 - Autores e revisões.....	25
Quadro 3 - Análise pelos 5 porquês.....	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Análise descritiva do campo Valor Total.....	33
Tabela 2 - ANOVA do Valor Total por modelo de colhedora.....	36
Tabela 3 - Valor total de manutenção por motivo de entrada.....	37
Tabela 4 - ANOVA do “Valor Total” por motivo de entrada.....	41
Tabela 5 - Estatística descritivas da permanência em dias por modelo.....	44
Tabela 6 - ANOVA entre modelos de colhedora.....	45
Tabela 7 - Média por modelo e intervalo de confiança (95%).....	46
Tabela 8 - Análise pelo método de Fisher.....	47
Tabela 9 - Estatísticas descritivas da variável permanência por modelo de equipamento.....	49
Tabela 10 - Permanência em dia por motivo de entrada.....	50
Tabela 11 - ANOVA do tempo de permanência por motivo de entrada.....	52
Tabela 12 - Estatísticas descritivas do tempo de permanência por motivo de entrada.....	52

Lista de Abreviatura e Siglas

ABC: Artificial Bee Colony Algorithm
Adj. MS: Adjusted Mean Square
ANOVA: Analysis of Variance
ARIMA: Auto Regressive Integrated Moving Average
ATR: Açúcar Total Recuperável
BOP: Bi-Objective Programming
CNN: Convolutional Neural Networks
CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento
CSS: Cross-Sectional Survey
DES: Discrete Event Simulation
DP: Desvio-Padrão
DTMC: Discrete-Time Markov Chain
ERP: Enterprise Resource Planning
FAHP: Fuzzy Analytic Hierarchy Process
FTA: Fault Tree Analysis
FTA (Technology): Future-Oriented Technology Analysis
GA: Genetic Algorithm
GA-ABC: Hybrid Algorithm (Genetic Algorithm and Artificial Bee Colony)
GL: Grau de Liberdade
GT: Graph Theory
HWES: Holt-Winters Exponential Smoothing
MC: Manutenção Corretiva
MD: Manutenção Preditiva
MCDM: Multi-Criteria Decision-Making
MCDA: Multi-Criteria Decision Analysis
MDE: Model-Driven Engineering
MILP: Mixed-Integer Linear Programming
ML: Machine Learning
MMMs: Mixed Matrix Membranes
MMR: Mixed Methods Research
MoE: Mixture-of-Experts

MP: Manutenção Preventiva
MSEW: Mechanically Stabilized Earth Walls
MTBF: Mean Time Between Failures
OS: Ordem de Serviço
OLS: Ordinary Least Squares
PCM: Planejamento e Controle da Manutenção
PIB: Produto Interno Bruto
PM: Plant Maintenance
QoS: Quality of Service
RCBD: Randomized Complete Block Design
RCM: Reliability Centered Maintenance
SAP: Systems Applications and Products in Data Processing
SARIMA: Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average
SEM: Structural Equation Modeling
SQ (Adj. SS): Adjusted Sum of Squares
TCH: Toneladas de Cana por Hectare
TPM: Total Productive Maintenance
VSM: Value Stream Mapping

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa da Pesquisa.....	14
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos.....	16
1.3	Delimitação da Pesquisa.....	17
1.4	Estrutura da Dissertação.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Tipos de Manutenção.....	18
2.2	Manutenção de Colhedoras.....	19
2.3	Revisão e Análise da Literatura.....	21
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	27
4	ESTUDO DE CASO NA EMPRESA	32
4.1	Análise dos valores de manutenção.....	32
4.2	Análise do tempo de parada das colhedoras.....	44
4.3	Ações para redução o tempo de parada.....	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – DADOS DE VALOR TOTAL E MOTIVO DE ENTRADA	70

1 INTRODUÇÃO

A gestão da manutenção constitui uma função estratégica voltada à eficiência operacional e à rentabilidade empresarial (Kardec; Nascif, 2015; Bokrantz *et al.*, 2020). Estratégias robustas de manutenção maximizam a disponibilidade dos equipamentos e, consequentemente, elevam a produtividade operacional (De Jonge; Scarf, 2020; Bucay-Valdiviezo *et al.*, 2023; Einabadi *et al.*, 2023). Entretanto, para que sejam eficazes, tais estratégias devem estar alinhadas aos objetivos organizacionais (Kardec; Nascif, 2015; Bokrantz *et al.*, 2020). É nesse cenário a manutenção deixa de atuar apenas de forma corretiva e passa a incorporar práticas preditivas e preventivas, consolidando-se como um pilar da confiabilidade operacional (Kardec; Nascif, 2015).

Nesse contexto, a literatura tem evidenciado a relevância de abordagens que contemplam inspeções periódicas, substituição de componentes e utilização de ferramentas de apoio à decisão, conforme demonstrado por Alsayouf (2009), Molenaers *et al.* (2012) e Yusuf *et al.* (2024). Estudos mais recentes também indicam que a manutenção assume papel estratégico no setor sucroalcooleiro (Afsharnia *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Esse setor contribui significativamente para a economia brasileira e para a diversificação da matriz energética nacional, além de impulsionar o desenvolvimento agrícola (Cezarino; Liboni, 2012; Belluzo *et al.*, 2014). Para a safra brasileira de 2025/26, a estimativa é de produção de 668,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e produtividade média de 75,575 kg/ha (CONAB, 2025; Sheikh *et al.*, 2025).

Ante essa expressiva escala produtiva os volumes gerados inserem-se em uma dinâmica de economia circular na qual o fluxo contínuo de matéria-prima e o aproveitamento integral da cana-de-açúcar exigem elevado ritmo operacional (Pavan *et al.*, 2021). A confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos são, portanto, indispensáveis para a estabilidade industrial no setor sucroalcooleiro (Cezarino; Liboni, 2012; Belluzo *et al.*, 2014; Sampaio *et al.*, 2019; Afsharnia *et al.*, 2021; Ortiz *et al.*, 2022; Sheikh *et al.*, 2025). Nesse cenário, a operação contínua durante a safra eleva a demanda por manutenção e posiciona as colhedoras de cana-de-açúcar como elementos determinantes para a eficiência operacional (Afsharnia *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Falhas em pontos críticos das colhedoras, como os sistemas hidráulicos, podem interromper a colheita e gerar perdas financeiras significativas em decorrência da indisponibilidade não planejada dos equipamentos (Afsharnia *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022).

É ante esses riscos operacionais que a crescente dependência de colhedoras mecanizadas requer estratégias de manutenção eficazes para reduzir falhas imprevistas prolongar a vida útil dos equipamentos e aumentar a previsibilidade da produção (Sharma; Tewari, 2019; Da Silva; Achcar; Piratelli, 2020; Afsharnia *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Nesse contexto, esta pesquisa aborda um problema real de gestão da manutenção de colhedoras em uma usina sucroalcooleira localizada na região de São José do Rio Preto (SP). A área de manutenção possui um amplo banco de dados de registros armazenados no sistema *Enterprise Resource Planning* (ERP). Entretanto, a ausência de coleta estruturada e de tratamento analítico efetivo dificulta a compreensão do comportamento operacional e das intervenções de manutenção realizadas nas colhedoras. A ausência de ferramentas analíticas faz com que o planejamento e a alocação de recursos dependam, predominantemente, do conhecimento empírico dos gestores. Atividades de manutenção baseadas em critérios predominantemente subjetivos podem comprometer o desempenho dos ativos e os resultados operacionais da empresa (Sellito, 2005; De Jonge; Scarf, 2020).

Assim sendo, a aplicação de métodos estatísticos capazes de mensurar a variabilidade e isolar o efeito de fatores, como o modelo do equipamento e o tipo de manutenção, torna-se necessária. Além disso, é imprescindível distinguir a variabilidade natural do processo de possíveis problemas sistêmicos que demandem intervenção. Entretanto, a ausência de ferramentas analíticas capazes de converter os registros das OS em evidências sobre as causas das paradas e os tempos de manutenção limita a compreensão do desempenho operacional da usina do interior de São Paulo. Essa deficiência dificulta a superação de um modelo de gestão predominantemente reativo e a implementação de planos de ação mais eficazes. Logo, permanecem perdas de produtividade associadas a fatores que, embora registrados, não são adequadamente compreendidos por meio de análises estatísticas. Na safra analisada, o custo anual associado às paradas foi estimado em aproximadamente R\$ 1,32 milhão. É ante a esta lacuna que esta pesquisa aplica métodos estatísticos para identificar os fatores associados aos tempos de inatividade das colhedoras e avaliar seus efeitos sobre a manutenção. A perspectiva é que os modelos forneçam evidências quantitativas para otimizar recursos melhorar o planejamento da manutenção e reduzir a inatividade dos equipamentos na unidade de São José do Rio Preto (SP).

1.1 Justificativa da Pesquisa

A manutenção das colhedoras de cana-de-açúcar tornou-se indispensável para atender à crescente demanda por eficiência, produtividade e confiabilidade no setor agrícola (Da Silva; Achcar; Piratelli, 2020; Afsharnia *et al.*, 2021). As paradas não planejadas elevam os custos, reduzem a rentabilidade e podem comprometer a continuidade da produção (Barbosa, 2019; Santos, 2021). As despesas com manutenção e reparo representam uma parcela significativa dos custos associados à colheita, estimada em 25%. Na unidade em estudo, o montante destinado à manutenção e ao reparo das colhedoras por safra é de aproximadamente R\$ 52 milhões.

Apesar desse elevado investimento em manutenção, o planejamento e a alocação de recursos ainda dependem, em parte, do conhecimento empírico dos gestores. Isso ocorre porque, embora o sistema ERP armazene um extenso histórico das paradas para manutenção, os dados das OS não são explorados de forma sistemática por meio de análises estatísticas. Essa limitação dificulta a identificação dos fatores associados à redução da disponibilidade física das colhedoras de cana-de-açúcar e restringe a capacidade de priorização das intervenções. Logo, mantém-se um processo de gestão predominantemente reativo, com menor assertividade na definição dos planos de ação. Na unidade estudada, o custo de indisponibilidade das colhedoras é estimado em aproximadamente R\$ 14 milhões por safra. Esse impacto, em razão da ociosidade das frentes de corte e dos custos logísticos associados, pode afetar a margem operacional da unidade de São José do Rio Preto (SP).

É inegável que a redução do tempo de inatividade ultrapassa uma questão exclusivamente técnica e se estende à viabilidade econômica e à competitividade do setor sucroenergético (Da Silva; Achcar; Piratelli, 2020; Afsharnia *et al.*, 2021). Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, as abordagens convencionais de manutenção ainda apresentam limitações relacionadas à previsão de falhas e à priorização dos atendimentos (Oliveira, 2022; Silva, 2023). A alocação inadequada de recursos e a redução da eficiência produtiva decorrentes dessas limitações evidenciam a necessidade de soluções mais precisas e orientadas por dados (Afsharnia *et al.*, 2021; Bucay-Valdiviezo *et al.*, 2023).

Esse cenário de indisponibilidade das colhedoras e a crescente demanda por ferramentas analíticas demonstram a relevância prática deste estudo para o setor sucroenergético no Brasil. A aplicação de métodos estatísticos capazes de quantificar a variabilidade e avaliar o efeito de diferentes fatores operacionais é, portanto, relevante para a compreensão dos tempos de manutenção. Entre essas técnicas, destaca-se a Análise de

Variância (ANOVA), amplamente utilizada para verificar diferenças entre grupos e avaliar a influência de fatores categóricos sobre uma variável de interesse. No contexto deste estudo, a ANOVA permite comparar categorias associadas ao modelo do equipamento, ao tipo de manutenção e à seção de manutenção, contribuindo para uma tomada de decisão mais fundamentada e para o direcionamento de estratégias de manutenção (Samanta *et al.*, 2022; Ayagi *et al.*, 2024).

Portanto, considerando esse potencial analítico, este estudo aborda uma lacuna prática e teórica relacionada à necessidade de integrar a análise de dados à realidade operacional das organizações (Bokrantz *et al.*, 2020). A sistematização proposta contribui para o debate sobre a gestão da manutenção automotiva no setor agrícola e fornece subsídios para o desenvolvimento de estudos futuros. A transição de uma gestão predominantemente reativa para uma abordagem mais proativa e fundamentada em dados pode gerar contribuições práticas para o segmento sucroalcooleiro do Brasil.

A aplicação da análise estatística irá permitir avaliar a influência de variáveis operacionais sobre os custos de manutenção e os tempos de parada das colhedoras da usina do interior de São Paulo. A análise dos resultados permitirá verificar diferenças estatísticas entre os modelos e caracterizar a variabilidade dos diferentes tipos de manutenção. Além disso, o estudo utilizará evidências empíricas para subsidiar a definição de planos de ação direcionados às falhas críticas identificadas na frota. A metodologia empregada articula rigor estatístico e realidade operacional das frentes de corte ao transformar dados de suporte à tomada de decisão registrados no sistema ERP. Este estudo pode então contribuir para o aprimoramento da alocação de recursos, do planejamento das intervenções e da redução das perdas decorrentes da indisponibilidade das colhedoras no setor sucroenergético do Brasil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os principais fatores que influenciam os tempos de parada para manutenção em colhedoras de cana-de-açúcar e propor ações para melhorar a disponibilidade desses equipamentos em uma usina sucroalcooleira localizada no interior do estado de São Paulo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estruturar um banco de dados quantitativo a partir das OS de manutenção das colhedoras extraídas do sistema ERP;
- Aplicar a ANOVA para testar a relação entre as variáveis operacionais (modelo, tipo de falha etc.) e o tempo de parada das colhedoras;
- Identificar os fatores críticos que impactam significativamente os tempos de manutenção e propor planos de ação para uma melhor alocação de recursos, de forma a minimizar os custos e maximizar a ocupação das colhedoras.

1.3 Delimitação da Pesquisa

Este estudo tem como foco a proposição de ações para a melhoria do processo de manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar em uma usina sucroalcooleira localizada na região de São José do Rio Preto (SP), Brasil. A premissa do estudo consiste em identificar os fatores associados aos tempos de parada para manutenção das colhedoras. Nesse contexto, busca-se avaliar a influência e a significância estatística de variáveis independentes sobre o tempo de inatividade dos equipamentos por meio da ANOVA.

A base de dados utilizada na análise foi obtida do sistema ERP, a partir dos registros das OS referentes à safra 2023/2024. Foram consideradas variáveis relacionadas à seção de trabalho, ao tipo de manutenção, ao modelo das colhedoras, aos sistemas mecânicos afetados e ao período de ocorrência das intervenções. A análise dos resultados subsidia a identificação dos principais fatores associados às paradas e a proposição de ações para otimizar os recursos de manutenção e aumentar a eficiência operacional da colheita na unidade de São José do Rio Preto (SP).

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco seções principais. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica e a revisão da literatura sobre máquinas colhedoras, manutenção agrícola e as ferramentas da qualidade utilizadas no estudo. A Seção 3 descreve a metodologia adotada, caracterizada como um estudo de caso, bem como as ferramentas de análise quantitativa e qualitativa empregadas no estudo. Na Seção 4, são apresentados os resultados do estudo, incluindo a análise estatística dos dados, com o objetivo de identificar e quantificar os principais fatores associados aos tempos de parada das colhedoras. Na sequência, são apresentados a análise de causa raiz e o desenvolvimento de uma intervenção estratégica, estruturada em um plano de ação para a mitigação dos principais gargalos identificados. Por

fim, A Seção 5 reúne as considerações finais, as contribuições e implicações do estudo, suas limitações e sugestões para estudos futuros na usina de São José do Rio Preto (SP).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de Manutenção

A classificação dos tipos de manutenção é fundamental para a compreensão das estratégias adotadas na gestão de ativos agrícolas (Kardec; Nascif, 2015). A correta classificação permite estruturar políticas de intervenção mais alinhadas à realidade operacional e aos objetivos organizacionais (De Jonge; Scarf, 2020). Portanto, considerando a elevada criticidade dos equipamentos durante a safra, a escolha adequada da estratégia de manutenção influencia diretamente a disponibilidade física, a confiabilidade e os custos operacionais das colhedoras de cana-de-açúcar (Da Silva *et al.*, 2020).

As intervenções dividem-se, fundamentalmente, em MC, MP e MD. A MC é executada de forma reativa, após a ocorrência de uma falha, e visa restaurar a capacidade operacional do equipamento (Kardec; Nascif, 2015; Oliveira, 2022; Silva, 2023). Em contrapartida, a MP atua de forma antecipada, por meio de intervenções programadas, incluindo inspeções rotineiras, ajustes e lubrificação, com o objetivo de evitar falhas funcionais (Afsharnia *et al.*, 2021). Essas intervenções, independentemente da condição do equipamento, seguem intervalos de tempo ou horas de uso previamente definidos em cronogramas e têm como objetivos mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falhas imprevistas (De Jonge; Scarf, 2020; Oliveira, 2022). A aplicação eficaz da MP também pode contribuir para o melhor planejamento dos estoques de peças e para a redução do desgaste prematuro dos ativos (Alsyouf, 2009; Einabadi *et al.*, 2023).

Por sua vez, a MD representa uma abordagem baseada na avaliação da condição real do equipamento e no monitoramento de suas variáveis de desempenho (Bokrantz *et al.*, 2020). Essa estratégia utiliza informações obtidas por meio do acompanhamento das condições operacionais para determinar o momento mais adequado para a intervenção, buscando prevenir falhas funcionais e maximizar a vida útil dos componentes (Kardec; Nascif, 2015; Einabadi *et al.*, 2023). Consequentemente, sua aplicação pode contribuir para reduzir o risco de falhas inesperadas, características de uma abordagem predominantemente corretiva, e evitar substituições prematuras de componentes que ainda apresentam condições adequadas de funcionamento (Sharma; Tewari, 2019).

2.2 Manutenção de Colhedoras

As colhedoras de cana-de-açúcar possuem papel estratégico na otimização da produção agrícola e na redução dos custos operacionais, especialmente por meio da mecanização das atividades de colheita e do aumento da eficiência operacional dos equipamentos (Abedini *et al.*, 2024). Trata-se de equipamentos complexos que automatizam o processo de colheita por meio da execução simultânea de múltiplas operações (Dias Neto *et al.*, 2022). Essas operações incluem o corte da base e do topo da cana, a picagem dos colmos em rebolos, a limpeza por meio de ventiladores (extratores) e a transferência da carga para os veículos de transbordo (Dias Neto *et al.*, 2022). A elevada capacidade de processamento das colhedoras proporciona ganhos de velocidade e eficiência operacional. Além disso, a mecanização contribui para benefícios relacionados à sustentabilidade (Cezarino; Liboni, 2012; Dias Neto *et al.*, 2022). A colheita mecanizada atende tanto às demandas produtivas quanto às exigências ambientais relacionadas à eliminação da queima da cana-de-açúcar (Cezarino; Liboni, 2012). Essa prática contribui para a preservação da cobertura do solo e possibilita o aproveitamento da biomassa para a cogeração de energia elétrica, alinhando a gestão agrícola aos princípios da economia circular (Sampaio *et al.*, 2019; Pavan *et al.*, 2021).

Apesar desses benefícios operacionais e ambientais, o desempenho das colhedoras depende diretamente de uma gestão da manutenção capaz de assegurar a disponibilidade dos equipamentos e o atendimento aos índices de produtividade (Kardec; Nascif, 2015; Baccarin *et al.*, 2020). A priorização de estratégias preventivas, ao reduzir a ocorrência de paradas não planejadas, pode contribuir para a rentabilidade, a economia no longo prazo e a redução do

custo global de reparo (Santos, 2021). Além disso, o monitoramento sistemático dos equipamentos pode contribuir para prolongar sua vida útil e otimizar o retorno sobre o investimento (Da Silva; Achcar; Piratelli, 2020). Entretanto, a implementação de estratégias de manutenção enfrenta barreiras técnicas e econômicas (Alsyouf, 2009). Entre essas barreiras, destaca-se o elevado investimento inicial necessário à estruturação de sistemas de gestão da manutenção (Bokrantz *et al.*, 2020). A escassez de mão de obra técnica especializada também constitui um gargalo, dificultando diagnósticos precisos e podendo comprometer a qualidade dos serviços de manutenção (Barbosa, 2019; Wang *et al.*, 2023).

Em especial, a MC, embora necessária em determinadas situações, pode resultar em tempos de parada incertos e prolongados, comprometendo a eficiência operacional, gerando perdas e exigindo intervenções imediatas para restabelecer o fluxo da colheita (De Jonge; Scarf, 2020; Dias Neto *et al.*, 2022; Oliveira, 2022). A análise desses eventos é, portanto, importante para identificar as causas dos problemas e reduzir a ocorrência de intervenções emergenciais, contribuindo para a manutenção da disponibilidade das colhedoras (Afsharnia *et al.*, 2021; Silva, 2023; Ayagi *et al.*, 2024). Nesse contexto, torna-se necessário planejar as atividades de manutenção, propor melhorias sistêmicas que contribuam para o aumento da confiabilidade e programar as intervenções em períodos de menor impacto produtivo, como a entressafra (Santos, 2021).

Nesse contexto, a compreensão dos sistemas críticos das colhedoras torna-se fundamental para o planejamento das estratégias de manutenção. Entre esses sistemas, o conjunto hidráulico destaca-se por sua relevância operacional e por sua influência sobre a disponibilidade dos equipamentos (Dias Neto *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). Esses sistemas são responsáveis pelo acionamento de subsistemas críticos, como o corte de base, os rolos picadores, os ventiladores extratores e os sistemas de locomoção da máquina (Dias Neto *et al.*, 2022). Em razão da elevada demanda por força e precisão, esses circuitos operam sob altas pressões e de forma contínua nas frentes de colheita (Zhang *et al.*, 2022). Consequentemente, a confiabilidade e a disponibilidade das colhedoras estão relacionadas à integridade dos componentes hidráulicos, especialmente das mangueiras flexíveis, das bombas e dos blocos de válvulas, que constituem elementos fundamentais desses sistemas (Abedini *et al.*, 2024).

Entretanto, o ambiente de operação canavieiro impõe condições severas de trabalho aos sistemas hidráulicos (Zhang *et al.*, 2022). As colhedoras estão submetidas a elevados

níveis de vibração mecânica decorrentes das irregularidades do terreno, além de variações térmicas e de uma atmosfera com elevada concentração de material particulado (Dias Neto *et al.*, 2022). Essa combinação de fatores pode favorecer diferentes modos de falha, uma vez que a vibração contínua pode contribuir para a fadiga das conexões e para o desgaste por atrito das mangueiras hidráulicas, favorecendo o surgimento de microfissuras e rupturas (Zhou *et al.*, 2023). Paralelamente, a presença de poeira e outros particulados pode atuar como fator de contaminação, comprometendo a vida útil dos componentes internos do sistema (Wang *et al.*, 2023). Essas condições podem resultar em vazamentos e perda de pressão, configurando importantes causas de paradas corretivas nas frentes de colheita (Afsharnia *et al.*, 2021).

2.3 Revisão e Análise da Literatura

A estratégia de manutenção industrial e agrícola é um tema amplamente discutido na literatura técnica, sob diferentes perspectivas setoriais e metodológicas, especialmente nos campos da *Total Productive Maintenance* (TPM) e da *Reliability-Centered Maintenance* (RCM). Alsyouf (2009) empregou um *Cross-Sectional Survey* (CSS) para investigar a competitividade industrial e identificou limitações relacionadas ao planejamento da manutenção, discutindo a adoção de TPM e RCM. Belardo (2010) investigou os ganhos de eficiência produtiva proporcionados pela mecanização de colhedoras autopropelidas como alternativa para reduzir custos e mitigar a escassez de mão de obra. Cezarino e Liboni (2012) discutiram a sustentabilidade no setor sucroenergético, relacionando os impactos sociais e ambientais da indústria da cana-de-açúcar ao crescimento industrial e à responsabilidade socioambiental no Brasil. Belluzo, Santos e Almeida Júnior (2014), ao abordarem a competência informacional e sua mediação, destacaram a necessidade do uso estratégico dos dados para a tomada de decisão em ambientes operacionais complexos, como os sistemas de manutenção industrial. Dadashnejad e Valmohammadi (2018) empregaram *Structural Equation Modeling* (SEM) para avaliar a redução de perdas operacionais associada ao *Value Stream Mapping* (VSM). Junqueira e Morabito (2019) desenvolveram um modelo para otimizar a programação das frentes de colheita de cana-de-açúcar em cenários reais, utilizando *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Sharma e Tewari (2019) priorizaram a manutenção de unidades de geração de vapor e identificaram subsistemas críticos e níveis

de disponibilidade por meio de *Discrete-Time Markov Chains* (DTMC) e das equações de *Chapman-Kolmogorov* (C-K).

Posteriormente, Bokrantz *et al.* (2020) apresentaram o conceito de *Smart Maintenance* (SM), estruturado em quatro dimensões: tomada de decisão baseada em dados, recursos humanos, integração interna e integração externa. Da Silva, Achcar e Piratelli (2020) investigaram estratégias de manutenção baseadas na confiabilidade por meio de *Frailty Models* e distribuições log-normal e *Weibull* para modelar o *Mean Time To Failure* (MTTF). Aivaliotis *et al.* (2021) integraram curvas de degradação a modelos físicos para otimizar a produtividade de robôs industriais, demonstrando avanços na aplicação da manutenção preditiva. Zhang *et al.* (2022) propuseram um modelo de otimização dinâmica para o planejamento dos recursos de manutenção em colhedoras apoiado por ML. Bucay-Valdiviezo *et al.* (2023) propuseram o uso de modelos de séries temporais para previsão de falhas, integrando dados do *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average* (SARIMA) aos módulos *Plant Maintenance* (PM) e *Systems, Applications and Products in Data Processing* (SAP). Einabadi *et al.* (2023) analisaram os custos associados às falhas e às perdas de vida útil dos equipamentos integrando a manutenção preditiva e preventiva por meio de *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Mishra e Satapathy (2023) identificaram fatores críticos relacionados à confiabilidade de máquinas agrícolas, reforçando a aplicabilidade de abordagens baseadas em dados por meio do *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). Wang *et al.* (2023) associaram a capacitação técnica à eficácia da manutenção e à redução das perdas operacionais por meio de *Ordinary Least Squares* (OLS). Matović e Ovesni (2023) integraram abordagens quantitativas e qualitativas com o objetivo de ampliar a robustez da análise dos serviços de manutenção por meio do *Mixed Methods Research* (MMR).

Zhou *et al.* (2023) obtiveram resultados relacionados à eficiência e à confiabilidade da manutenção de máquinas agrícolas por meio de um modelo híbrido baseado em *big data*, combinando *Hybrid Algorithm* (GA e ABC) e *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (F-AHP). Ohue *et al.* (2024) exploraram modelagens matemáticas e heurísticas aplicadas à visão computacional, evidenciando o papel do processamento de alto desempenho na resolução de problemas complexos com o emprego de *Machine Learning* (ML). A pesquisa demonstrou que, em comparação com abordagens estatísticas convencionais, a análise de dados de telemetria e a detecção precoce de desgaste em componentes críticos podem apresentar maior robustez e precisão mediante a utilização de ML. Pérez-Perales *et al.* (2024) abordaram o

planejamento colaborativo em cadeias descentralizadas, com foco na integração espaço-temporal da logística nas frentes de corte e na racionalização dos recursos por meio de um modelo de MILP. A viabilidade da otimização da alocação das equipes técnicas e da sincronização do fluxo de peças de reposição entre a oficina e o campo foi demonstrada por [Pérez-Perales *et al.* \(2024\)](#). [Abedini *et al.* \(2024\)](#) compararam sistemas de monitoramento de condição aplicados à colheita mecanizada de cana-de-açúcar por meio da ANOVA. A pesquisa demonstrou que o monitoramento no ambiente operacional aumentou a disponibilidade das colhedoras e reduziu os custos de manutenção. A relação de pesquisas com aplicação de manutenção pelo Quadro 1.

Quadro 1 - Relação de pesquisas com aplicação de manutenção

Referência	Método	Objetivo/Abordagem
Fisher (1992)	ANOVA	Gestão Estratégica da Manutenção (GEM)
Alsyouf (2009)	CSS	Priorização e Criticidade na Manutenção (PCM)
Molenaers (2012)	AHP	Integração Quanti-Qual e Métodos Mistos (QMQ)
Haegeman (2013)	FTA	Apoio à Decisão (DSS)
López - Milán (2013)	DSS	Gestão e Otimização da Cadeia Sucroenergética (GCS)
Florentino (2014)	BOP	Gestão e Otimização da Cadeia Sucroenergética (GCS)
Florentino (2015)	MILP	Gestão Estratégica da Manutenção (GEM)
Kardec (2015)	TPM	Fundamentos e Métodos Estatísticos (FME)
Montgomery (2017)	ANOVA	Análise de Dados Aplicada (ADA)
Andrade Junior (2018)	RCBD	Análise de Dados Aplicada (ADA)
Dadashnejad (2018)	SEM	Gestão e Otimização da Cadeia Sucroenergética (GCS)
Sampaio (2019)	DES	Priorização e Criticidade na Manutenção (PCM)
Sharma (2019)	DTMC	Gestão Estratégica da Manutenção (GEM)
Baccarin <i>et al.</i> (2020)	TPM	Gestão da Confiabilidade de Ativos (GRA)
Da Silva <i>et al.</i> (2020)	Frailty Model	Otimização da Manutenção (OM)
De Jonge (2020)	HE	Otimização da Manutenção (OM)
Afsharnia <i>et al.</i> (2021)	BN	Gestão Estratégica da Manutenção (GEM)
Santos (2021)	MDE	Otimização da Manutenção (OM)
Dias Neto (2022)	MSEW	Otimização da Manutenção (OM)
Zhang <i>et al.</i> (2022)	ML	Gestão da Confiabilidade de Ativos (GRA)
Oliveira (2022)	RCM	Gestão e Otimização da Cadeia Sucroenergética (GCS)
Ortiz <i>et al.</i> (2022)	MMMs	Análise de Dados Aplicada (ADA)
Samanta (2022)	CNN	Predição de Falhas com Dados (PFD)
Bucay - Valdiviezo (2023)	HWES	Otimização da Manutenção (OM)
Einabadi (2023)	MILP	Integração Quanti-Qual e Métodos Mistos (QMQ)
Matović (2023)	MMR	Modelagem de Ativos e Máquinas (MAM)
Silva (2023)	ML	Análise de Dados Aplicada (ADA)
Wang <i>et al.</i> (2023)	OLS	Gestão da Confiabilidade de Ativos (GRA)

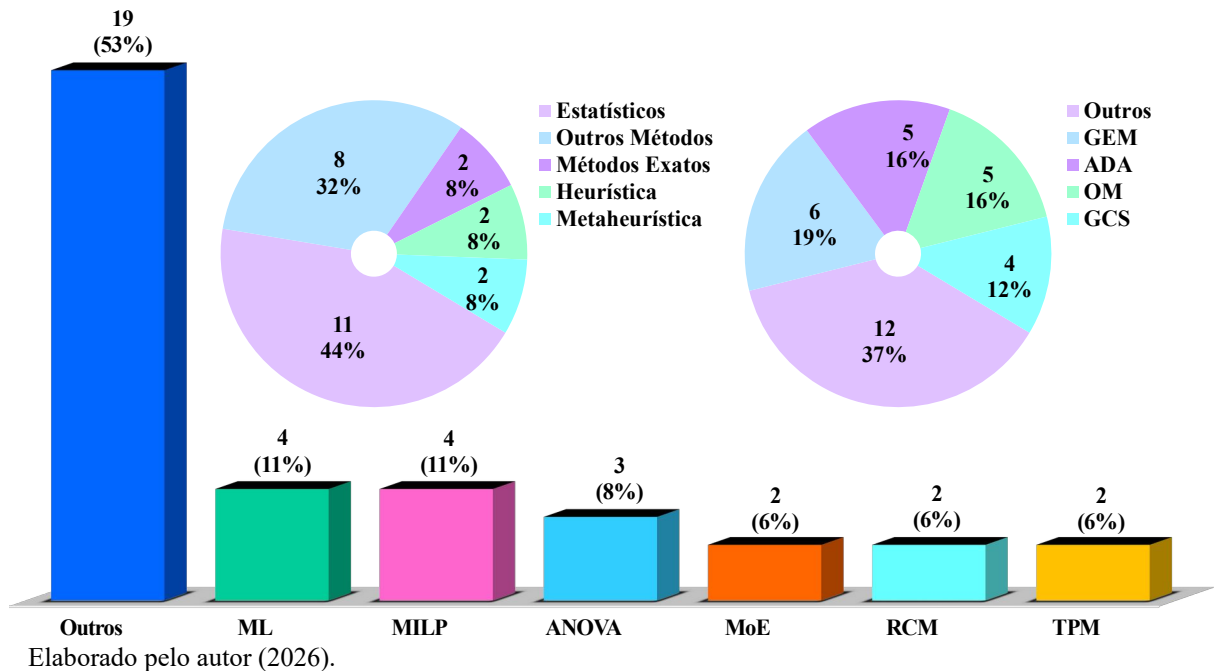
Zhou (2023)	RCM	Análise de Dados Aplicada (ADA)
Abedini (2024)	ANOVA	Gestão Estratégica da Manutenção (GEM)
Ohue <i>et al.</i> (2024)	ML	Gestão e Otimização da Cadeia Sucroenergética (GCS)
Pérez - Perales <i>et al.</i> (2024)	MILP	Gestão Integrada de Produção, Qualidade e Operações
Shi <i>et al.</i> (2024)	MoE	Gestão Estratégica da Manutenção (GEM)

Legenda do Objetivo/Abordagem: FME - Fundamentos e Métodos Estatísticos; GEM - Gestão Estratégica da Manutenção; PCM - Priorização e Criticidade na Manutenção; OM - Otimização da Manutenção; GRA - Gestão da Confiabilidade de Ativos; PFD - Predição de Falhas com Dados; ADA - Análise de Dados Aplicada; GCS - Gestão e Otimização da Cadeia Sucroenergética; MAM - Modelagem de Ativos e Máquinas; QMQ - Integração Quanti-Quali e Métodos Mistos; DSS - Apoio à Decisão; GQO - Gestão Integrada de Produção, Qualidade e Operações.

A síntese apresentada demonstra que a evolução das pesquisas na área de engenharia de manutenção converge para a integração de métodos quantitativos e qualitativos (Quadro 1). Como resultado, observa-se a formação de um arcabouço teórico multidisciplinar, que amplia a compreensão dos processos de manutenção e de seus impactos sobre o desempenho dos ativos. A literatura contemporânea não se limita à descrição das falhas, incorporando modelos matemáticos e estatísticos voltados à análise, à otimização dos processos e ao aumento da previsibilidade dos ativos. As obras selecionadas demonstram que o monitoramento operacional aumentou a disponibilidade das colhedoras e reduziu os custos de manutenção.

Nota-se, nas pesquisas selecionadas, um esforço em demonstrar a aplicabilidade prática dos métodos propostos. Como resultado, reduz-se o distanciamento entre a abordagem teórica e a realidade operacional. Essa perspectiva preserva o rigor conceitual e metodológico, ao mesmo tempo em que associa a fundamentação teórica à aplicação empírica. As contribuições tornam-se particularmente relevantes em contextos caracterizados por grandes volumes de dados, nos quais decisões mais precisas são necessárias para o planejamento, o controle e a otimização das operações de manutenção. Nesse contexto, os métodos mais frequentemente aplicados à manutenção de máquinas agrícolas são apresentados pela Figura 1.

Figura 1 - Principais métodos de aplicação em gestão de manutenção



A Figura 1 mostra que os métodos mais frequentemente aplicados nos estudos analisados são o MILP (53%), o ML (11%) e o MCDM (11%). Esses resultados evidenciam a predominância de técnicas de otimização matemática, análise de dados e apoio multicritério para auxiliar a tomada de decisões na gestão da manutenção. A literatura apresenta um amplo conjunto de abordagens voltadas à melhoria do desempenho dos sistemas de manutenção, abrangendo desde filosofias gerenciais até métodos avançados de modelagem matemática, análise de dados e Inteligência Artificial (IA). Entre as abordagens consolidadas para o suporte à tomada de decisão destacam-se a TPM e a RCM. Além disso, a modelagem matemática e computacional, associada a técnicas de aprendizado de máquina e modelos neurais, tem ampliado as possibilidades de aplicação na gestão da manutenção. Essas ferramentas vêm sendo utilizadas na análise de dados, na previsão de falhas, na otimização de processos, no aumento da confiabilidade operacional e no suporte à tomada de decisão (Quadro 1).

Esta análise evidencia a relevância de métodos quantitativos fundamentados em dados para a análise e a solução de problemas complexos na gestão da manutenção. Esse cenário está relacionado à crescente busca por estratégias capazes de ampliar a confiabilidade dos ativos, aumentar a eficiência operacional e reduzir as incertezas associadas aos processos decisórios. A categoria “Outros” evidencia a diversidade de abordagens empregadas em diferentes contextos de pesquisa (Figura 1). Essas metodologias reforçam o caráter multidisciplinar da gestão da manutenção e podem oferecer contribuições relevantes para

aplicações em ambientes específicos. Uma síntese das principais abordagens teóricas identificadas na literatura, destacando o foco e a contribuição de cada estudo para o desenvolvimento da área, é apresentada pelo Quadro 2.

Quadro 2 - Foco e relevância das abordagens teóricas

Referência	Foco do Estudo	Relevância para a Dissertação
Cezarino e Liboni (2012)	Impactos Socioambientais	Contextualiza a importância da eficiência operacional (manutenção) para a sustentabilidade do setor.
Belluzo et al. (2014)	Competência em Informação	Fundamenta a necessidade de gerir dados e informações para a tomada de decisão técnica.
Bokrantz et al. (2020)	Manutenção Inteligente	Define os conceitos modernos de manutenção que servem de meta para as usinas
Donthu et al. (2021)	Análise Bibliométrica	Fornecer o guia metodológico para a realização da revisão sistemática da literatura deste trabalho.
Pavan et al. (2021)	Economia Circular/Bioeletricidade	Justifica a criticidade da disponibilidade das colhedoras para manter o fluxo de biomassa.

Elaborado pelo autor (2026).

As pesquisas de caráter teórico e conceitual abrangem desde a estruturação de modelos de negócio até a proposição de guias metodológicos (Quadro 2). Essas obras fornecem um importante arcabouço teórico para a compreensão do ecossistema sucroenergético e das diferentes abordagens aplicadas à gestão da manutenção. Além disso, contribuem para fundamentar o rigor metodológico adotado e estabelecer uma base para as análises operacionais subsequentes. A literatura apresenta ampla aplicação de modelos preditivos, métodos estatísticos e algoritmos de otimização. Entretanto, há uma lacuna relacionada ao emprego de métodos estatísticos clássicos na análise direta de dados operacionais provenientes dos sistemas de manutenção. Em rotinas de manutenção agrícola, os registros podem apresentar elevada dispersão e diferentes níveis de variabilidade no ERP. A avaliação das diferenças entre grupos e da associação de fatores categóricos com a variável de interesse pode ser realizada por meio da ANOVA. A ANOVA, diferentemente de abordagens preditivas que podem demandar grandes volumes de dados e infraestrutura computacional específica, possibilita analisar fatores previamente definidos e avaliar sua relação com os tempos de inatividade (Montgomery, 2017; Bucay-Valdiviezo et al., 2023). Isso implica que os dados operacionais podem ser convertidos em evidências estatísticas para subsidiar a tomada de decisão gerencial (Bucay-Valdiviezo et al., 2023).

Essa lacuna metodológica reforça a relevância da aplicação de modelos quantitativos no contexto da gestão da manutenção, especialmente de abordagens voltadas à otimização dos processos e ao suporte à tomada de decisão (Dadashnejad; Valmohammadi, 2018; Junqueira;

Morabito, 2019; Sharma; Tewari, 2019). Paralelamente, a manutenção tem sido consolidada como um fator estratégico, com impactos sobre os custos operacionais, a disponibilidade e a vida útil dos equipamentos, especialmente em sistemas industriais e agrícolas (Baccarin; De Oliveira; Mardegan, 2020; Da Silva; Achcar; Piratelli, 2020; Aivaliotis *et al.*, 2021).

No âmbito das aplicações mais recentes, observa-se a incorporação de tecnologias digitais e de técnicas avançadas de análise de dados, com destaque para o uso de dados de telemetria e aprendizado de máquina na detecção precoce de desgaste em componentes críticos (Ohue *et al.*, 2024). Além disso, estudos aplicados ao setor sucroenergético têm avançado na integração entre manutenção e logística operacional, utilizando modelos de programação matemática, como o *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), para otimizar o planejamento e a alocação de recursos nas frentes de colheita (Zhang *et al.*, 2022; Pérez-Perales *et al.*, 2024).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

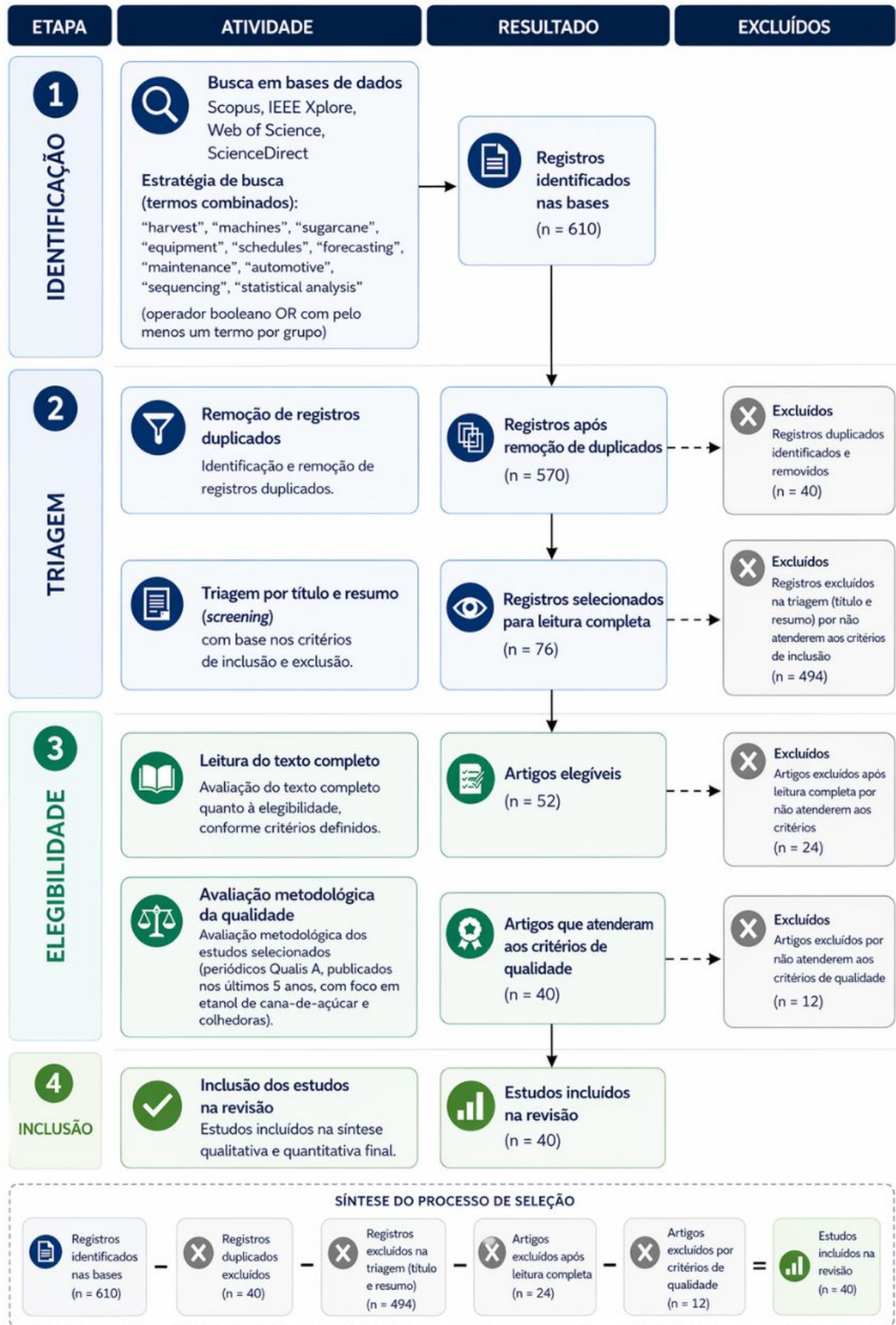
Esta pesquisa é de natureza quantitativa e caracteriza-se como um estudo de caso, com utilização de análise documental e modelagem estatística descritiva e inferencial, aplicada a dados reais de manutenção de uma empresa localizada no interior do estado de São Paulo (Haegeman *et al.*, 2013; Matović; Ovesni, 2023). A pesquisa foi desenvolvida em etapas sequenciais, contemplando a revisão da literatura, a seleção e análise dos estudos, a coleta e o tratamento dos dados operacionais, a análise estatística e a interpretação dos resultados, conforme apresentado na Figura 2.

A primeira etapa consistiu na realização de uma revisão estruturada da literatura, conduzida nas bases de dados Scopus, IEEE Xplore, Web of Science e ScienceDirect, entre outras, seguindo procedimentos metodológicos descritos por [Fisch e Block \(2018\)](#), [Watson e Webster \(2020\)](#), [Donthu et al. \(2021\)](#), [Lim et al. \(2022\)](#) e [Lim \(2025\)](#). Para a busca, foram utilizadas as palavras-chave “*harvest*”, “*machines*”, “*sugarcane*”, “*equipment*”, “*schedules*”, “*forecasting*”, “*maintenance*”, “*automotive*”, “*sequencing*” e “*statistical analysis*”. Os termos relacionados foram agrupados por meio do operador booleano “OR”, enquanto a interseção entre os diferentes temas foi realizada utilizando o operador “AND”.

O processo de seleção dos estudos foi estruturado em quatro etapas, conforme apresentado na Figura 2. Inicialmente, foram identificados os registros nas bases de dados e removidas as duplicidades. Nessa etapa, foram excluídos 40 registros, resultando em 570 estudos únicos. Na etapa de triagem, foram analisados os títulos e resumos, considerando a aderência ao tema e aos critérios previamente estabelecidos. Foram excluídos 494 estudos, permanecendo 76 publicações para leitura completa.

Na etapa de elegibilidade, as 76 publicações foram analisadas integralmente, considerando a relevância temática, a consistência metodológica e o alinhamento com os objetivos da pesquisa. Nessa fase, 24 publicações foram excluídas, resultando em 52 publicações. Posteriormente, realizou-se a avaliação da qualidade dos estudos, considerando a classificação dos periódicos, a atualidade das publicações e a aderência ao contexto do setor sucroenergético, com ênfase na colheita mecanizada e na gestão da manutenção. Após essa avaliação, 12 publicações foram excluídas, resultando em um conjunto final de 40 publicações.

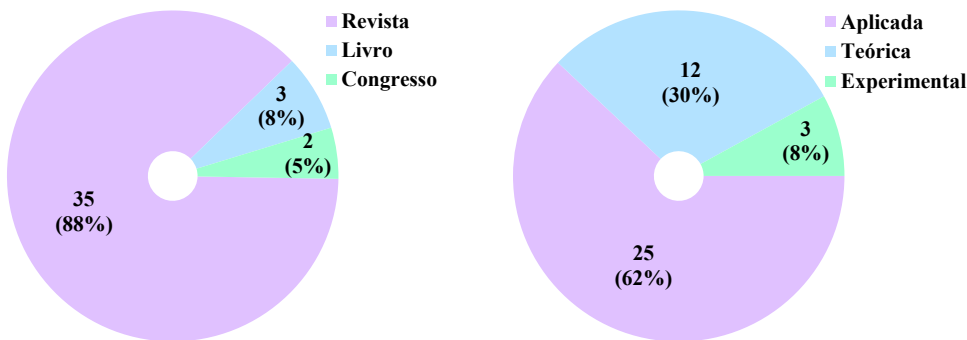
Figura 2 - Fluxograma do processo de seleção das publicações



Nota: Os valores apresentados correspondem ao número de registros/artigos em cada etapa do processo de seleção.

Elaborado pelo autor (2026).

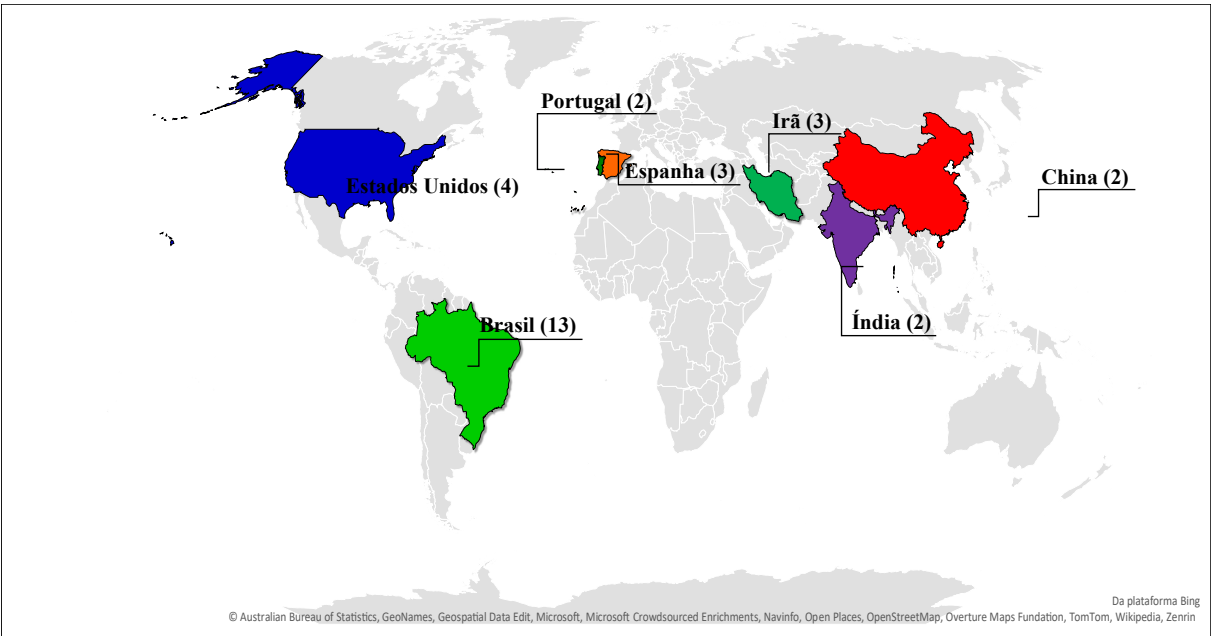
Figura 4 - Classificação dos publicações por tipo e natureza metodológica



Elaborado pelo autor (2026).

Essa etapa permitiu identificar a predominância de estudos de natureza aplicada e caracterizar a diversidade das abordagens metodológicas presentes na literatura selecionada (Figura 4). A análise foi complementada pelo levantamento da distribuição das publicações por país, com o objetivo de examinar os diferentes enfoques adotados nos contextos nacional e internacional ao longo do processo de seleção apresentado na Figura 2. A distribuição geográfica das publicações selecionadas é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Distribuição geográfica dos publicações



Elaborado pelo autor (2026).

Por conseguinte, após a revisão e caracterização da literatura, o estudo utilizou uma base composta por 7.680 observações referentes aos registros de manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar durante o ano de 2024. Os dados relacionados aos equipamentos, modelos,

intervenções de manutenção e tempos de permanência foram extraídos do sistema ERP da usina por meio das OS.

A etapa seguinte consistiu no tratamento e na estruturação da base de dados. Foram realizadas a identificação e a remoção de inconsistências, a padronização das variáveis e a eliminação de registros incompletos ou com tempo de manutenção igual a zero. Esses procedimentos tiveram como objetivo assegurar maior consistência e confiabilidade à base utilizada nas análises estatísticas. A organização preliminar dos dados foi realizada no Microsoft Office Excel 365, enquanto as análises estatísticas subsequentes foram desenvolvidas com o suporte do software Minitab®.

A análise descritiva foi realizada após o tratamento dos dados com o uso de medidas como média, desvio-padrão, mínimo, máximo e mediana. A análise descritiva caracterizou a distribuição dos dados, identificou padrões de comportamento e mensurou a variabilidade dos tempos de parada e dos custos de manutenção. Na sequência, a existência de diferenças estatisticamente significativas nos tempos de parada em função dos fatores analisados foi verificada por meio da ANOVA. As análises consideraram o modelo da colhedora, o tipo de manutenção e a seção de trabalho, com transformação dos tempos de reparo pela função logarítmica natural ($\ln$).

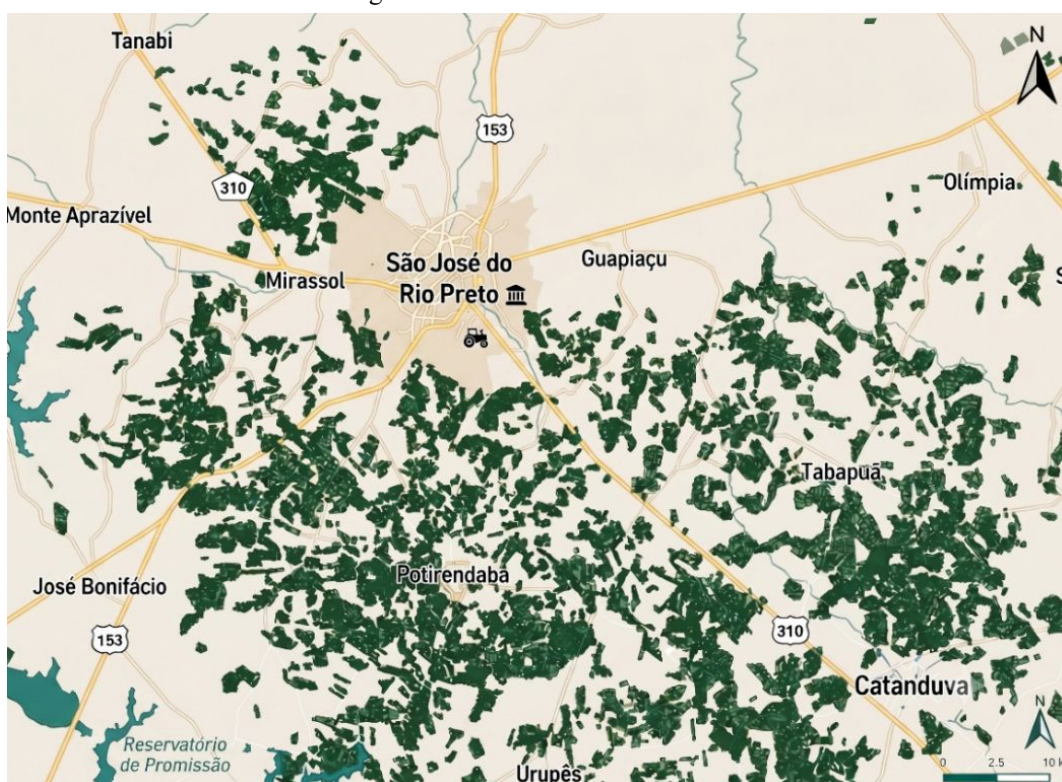
Posteriormente, os resultados estatísticos foram interpretados em conjunto com as informações operacionais da manutenção. Os principais fatores associados aos tempos de parada foram utilizados para direcionar a investigação dos problemas identificados e subsidiar a proposição de ações de melhoria. Os resultados foram confrontados com a percepção de especialistas em manutenção para relacionar as evidências estatísticas ao contexto operacional da empresa. A etapa de interpretação dos resultados consolidou as evidências estatísticas e os principais fatores críticos identificados nas análises realizadas. Por fim, o estudo propõe ações para reduzir os tempos de parada melhorar a utilização dos recursos de manutenção aumentar a disponibilidade das colhedoras e aprimorar a qualidade dos registros das OS.

4 ESTUDO DE CASO NA EMPRESA

4.1 Análise dos valores de manutenção

A empresa objeto de estudo está sediada em São José do Rio Preto, importante cidade do interior paulista, na região noroeste do estado de São Paulo. A organização possui atuação consolidada no setor sucroenergético, com quatro unidades operacionais e atividades voltadas à produção de açúcar, etanol e energia elétrica renovável no Brasil. A infraestrutura conta com uma diversidade de máquinas colhedoras utilizadas nas operações agrícolas. A área de manutenção agrícola possui competências técnicas para atuar em diferentes níveis de complexidade. As intervenções abrangem desde atividades simples até operações especializadas nos sistemas mecânicos hidráulicos e eletrônicos das colhedoras. Nesse contexto, a escala das operações agrícolas reforça a importância de estratégias eficazes de gestão da manutenção. Essas estratégias contribuem para reduzir os tempos de parada e preservar a disponibilidade dos equipamentos durante a colheita. A unidade estudada possui uma área cultivada próxima de 180 mil hectares e produtividade média de 110 t/ha, resultando em uma produção estimada de aproximadamente 19,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra. A distribuição geográfica das áreas de cultivo é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Áreas de colheita da cana



Elaborado pelo autor (2026).

A distribuição geográfica das áreas de cultivo evidencia a elevada complexidade logística associada à operação das colhedoras (Figura 6). A base de dados contempla as OS registradas no sistema ERP em 2024 referentes às colhedoras Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. A MC apresentou a maior frequência (74,6%) e o modelo John Deere CH570 concentrou a maior participação nos registros (52,4%). Os custos médios de manutenção foram de R\$ 355.461 para o Case A8810, R\$ 301.915 para o Case A9900 e R\$ 468.101 para o John Deere CH570. Esses dados constituem a base para a caracterização da amostra e para as análises estatísticas subsequentes dos custos e dos tempos de parada das colhedoras conforme detalhado no Apêndice A.

Entre os registros apresentados, a MC representa a principal categoria de entrada, correspondendo a 47 ocorrências, enquanto a MP apresenta 10 ocorrências. As categorias Geotecnologia e Oportunidade apresentam três ocorrências cada. Em relação aos modelos de equipamentos, o John Deere CH570 concentra a maior quantidade de registros, seguido pelos modelos Case A9900 e Case A8810. Essa distribuição evidencia a predominância das intervenções corretivas e a participação diferenciada dos modelos na composição da base analisada. Entretanto, a quantidade de registros, isoladamente, não permite concluir que determinado modelo apresenta maior custo ou menor estabilidade operacional. Para avaliar essas diferenças de forma objetiva, torna-se necessário analisar as medidas de tendência central e dispersão da variável de interesse. Nesse sentido a análise descritiva da variável Valor Total para cada modelo de colhedora é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise descritiva do campo Valor Total

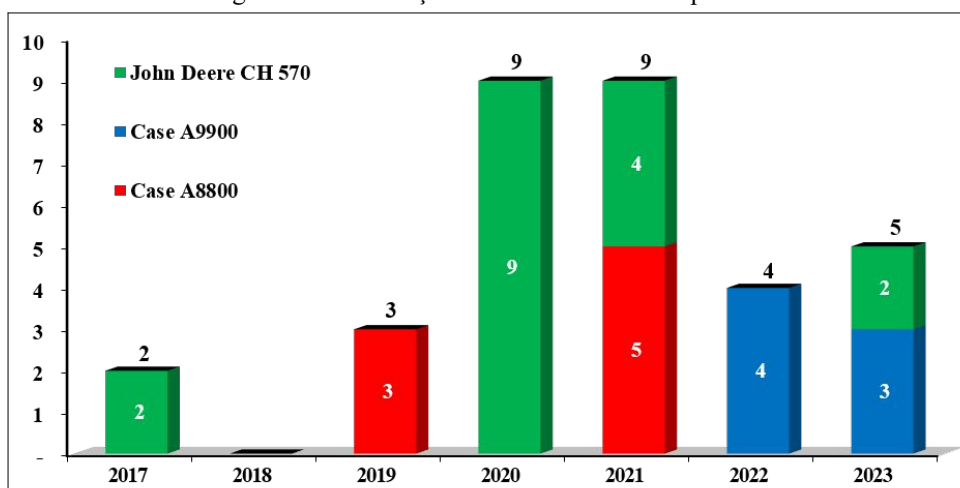
Modelo de Colhedora	Número de Entradas	Média do Valor Total (R\$)	Desvio Padrão (R\$)	Mediana do Valor Total (R\$)
Case A8810	15	355.461	100.409	363.619
Case A9900	16	301.915	55.456	293.113
John Deere CH570	32	468.101	208.115	468.425

Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 1 demonstra que o modelo que possui a maior representatividade de ocorrências na amostra é o John Deere CH570. Além de esse volume representar a predominância na frota, em termos de custos, este modelo segue uma distribuição relativamente simétrica e onerosa, com médias próximas a R\$ 468.000. Um ponto crítico evidenciado, e que denota uma dispersão significativa em relação à média, é o DP elevado do modelo John Deere CH570 (R\$ 208.115). Essa variabilidade pode ser atribuída a dois principais fatores: i) oscilações nas condições de operação e na estratégia de manutenção aplicada a cada unidade; ii) heterogeneidade da frota mediante a aquisição de máquinas em diferentes anos (implicando diferentes estados de conservação e tecnologias).

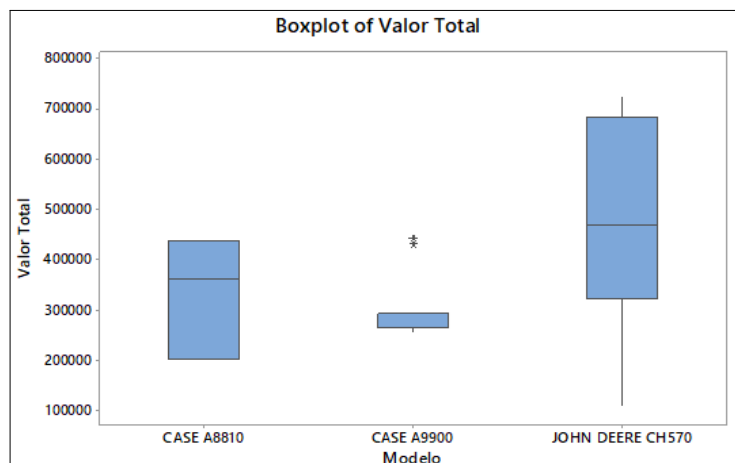
A composição da frota e o comportamento dos custos de manutenção apresentam características distintas no modelo Case A9900. Esse grupo demonstra menor dispersão dos dados e indica que os valores estão concentrados em faixas numéricas mais estreitas e inferiores, com valor total médio de R\$ 301.915 e um DP de R\$ 55.456. Este resultado sugere uma frota homogênea composta por máquinas adquiridas em lotes similares com características técnicas e níveis de desgaste uniformes. Esse resultado indica padronização dos investimentos e maior previsibilidade dos custos de manutenção, conforme demonstrado na Figura 7. Na sequência, a distribuição gráfica dos custos de manutenção por meio de boxplots é ilustrada pela Figura 8.

Figura 7 - Distribuição modelo de colhedora por ano



Elaborado pelo autor (2026).

Figura 8 - Boxplot valores totais por modelo



Elaborado pelo autor (2026).

A análise do comportamento gráfico demonstra consistência com os indicadores numéricos apresentados (Figura 8). Em cada modelo analisado, os boxplots evidenciam a dispersão, a amplitude interquartil e a presença de valores atípicos (*outliers*). A distribuição mais compacta, com menor amplitude interquartil e menor dispersão dos valores, corresponde ao Case A9900. Esse comportamento é consistente com o menor DP observado para o modelo (Tabela 1).

A ocorrência de registros com valores de manutenção que se afastam do comportamento central da distribuição é evidenciada pela presença de *outliers*. Essas ocorrências não implicam necessariamente erros de registro e podem refletir falhas de maior complexidade, que demandam substituição de componentes ou execução de reparos mais extensos. Dessa forma, os valores atípicos devem ser considerados na interpretação da variabilidade dos custos de manutenção. Entretanto, a menor dispersão observada não pode ser atribuída isoladamente à padronização tecnológica ou à uniformidade operacional do modelo Case A9900. A aquisição dos equipamentos em lotes similares também pode constituir uma hipótese explicativa. A sustentação dessa hipótese requer informações adicionais sobre histórico de aquisição, idade dos equipamentos, condições de operação e características das intervenções registradas nas OS.

Em termos gerenciais, a menor variabilidade observada indica maior concentração dos custos registrados na amostra, característica observada no modelo Case A9900. Essa diferença, embora relevante para o planejamento dos recursos, não permite inferir desempenho operacional superior entre os modelos em análise. Além disso, a distribuição temporal das ocorrências evidencia maior concentração dos registros entre os meses de julho e setembro, período de elevada demanda operacional durante a safra. Esse comportamento

reforça a necessidade de planejar as intervenções e assegurar a disponibilidade de peças e equipes de manutenção para reduzir as paradas e a indisponibilidade das colhedoras. Embora os indicadores descritivos e a distribuição gráfica revelem comportamentos distintos entre os modelos, essas evidências não são suficientes para estabelecer diferença estatisticamente significativa entre os valores médios de manutenção. Para verificar essa hipótese, foi realizada uma ANOVA de um fator, considerando o modelo da colhedora como fator e o Valor Total como variável resposta. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - ANOVA do Valor Total por modelo de colhedora

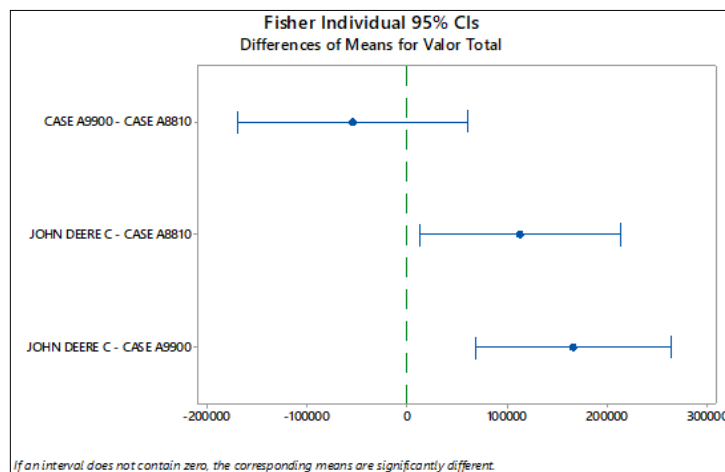
Fonte de Variação	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor-p
Modelo	2	$3,32 \times 10^{11}$	$1,66 \times 10^{11}$	6,51	0,003
Erro	60	$1,53 \times 10^{12}$	$2,55 \times 10^{10}$		
Total	62	$1,86 \times 10^{12}$			

Elaborado pelo autor (2026). Referências: GL - Grau de Liberdade; SQ - Soma Quadrada; MQ - Média Quadrada

Os resultados indicaram $F = 6,51$ e $\text{valor-p} = 0,003$, inferior ao nível de significância estabelecido ($p < 0,05$), o que levou à rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias dos grupos. Portanto, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas nos valores médios de manutenção entre os modelos, indicando associação entre o fator modelo e os custos observados na amostra.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 17,83\%$) indica que as diferenças entre os modelos explicam aproximadamente 17,83% da variabilidade observada no “Valor Total”. Embora o efeito do fator modelo tenha apresentado significância estatística, o valor de R^2 indica que a maior parte da variabilidade dos custos não é explicada exclusivamente por esse fator. Esse resultado reflete a natureza multifatorial dos custos de manutenção associados às condições operacionais aos tipos de intervenção e aos sistemas afetados. Dessa forma, a ANOVA demonstra a existência de diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos, mas não permite determinar quais modelos apresentam diferenças entre si. Logo, o teste de comparações múltiplas de Fisher foi realizado para identificar os pares de modelos com diferenças estatisticamente significativas, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Intervalo de confiança individual de 95% de Fisher



Elaborado pelo autor (2026).

Este procedimento foi utilizado para identificar diferenças específicas entre os custos médios dos modelos analisados: Case A9900, Case A8810 e John Deere CH570. A análise dos intervalos de confiança individuais de 95% obtidos pelo teste de comparações múltiplas de Fisher permite identificar quais comparações apresentam diferenças estatisticamente significativas entre as médias (Figura 9).

A análise evidencia que a John Deere CH570 apresenta custo médio de Valor Total estatisticamente superior à Case A8810 e à Case A9900. Essa diferença é evidenciada pelos IC inteiramente acima de zero nas comparações “John Deere CH570 – Case A8810” e “John Deere CH570 – Case A9900.” Como os IC de 95% não contêm o valor zero, as diferenças entre essas médias são estatisticamente significativas ao nível de 5%. Esse resultado indica que, na amostra analisada, o custo médio associado ao modelo John Deere CH570 é superior aos custos médios observados nos dois modelos Case.

Em contraste, não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre Case A9900 e Case A8810. Observa-se que o IC da diferença “Case A9900 – Case A8810” inclui o valor zero, o que indica ausência de evidência estatística suficiente para afirmar diferença entre os custos médios dos modelos ao nível de 5%. Portanto, o teste de Fisher distingue dois grupos quanto ao custo médio de manutenção na amostra analisada: i) um grupo de maior custo médio, representado pelo modelo John Deere CH570; e ii) um grupo no qual não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre Case A9900 e Case A8810.

É importante ressaltar que foram identificadas diferenças estatisticamente significativas nos custos médios de manutenção dos modelos Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. Entretanto, a análise descritiva indica que outros fatores também podem estar associados à variabilidade observada nos registros das OS. Nesse contexto, os registros foram categorizados em quatro grupos de acordo com o motivo de entrada: Geotecnologia,

Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Oportunidade. A análise dos valores de manutenção segundo esses grupos é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Valor total de manutenção por motivo de entrada

Motivo de Entrada	N	Média (R\$)	Desvio Padrão (R\$)	Mediana(R\$)
Geotecnologia	3	286.522	80.594	293.113
Manutenção Corretiva	47	399.059	176.177	431.721
Manutenção Preventiva	10	361.007	130.301	363.619
Oportunidade	3	638.793	147.543	723.976

Elaborado pelo autor (2026). Referências às abreviações: N - número de entradas

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas da variável “Valor Total” segundo o motivo de entrada das Ordens de Serviço. Observa-se que o grupo Oportunidade apresentou a maior média da variável “Valor Total”, correspondente a R\$ 638.793. Essa categoria está associada a intervenções realizadas de forma oportunista durante períodos de indisponibilidade temporária do equipamento. Esses serviços são executados quando as condições operacionais possibilitam a manutenção sem a necessidade de uma parada corretiva específica. Nesse contexto, incluem-se intervenções realizadas durante paradas industriais, interrupções operacionais ou períodos em que as condições climáticas impedem temporariamente a continuidade das atividades.

A elevada média observada no grupo Oportunidade apresentou considerável dispersão dos valores, expressa pelo DP de R\$ 147.543. Entretanto, os resultados devem ser interpretados com cautela e não generalizados para toda a frota devido ao reduzido número de observações do grupo (N = 3). Embora a categoria tenha apresentado o maior valor médio, o número reduzido de registros limita a generalização do comportamento dos custos associados às intervenções de oportunidade.

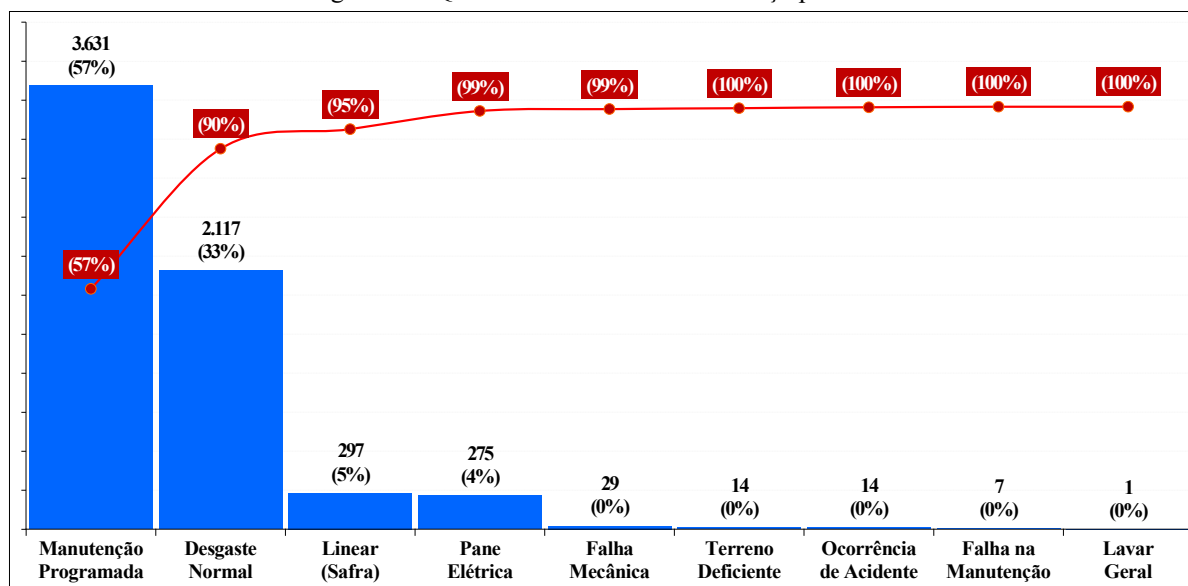
Em termos de gestão da manutenção, as intervenções de oportunidade podem antecipar a execução de serviços durante períodos de indisponibilidade operacional. Essa prática pode reduzir a necessidade de futuras paradas específicas para manutenção. Assim, a análise dessa categoria deve considerar não apenas o custo da intervenção, mas também o momento em que ela foi realizada e seu potencial impacto sobre a disponibilidade dos equipamentos.

Em contrapartida, o grupo Geotecnologia apresentou a menor média da variável “Valor Total”, correspondente a R\$ 286.522. Entretanto, a robustez das interpretações estatísticas é limitada pelo reduzido número de observações do grupo (N = 3). Além disso, os registros sugerem possíveis inconsistências na classificação das OS. Parte das ocorrências

pode estar associada a outras atividades de manutenção, embora tenha sido registrada na categoria Geotecnologia. Essa possibilidade deve ser considerada na interpretação dos resultados, pois inconsistências na classificação podem alterar a distribuição dos custos entre os motivos de entrada registrados nas OS.

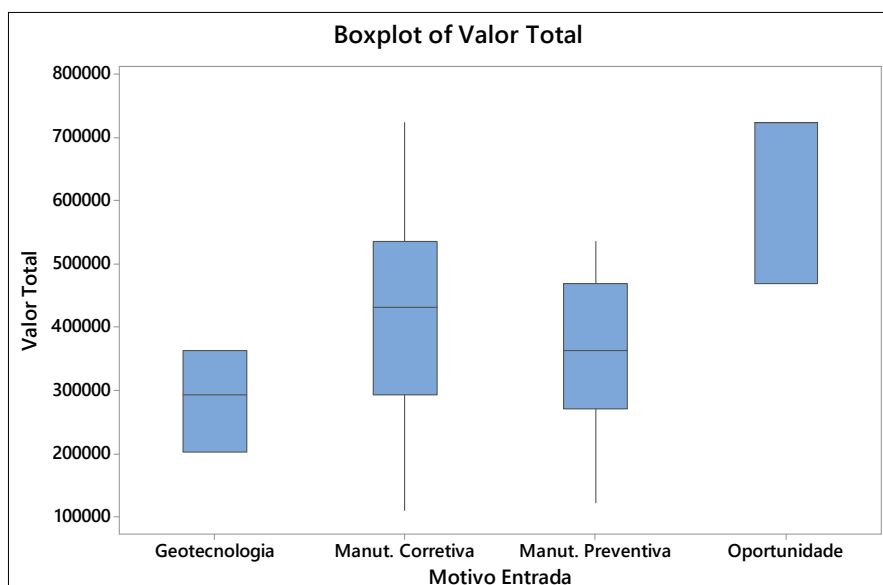
Entre as categorias com maior representatividade amostral, a MC apresentou a maior média, de R\$ 399.059, acompanhada de desvio-padrão de R\$ 176.177. Esse resultado evidencia elevada dispersão dos custos das intervenções corretivas, indicando que os valores registrados apresentam comportamento variável. A MP, por sua vez, apresentou média de R\$ 361.007 e desvio-padrão de R\$ 130.301. Embora esse grupo também apresente dispersão, a maior concentração dos valores em torno da média é evidenciada pelo menor DP em relação à MC. Esse comportamento pode estar relacionado à natureza programada das intervenções preventivas, embora essa relação não possa ser estabelecida exclusivamente a partir das estatísticas descritivas. A distribuição dos custos de manutenção segundo os motivos de entrada é apresentada pela Figura 10. Na sequência, a distribuição dos custos por meio de gráficos *boxplot* é ilustrada pela Figura 11.

Figura 10 - Quantidade de Ordens de Serviço por causa



Elaborado pelo autor (2026).

Figura 11 - Boxplot Comparativo do Custo Total por Motivo de Entrada



Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 11 evidencia a tendência central, a dispersão, a assimetria, a amplitude e a presença de valores atípicos (*outliers*) em cada categoria, complementando as estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 4. A MC apresenta ampla dispersão dos valores, evidenciada pela extensão do intervalo entre os limites inferior e superior do *boxplot*. O intervalo interquartil apresenta amplitude considerável e representa a faixa central dos dados correspondente a 50%. Esse comportamento é compatível com o maior DP entre as categorias com maior representatividade amostral (R\$ 176.177). Esse resultado evidencia elevada variabilidade dos custos associados às intervenções corretivas. Embora a distribuição apresente valores mais elevados em sua porção superior, a análise gráfica não evidencia a presença de *outliers*.

A MP, por sua vez, apresenta distribuição relativamente mais concentrada em comparação à MC. O intervalo interquartil é menor e os valores encontram-se distribuídos em uma faixa mais restrita, comportamento compatível com o menor DP observado para essa categoria, de R\$ 130.301. Esses resultados indicam menor dispersão dos custos das intervenções preventivas na amostra analisada. Entretanto, essa característica deve ser interpretada como uma propriedade descritiva dos dados, não sendo suficiente, isoladamente, para afirmar maior previsibilidade do processo de manutenção das OS.

A categoria Oportunidade destaca-se por apresentar a maior mediana entre os grupos analisados, de R\$ 723.976. Também apresenta uma amplitude interquartil elevada, indicando dispersão dos custos dentro da categoria Oportunidade. Entretanto, a interpretação da

distribuição deve ser realizada com cautela devido ao reduzido número de observações do grupo ($N = 3$). Essa condição limita a precisão das inferências relacionadas à categoria Oportunidade ($N = 3$).

Por sua vez, a categoria Geotecnologia apresenta a menor mediana entre os grupos, de R\$ 293.113. A distribuição também ocupa uma faixa de valores inferior às demais categorias. Entretanto, o reduzido número de observações limita conclusões abrangentes sobre o comportamento dos custos tanto desse motivo de entrada quanto da categoria Oportunidade ($N = 3$). Ainda assim, a análise gráfica evidencia diferenças na posição central e na dispersão dos custos entre os motivos de entrada, com maior variabilidade na MC e valores mais elevados na categoria Oportunidade.

As diferenças observadas possuem caráter descritivo e não são suficientes para determinar a significância estatística entre as médias dos grupos. A existência de diferenças nos custos médios associados aos motivos de entrada foi avaliada por meio de ANOVA de um fator. A análise foi conduzida sob a premissa de homogeneidade das variâncias, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). As categorias consideradas foram Geotecnologia, Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Oportunidade, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - ANOVA do “Valor Total” por motivo de entrada

Fonte de Variação	GL	SQ	MQ Média Quadrática	Valor F	Valor-p
Motivo de Entrada	3	$2,25 \times 10^{11}$	$7,50 \times 10^{10}$	2,7	0,054
Erro	59	$1,64 \times 10^{12}$	$2,77 \times 10^{10}$		
Total	62	$1,86 \times 10^{12}$			

Elaborado pelo autor (2026). Referências às abreviações: GL - Grau de Liberdade; SQ – Soma

A Tabela 4 apresenta os resultados da ANOVA aplicada à variável “Valor Total” em função do motivo de entrada das OS. Foram consideradas quatro categorias: Geotecnologia, Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Oportunidade. A análise foi realizada sob a premissa de homogeneidade das variâncias, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Os resultados indicaram valor de $F = 2,70$ e valor-p = 0,054. Como o valor-p é ligeiramente superior ao nível de significância estabelecido, não se rejeita a hipótese nula de igualdade entre as médias dos motivos de entrada ao nível de 5%.

Portanto, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos ao nível de significância adotado. Entretanto, o valor-p encontra-se

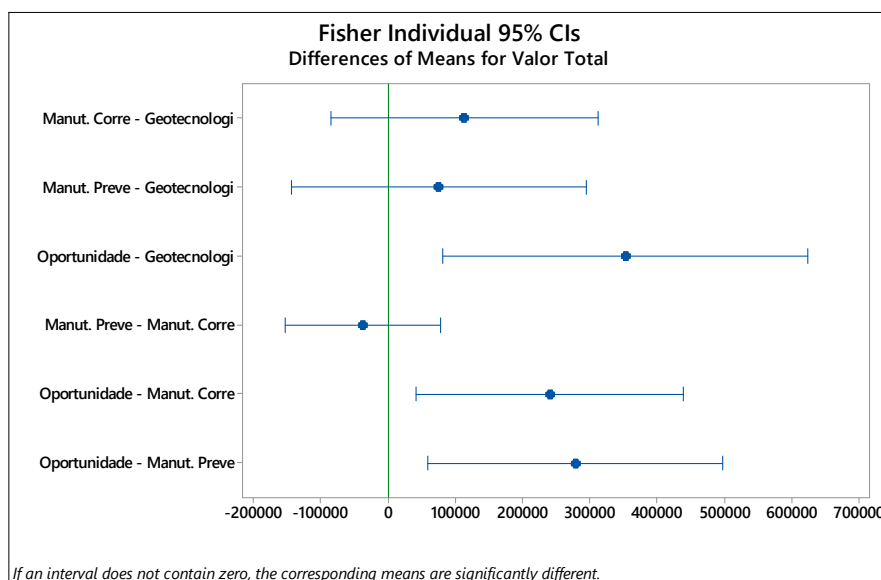
próximo do limite convencional de significância, indicando uma evidência sugestiva de diferenças entre as categorias analisadas. A adoção de um nível de significância de 10% ($\alpha = 0,10$) levaria à rejeição da hipótese nula, dado o valor-p observado (0,054). Esse resultado deve ser interpretado como uma indicação de possível diferença entre os grupos, e não como evidência estatística conclusiva ao nível de 5%.

A proximidade do valor-p em relação ao nível de significância reforça a necessidade de considerar a variabilidade existente entre as categorias. Logo, conforme apresentado na Tabela 4, os grupos apresentam diferentes níveis de dispersão, com destaque para a MC, que apresentou desvio-padrão de R\$ 176.177. Essa elevada variabilidade pode reduzir a capacidade do teste de detectar diferenças entre as médias, especialmente diante do número reduzido de observações nas categorias Geotecnologia e Oportunidade.

A MC apresentou elevada dispersão dos custos entre as 47 ocorrências analisadas, com média de R\$ 399.059 e DP de R\$ 176.177. Esse comportamento evidencia elevada variabilidade entre as intervenções corretivas e reduz a previsibilidade dos custos associados a esse tipo de manutenção. A MP, por sua vez, apresentou média de R\$ 361.007 e DP de R\$ 130.301. Embora também apresente dispersão, os valores encontram-se menos dispersos que os observados na MC. Essa característica é compatível com a natureza programada das intervenções preventivas. Entretanto, as estatísticas descritivas não são suficientes para afirmar que esse tipo de manutenção seja mais previsível em todas as condições operacionais.

A categoria Oportunidade apresentou a maior média de custo, de R\$ 638.793, acompanhada de DP de R\$ 147.543. Entretanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois a categoria possui apenas três observações. Analogamente, a robustez das comparações e a generalização dos resultados são limitadas pelo reduzido número de registros da categoria Geotecnologia. Diante das diferenças observadas nas estatísticas descritivas, foi aplicada a análise de comparações múltiplas pelo método de Fisher. Os resultados das comparações entre os pares de categorias são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Intervalos de confiança de Fisher para a diferença entre médias do valor total



Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 12 apresenta as comparações múltiplas de Fisher, com intervalos de confiança de 95%, para as diferenças entre as médias da variável “Valor Total” segundo os motivos de entrada das OS. A linha vertical correspondente ao valor zero representa a ausência de diferença entre as médias. Assim, quando o intervalo de confiança não contém o zero, a diferença entre os respectivos grupos é considerada estatisticamente significativa ao nível de 5%. Note que há diferenças positivas em relação às demais categorias quando os intervalos de confiança das comparações não incluem o valor zero para a categoria Oportunidade. Nas comparações individuais, a diferença é considerada estatisticamente significativa quando o intervalo de confiança não inclui o valor zero, considerando nível de confiança de 95%. Nesse caso, as comparações “Oportunidade – Geotecnologia”, “Oportunidade – Manutenção Corretiva” e “Oportunidade – Manutenção Preventiva” devem ser interpretadas de acordo com os respectivos intervalos de confiança apresentados na Figura 12. Entretanto, esses resultados devem ser analisados conjuntamente com o resultado global da ANOVA, cujo valor-p foi 0,054 e, portanto, não atingiu o nível de significância de 5%.

Nas comparações entre MC, MP e Geotecnologia, a presença do valor zero nos respectivos intervalos de confiança indica ausência de evidência suficiente de diferença entre as médias dessas categorias ao nível de 5%. Esse resultado sugere que, apesar das diferenças descritivas observadas nos custos, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre essas categorias para $\alpha = 0,05$.

Em termos gerais, os resultados demonstram que os motivos de entrada apresentam comportamentos distintos em termos de média e dispersão dos custos, mas a ANOVA não

identificou diferença estatisticamente significativa entre as médias ao nível de 5%. A elevada variabilidade observada entre os grupos reforça a necessidade de ampliar a análise para outras dimensões do processo de manutenção. Nesse sentido, os tempos de permanência em manutenção foram analisados como indicador da indisponibilidade das colhedoras a partir das OS.

A análise evidencia custo médio significativamente superior às demais categorias para Oportunidade. Os intervalos de confiança estão integralmente à direita do zero nas comparações “Oportunidade – Geotecnologia”, “Oportunidade – Manutenção Corretiva” e “Oportunidade – Manutenção Preventiva”. Na amostra analisada, os custos médios das demais categorias foram estatisticamente inferiores ao custo médio das intervenções classificadas como Oportunidade.

Os intervalos de confiança atravessam a linha do zero nas comparações entre MC, MP e Geotecnologia. Dessa forma, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as médias desses grupos ao nível de 5%. Esse resultado indica ausência de evidência estatística suficiente para afirmar diferenças entre os custos médios dessas categorias, apesar das diferenças observadas nas estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 4. A categoria Geotecnologia merece atenção específica, pois sua amostra é composta por apenas três observações, apesar de apresentar a menor média de “Valor Total”.

A diferença entre Geotecnologia e Oportunidade é estatisticamente significativa, enquanto as comparações com MC e MP não apresentam significância estatística, conforme apresentado na Figura 12. Portanto, não é adequado utilizar esse resultado para afirmar que os registros de Geotecnologia correspondem necessariamente a erros de abertura de OS. Essa possibilidade deve ser investigada a partir da análise individual dos registros e da validação das informações junto à equipe de manutenção. A principal diferença estatística entre os motivos de entrada está associada à categoria Oportunidade, que apresenta valores médios superiores aos demais grupos, conforme evidenciado na Figura 12. Por outro lado, as diferenças entre MC, MP e Geotecnologia não foram estatisticamente significativas ao nível de 5%. Esses resultados devem ser interpretados conjuntamente com o tamanho amostral e a dispersão observada nas categorias MC, MP, Geotecnologia e Oportunidade.

4.2 Análise do tempo de parada das colhedoras

A análise do tempo de parada das colhedoras foi conduzida com base nas medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (DP). Os modelos Case A8810 e Case

A9900 apresentam tempos médios de permanência relativamente próximos. O modelo Case A8810 (N = 15) apresentou permanência média de 0,0804 dia, enquanto o Case A9900 (N = 16) apresentou média de 0,0982 dia. As medianas foram de 0,0479 dia e 0,0750 dia, respectivamente. Os desvios-padrão também foram relativamente baixos, de 0,0907 dia para o Case A8810 e 0,1346 dia para o Case A9900, indicando menor dispersão dos tempos de permanência em comparação ao modelo John Deere CH570. As estatísticas descritivas do tempo de permanência das colhedoras em manutenção, expresso em dias, segundo o modelo do equipamento são apresentadas pela Tabela 5.

Tabela 5 - Estatística descritivas da permanência em dias por modelo

Modelo	N	Média (dia)	Desvio Padrão (dia)	Mediana (dia)
Case A8800	15	0,0804	0,0907	0,0479
Case A9900	16	0,0982	0,1346	0,075
John Deere CH570	31	0,2002	0,3636	0,0642

Elaborado pelo autor (2026). Referências às abreviações: N - número de entradas

Em contraste, o modelo John Deere CH570 (N = 32) apresentou comportamento distinto. A permanência média foi de 0,2002 dia, aproximadamente duas vezes superior à observada no Case A8810 e ao dobro da registrada no Case A9900. A diferença entre média e mediana sugere assimetria positiva na distribuição, com concentração dos tempos de permanência em torno de 0,0642 dia. Esse comportamento é reforçado pela variabilidade observada nos tempos de permanência, representada por um DP de 0,3636 dia. A diferença entre média e mediana indica acentuada dispersão dos tempos de permanência e sugere assimetria positiva na distribuição dos dados, reforçada pelo elevado DP. Dessa forma, a ocorrência de intervenções mais prolongadas contribuiu significativamente para elevar a média, apesar da concentração de registros de curta duração no modelo John Deere CH570.

Em termos operacionais, esse comportamento é relevante porque evidência maior variabilidade nos tempos de imobilização do modelo John Deere CH570. A ocorrência de intervenções prolongadas pode dificultar o planejamento da manutenção e da operação agrícola. Durante a colheita, a indisponibilidade das colhedoras pode comprometer a continuidade das frentes de corte e o desempenho operacional da usina do interior de São Paulo.

Esses resultados indicam diferenças no comportamento dos tempos de permanência entre os modelos analisados (Tabela 5). Entretanto, as estatísticas descritivas, isoladamente, não permitem determinar se essas diferenças são estatisticamente significativas. Logo, para

verificar se o modelo da colhedora está associado aos tempos de permanência, foi realizada uma ANOVA, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - ANOVA entre modelos de colhedora

Fonte de Variação	GL	SQ Adj. SS(ln)	QM Adj. MS(ln)	F	Valor-p
Modelo	2	3,301	1,65	0,72	0,491
Erro	59	135,291	2,293	—	—
Total	62	138,591	—	—	—

Elaborado pelo autor (2026). Referências às abreviações: GL - Grau Liberdade; SQ (Adj.SS) - Ajust Sum of Square; QM (Adj. MS) - Ajust Mean Square.

A Tabela 6 apresenta os resultados da ANOVA de um fator aplicada aos tempos de permanência das colhedoras, após a transformação dos dados para a escala logarítmica natural (ln). A transformação foi empregada com o objetivo de reduzir a assimetria e a dispersão dos dados e, conseqüentemente, melhorar a adequação às premissas estatísticas necessárias à aplicação da ANOVA. Esse teste teve como objetivo verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os tempos médios de permanência dos três modelos de colhedoras analisados: Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. A hipótese nula estabelece que as médias de permanência são iguais entre os modelos, enquanto a hipótese alternativa indica que pelo menos uma das médias é diferente, com base nas OS.

Note que $F = 0,72$ e $\text{valor-p} = 0,491$, não sendo rejeitada a hipótese nula ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Portanto, considerando os dados transformados em escala logarítmica, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os tempos médios de permanência dos modelos analisados. Esse resultado indica que as estatísticas descritivas da Tabela 6 apresentaram diferenças numéricas entre os modelos, especialmente em relação ao maior tempo médio observado para o John Deere CH570. Entretanto, essas diferenças não foram suficientemente consistentes para serem consideradas estatisticamente significativas ao nível de 5%. O maior valor médio observado para esse modelo não constitui evidência estatística e reflete apenas o comportamento das OS.

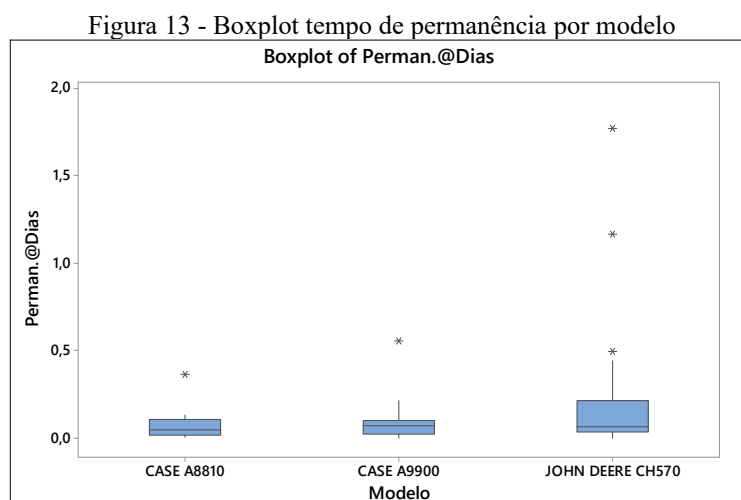
A transformação logarítmica reduz a influência de observações com tempos de permanência elevados e diminui a dispersão dos dados originais. Ainda assim, a variabilidade permanece relevante para a interpretação operacional dos resultados. A ocorrência de intervenções prolongadas pode comprometer o planejamento da manutenção e a disponibilidade das colhedoras durante a safra. Para complementar a análise da ANOVA e visualizar as diferenças entre os modelos na escala transformada, a Tabela 7 apresenta as médias dos tempos de permanência por modelo e seus respectivos intervalos de confiança de 95%. Na sequência, o *boxplot* dos tempos de permanência por modelo, permitindo visualizar

a distribuição, a dispersão e a presença de possíveis valores atípicos nos registros analisados é apresentado pela Figura 13.

Tabela 7 - Média por modelo e intervalo de confiança (95%)

Modelo	N	Média (ln)	Desvio Padrão (ln)	IC 95%(ln)
Case A8810	15	-3,069	1,165	(-3,851; -2,286)
Case A9900	16	-3,046	1,487	(-3,803; -2,288)
John Deere CH570	31	-2,596	1,664	(-3,140; -2,051)

Elaborado pelo autor (2026). Referências: N - Número de Entradas.



Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 7 apresenta as médias dos tempos de permanência dos modelos de colhedoras na escala logarítmica natural (ln), acompanhadas dos respectivos DP e IC de 95%. Os resultados devem ser interpretados conjuntamente com a ANOVA apresentada na Tabela 6, cujo valor-p de 0,491 não indicou diferença estatisticamente significativa entre os modelos ao nível de significância de 5%.

Assim, para o conjunto amostral analisado, não foram identificadas evidências estatísticas suficientes de que o modelo da colhedora esteja associado a diferenças nos tempos médios de permanência em manutenção. O modelo John Deere CH570 apresentou a maior média na escala logarítmica (-2,596). Entretanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa em relação ao Case A8810 (-3,069) e ao Case A9900 (-3,046). Esse resultado indica que as diferenças observadas nas médias podem estar relacionadas à variabilidade existente nos registros e não necessariamente a um efeito sistemático do modelo da colhedora.

Apesar da ausência de significância estatística, a análise do boxplot evidencia diferenças importantes na distribuição dos tempos de permanência entre os modelos (Figura 13). A análise evidencia distribuições relativamente concentradas, com intervalos interquartis

reduzidos, nos modelos Case A8810 e Case A9900. A maior parte dos registros encontra-se em tempos inferiores a aproximadamente 0,2 dia. Entretanto, são observadas ocorrências de maior duração em relação à concentração principal dos dados, representadas por valores atípicos próximos de 0,35 dia para o Case A8810 e 0,55 dia para o Case A9900.

O modelo John Deere CH570 apresenta maior dispersão dos tempos de permanência, com intervalo interquartil mais amplo e mediana superior às observadas nos modelos Case. Além disso, há evidências da presença de valores atípicos com tempos de aproximadamente 0,50, 1,15 e 1,75 dias (Figura 13). Esses registros representam ocorrências de maior duração e contribuem para a elevada dispersão dos tempos de permanência do modelo John Deere CH570. Esse comportamento também é compatível com o DP de 0,3636 na escala logarítmica, superior ao valor médio de -2,596.

Assim, a ANOVA não identificou diferenças estatisticamente significativas entre os modelos, apesar da maior dispersão e das ocorrências de permanência mais prolongada observadas no John Deere CH570. Portanto, não é possível atribuir, com base nessa análise, as diferenças observadas nos tempos de permanência exclusivamente ao modelo da colhedora. A variabilidade observada pode estar relacionada a fatores operacionais, como os sistemas afetados, a disponibilidade de peças e os tempos de diagnóstico e reparo.

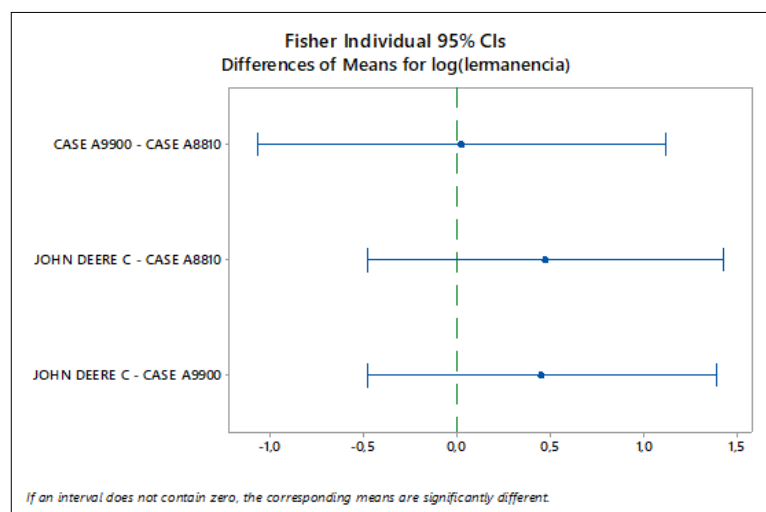
Uma série de comparações múltiplas foi então realizada pelo método de Fisher para complementar os resultados da ANOVA. Os resultados numéricos são apresentados na Tabela 9, enquanto os respectivos intervalos de confiança de 95% para as diferenças entre as médias são apresentados graficamente na Figura 14.

Tabela 8 - Análise pelo método de Fisher

Fonte	GL	SQ (Adj. SS)	QM (Adj. MS)	Valor-F	Valor-p
Seção Trab.	3	41.207.061.803	13.735.687.268	0,45	0,722
Erro	59	1.820.780.000.000	30.860.606.348		

Elaborado pelo autor (2026).

Figura 14 - Intervalo de confiança individual de 95% de Fisher diferença entre médias



Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 8 apresenta os resultados das comparações múltiplas pelo método de Fisher e confirma a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os modelos analisados, corroborando os resultados obtidos pela ANOVA. A análise dos tempos de parada para manutenção revelou aspectos relevantes que transcendem a simples comparação das médias aritméticas. Embora não tenha sido identificada significância estatística, o maior tempo médio de permanência nos dados brutos correspondeu a 0,2002 dias no modelo John Deere CH570.

Após a transformação logarítmica dos dados, necessária para atender aos pressupostos da análise estatística, as diferenças entre os modelos permaneceram não significativas. A principal explicação para esse resultado está associada à elevada variabilidade observada nos dados, especialmente no modelo John Deere CH570. Esse equipamento apresentou desvio-padrão de 0,3636, além de amplo intervalo interquartil e ocorrência de valores atípicos associados a paradas de longa duração, em comparação aos modelos Case. Logo, a elevada dispersão dos dados aumentou a variabilidade residual e reduziu o poder discriminatório da ANOVA, conforme apresentado na Tabela 8.

Além disso, os intervalos mostraram-se amplos e incluíram o valor zero em todas as comparações realizadas, ao nível de confiança de 95%. Logo, apesar das diferenças numéricas observadas entre os modelos, não existem evidências estatísticas suficientes para afirmar que os tempos médios de permanência em manutenção sejam distintos. As estatísticas descritivas da variável Permanência na escala logarítmica para complementar a interpretação de cada modelo de equipamento analisado são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Estatísticas descritivas da variável permanência por modelo de equipamento

Modelo	N	Mean (ln)	StDev (ln)	CI 95%(ln)
Case A8810	15	-3,069	1,165	(-3,851; -2,286)
Case A9900	16	-3,046	1,487	(-3,803; -2,288)
John Deere CH570	31	-2,596	1,664	(-3,140; -2,051)

Elaborado pelo autor (2026).

A análise indica que os intervalos de confiança de 95% das diferenças entre as médias dos modelos incluem o valor zero (Tabela 9). Dessa forma, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os modelos de colhedoras analisados, corroborando o resultado obtido na ANOVA, apresentada na Tabela 7. Embora o modelo John Deere CH570 tenha apresentado a maior média de permanência na escala logarítmica (-2,596), não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas em relação aos modelos Case A8810 (-3,069) e Case A9900 (-3,046). Portanto, os resultados não permitem afirmar que o modelo da colhedora exerça influência significativa sobre o tempo médio de permanência em manutenção.

A interpretação desses resultados deve considerar a elevada variabilidade observada nos dados. O modelo John Deere CH570 apresentou maior dispersão dos tempos de permanência em relação à média, com desvio-padrão na escala logarítmica de 1,664 (StDev = 1,664). Esse comportamento, na qual o modelo apresentou maior amplitude da distribuição e ocorrências de valores atípicos associados a intervenções de maior duração, também foi observado na análise gráfica apresentada na Figura 13.

A elevada dispersão contribuiu para a obtenção de IC mais amplos nas comparações envolvendo o modelo John Deere CH570. Não foi possível confirmar estatisticamente as diferenças numéricas observadas entre os modelos devido à inclusão do valor zero nos IC. Assim, esses resultados devem ser interpretados como características observadas na amostra, e não como evidência de que o modelo, isoladamente, determine maior tempo de permanência em manutenção, como observado para o John Deere CH570.

Assim, os resultados indicam que outros fatores relacionados ao processo de manutenção podem contribuir para explicar a variabilidade dos tempos de parada. Entre esses fatores, destacam-se o tipo e a severidade da falha, o sistema ou componente afetado, o tempo necessário para diagnóstico, a disponibilidade de peças e recursos, e o tempo de execução do reparo. Nesse sentido, a análise dos motivos de entrada das colhedoras na manutenção constitui uma etapa complementar para investigar possíveis fatores associados ao tempo de indisponibilidade. As estatísticas descritivas da variável “Permanência”, expressa em dias, em

função dos motivos de entrada das colhedoras na manutenção são apresentadas pela Tabela 10.

Tabela 10 - Permanência em dia por motivo de entrada

Motivo Entrada	N	Mean (dia)	StDev (dia)	Median (dia)
Geotecnologia	3	0,411	0,208	0,317
Manut. Corretiva	47	3,63	7,47	1,4
Manut. Preventiva	10	3,468	2,948	2,308
Oportunidade	3	4,69	2,74	5,77

Elaborado pelo autor (2026).

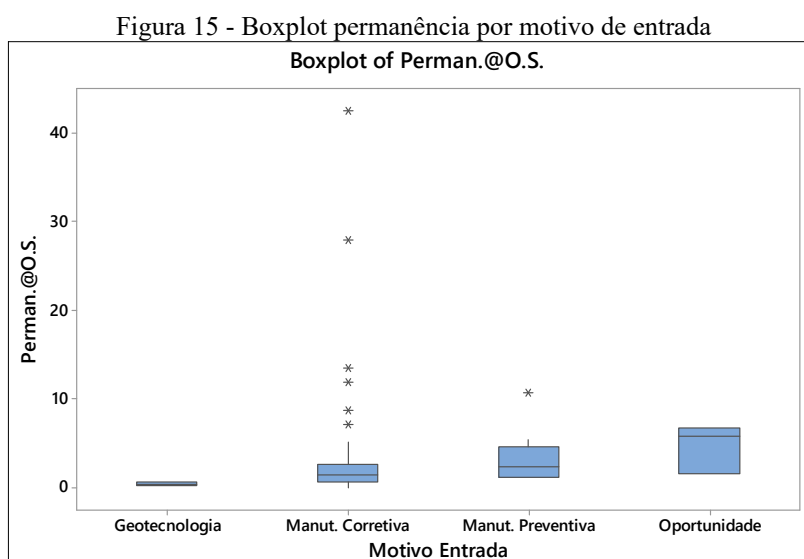
As análises permitem avaliar a tendência central e a dispersão dos tempos de indisponibilidade entre as diferentes categorias de serviço (Tabela 10). Em síntese, os resultados indicam que a elevada dispersão dos dados constitui um fator relevante para a interpretação dos resultados estatísticos, principalmente na categoria MC. A elevada variabilidade residual dos dados e a menor capacidade dos testes estatísticos de detectar diferenças entre as médias dos grupos estão associadas ao elevado DP. Essa característica é particularmente importante diante das variações nominais observadas entre MC, MP, Geotecnologia e Oportunidade.

A principal evidência apresentada na Tabela 10 é a predominância da MC, que representa a maior parte das intervenções analisadas ($N = 47$). Essa categoria apresentou relevância operacional e potencial impacto sobre a disponibilidade das colhedoras, com tempo médio de permanência de 3,63 dias. Entretanto, o principal aspecto observado não está no valor médio, mas na elevada variabilidade dos tempos de permanência da MC. A reduzida previsibilidade quanto à duração das intervenções corretivas está associada à elevada dispersão dos tempos de reparo, expressa por um DP de 7,47 dias.

Essa interpretação é reforçada pela diferença entre a média (3,63 dias) e a mediana (1,40 dia). A mediana indica que aproximadamente metade das ocorrências apresentou tempo de permanência igual ou inferior a 1,40 dia. Entretanto, algumas intervenções de maior duração contribuíram para aumentar significativamente a média observada. Esse comportamento sugere a ocorrência de intervenções corretivas com diferentes níveis de complexidade. Eventos de maior duração podem estar relacionados a falhas que exigem maior tempo de diagnóstico, disponibilidade de peças e componentes, recursos especializados ou procedimentos de reparo mais complexos. Entretanto, a confirmação dessas possíveis causas requer uma análise específica das intervenções com base nos registros das OS.

Em termos gerenciais, a elevada variabilidade dos tempos de MC representa um desafio para o planejamento da produção agrícola. A imprevisibilidade quanto ao retorno das

colhedoras à operação pode dificultar a programação das frentes de colheita. Além disso, pode impactar a alocação de equipamentos de reserva e o dimensionamento dos recursos necessários para o atendimento das intervenções. A análise da distribuição dos tempos de permanência torna-se então importante para complementar os indicadores de tendência central e dispersão. Logo, os boxplots da variável “Permanência”, em dias, em função dos motivos de entrada das colhedoras na manutenção são ilustrados pela Figura 15.



Elaborado pelo autor (2026).

A representação gráfica permite visualizar a distribuição dos dados, a amplitude dos valores, a dispersão dos grupos, a simetria das distribuições e a ocorrência de possíveis valores atípicos (outliers) entre as categorias analisadas (Figura 15). Há considerável heterogeneidade nos tempos de permanência em função dos diferentes motivos de entrada na manutenção, cuja elevada variabilidade reduz o poder discriminatório dos testes estatísticos e dificulta a identificação de diferenças entre as médias das OS. Esse comportamento é particularmente evidente pela maior amplitude de variação e pela concentração de outliers associados a eventos de longa duração na categoria MC.

Assim, observa-se nessa categoria aumenta a variabilidade residual do modelo estatístico, refletida pelo elevado DP. Essa condição amplia os intervalos de confiança e reduz a capacidade dos testes em detectar diferenças significativas entre os grupos, especialmente na MC. A presença de valores extremos evidencia a instabilidade dos processos de manutenção corretiva e a baixa previsibilidade dos tempos de reparo. Esse resultado corrobora as análises apresentadas anteriormente, nas quais as intervenções corretivas se destacaram pela elevada

dispersão dos tempos de permanência quando comparadas às demais categorias avaliadas, conforme demonstrado pela Tabela 11.

Tabela 11 - ANOVA do tempo de permanência por motivo de entrada

Source	DF	Adj SS (ln)	Adj MS (ln)	F-Value	P-Value
Motivo Entrada	3	12,83	4,278	1,97	0,128
Error	58	125,76	2,168		

Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados da ANOVA indicam que não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os tempos médios de permanência das colhedoras para os diferentes motivos de entrada na manutenção (Tabela 11). O teste apresentou valor-F = 1,97 e valor-p = 0,128. Não há, portanto, evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula, uma vez que o valor-p é superior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Dessa forma, para o conjunto de dados analisado, não foi possível confirmar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os tempos médios de permanência das categorias MC, MP, Geotecnologia e Oportunidade.

As estatísticas descritivas caracterizam os tempos de permanência e a dispersão entre as categorias, embora não tenham sido identificadas diferenças estatisticamente significativas pela ANOVA. Essa análise é particularmente relevante devido à elevada variabilidade e ao maior número de observações registrados na categoria MC. Nesse contexto, a Tabela 12 apresenta as estatísticas descritivas do tempo de permanência em função dos motivos de entrada das colhedoras na manutenção, incluindo o número de observações, as médias, os desvios-padrão e os respectivos intervalos de confiança de 95%.

Tabela 12 - Estatísticas descritivas do tempo de permanência por motivo de entrada

Motivo Entrada	N	Mean (ln)	StDev (ln)	CI 95%(ln)
Geotecnologia	3	-0,967	0,473	(-2,669; 0,734)
Manut. Corretiva	46	0,236	1,626	(-0,198; 0,671)
Manut. Preventiva	10	0,974	0,754	(0,042; 1,906)
Oportunidade	3	1,373	0,795	(-0,329; 3,075)

Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 12 apresenta o número de observações (N), a média, o desvio-padrão e o intervalo de confiança de 95% para os tempos de permanência após a transformação para a escala logarítmica natural (ln). A análise descritiva complementa os resultados ao distinguir diferenças numéricas de diferenças com evidência estatística na ANOVA. A análise evidencia

diferenças na distribuição dos dados entre os motivos de entrada, especialmente em relação à variabilidade observada na MC.

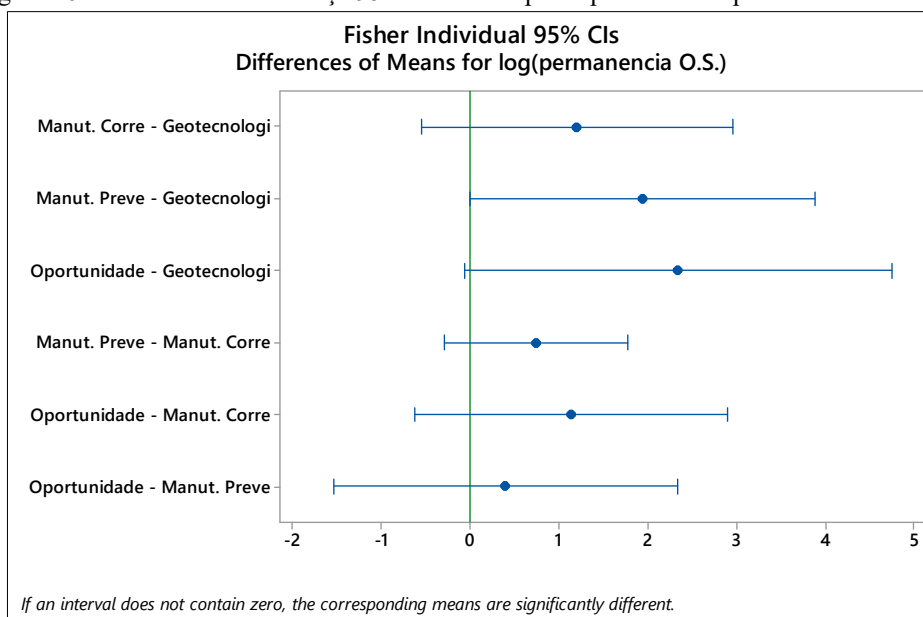
A categoria MC apresenta a maior representatividade amostral ($N = 46$), com média de 0,236 e DP de 1,626 na escala ln. A elevada magnitude do DP em relação à média evidencia a ampla dispersão dos tempos de permanência observada na categoria MC. Essa variabilidade indica que as intervenções corretivas apresentam comportamentos distintos quanto à duração dos reparos, incluindo ocorrências de maior duração que ampliam a dispersão observada na MC. A variabilidade presente nos registros analisados é evidenciada pela amplitude do IC de 95% para a média, compreendido entre -0,198 e 0,671.

A MP ($N = 10$) apresentou média de 0,974 e DP de 0,754 na escala ln. A dispersão relativa dos dados é menor quando comparada à MC. Entretanto, o número reduzido de observações limita a precisão da estimativa em comparação com a categoria MC. A variabilidade presente nos registros analisados é evidenciada pela amplitude do IC de 95% para a média, compreendido entre -0,198 e 0,671.

As categorias Geotecnologia e Oportunidade apresentam IC amplos, indicando maior incerteza nas estimativas das médias em razão do reduzido número de observações em cada categoria ($N = 3$). Na categoria Geotecnologia, a média foi de -0,967, com IC entre -2,669 e 0,734. Para a categoria Oportunidade, a média foi de 1,373, com intervalo de confiança entre -0,329 e 3,075. A interpretação desses resultados requer cautela devido ao reduzido número de observações ($N = 3$).

A análise evidencia elevada incerteza nas estimativas dos tempos médios de permanência, refletida nos ICs. Essa condição está associada à elevada dispersão observada na MC e ao reduzido número de observações das categorias Geotecnologia e Oportunidade. Entretanto, a avaliação da significância estatística deve ser fundamentada no resultado da ANOVA e nas comparações múltiplas, e não apenas na sobreposição visual dos ICs. Também não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os motivos de entrada, o valor-p da ANOVA foi 0,128, superior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), conforme apresentado na Tabela 11. Logo, os IC de 95% das comparações múltiplas pelo método de Fisher para os tempos de permanência das ordens de serviço em função dos motivos de entrada são apresentados pela Figura 16.

Figura 16 - Intervalos de confiança 95% Fisher tempo de permanência por motivo de entrada



Elaborado pelo autor (2026).

A análise dos ICs de 95% para as diferenças entre as médias do logaritmo natural do tempo de permanência não identificou diferenças estatisticamente significativas entre as categorias analisadas (Figura 16). A amplitude desses ICs, que incluem o valor zero, está associada à dispersão dos dados e ao reduzido tamanho de algumas amostras, exigindo cautela na interpretação dos resultados das categorias MC, Geotecnologia e Oportunidade. Assim sendo, apesar das diferenças numéricas observadas entre as médias, não existem evidências estatísticas suficientes para afirmar que os tempos médios de permanência sejam diferentes entre essas categorias, considerando o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Esse mesmo comportamento é observado nas comparações entre Manutenção Preventiva e Manutenção Corretiva, Oportunidade e Manutenção Corretiva e Oportunidade e Manutenção Preventiva. Em todas essas comparações, os respectivos IC de 95% incluem o valor zero, indicando que as diferenças estimadas entre as médias não são estatisticamente significativas ao nível de 5%. Esse resultado é consistente com a ANOVA apresentada na Tabela 11, na qual foi obtido valor-p igual a 0,128, superior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Portanto, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que os motivos de entrada influenciam significativamente o tempo médio de permanência das colhedoras em manutenção, conforme indicado pelas comparações múltiplas de Fisher e pela ANOVA.

Embora não tenham sido identificadas diferenças estatisticamente significativas, as categorias apresentaram diferenças numéricas nas médias dos tempos de permanência na escala logarítmica, variando de $-3,069$ a $-2,596$. A categoria Oportunidade apresentou a maior média ($1,373$), seguida pela MP ($0,974$), MC ($0,236$) e Geotecnologia ($-0,967$). Entretanto, essas diferenças devem ser interpretadas com cautela, uma vez que os intervalos de confiança são amplos, especialmente para as categorias Geotecnologia e Oportunidade, ambas com apenas três observações ($N = 3$). As diferenças observadas entre os motivos de entrada referem-se principalmente aos valores descritivos das médias e medidas de dispersão, evidenciados pelos respectivos ICs. Entretanto, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as categorias MC, MP, Geotecnologia e Oportunidade. A amplitude dos intervalos de confiança e a limitada capacidade de detectar diferenças entre os grupos estão associadas à elevada variabilidade dos dados e ao reduzido número de observações em algumas categorias, particularmente na MC.

4.3 Ações para redução o tempo de parada

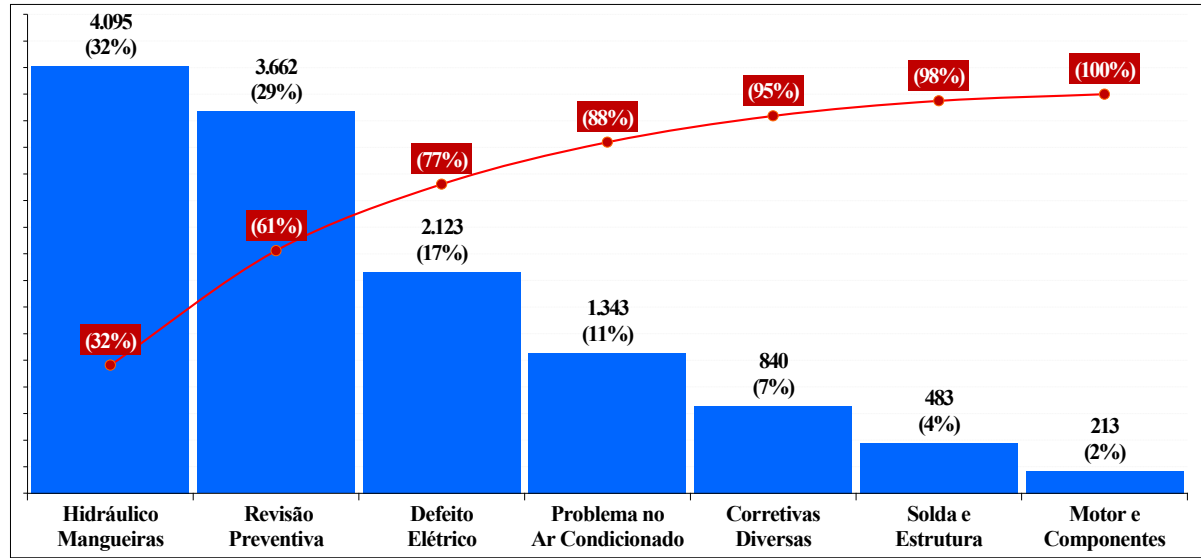
Esta seção apresenta as ações para a redução do tempo de parada para manutenção na usina localizada na região noroeste do estado de São Paulo. A partir da análise dos dados realizadas e, para organizar a resolução de problemas de maneira sistemática e fundamentada em dados, foi utilizado a metodologia de melhoria contínua *Plan, Do, Check, Act* (PDCA). Algumas imagens de ocorrências frequentes são apresentadas pela Figura 17. Na sequência, os projetos para a definição de ações foram definidos pelo método de Pareto ilustrado pela Figura 18.

Figura 17 - Ocorrências de hidráulica



Elaborado pelo autor (2026).

Figura 18 - Maiores tempo acumulado de manutenção safra 2024



Elaborado pelo autor (2026).

A distribuição das principais ocorrências de manutenção evidencia que as falhas no sistema hidráulico e nas mangueiras constituem a principal causa de indisponibilidade da frota (Figura 18). A análise histórica das OS da última safra identificou 4.095 horas de máquina parada associadas à categoria “Hidráulico/Mangueiras”. Logo, o principal fator associado ao tempo de indisponibilidade e à priorização das ações de investigação e intervenção é a categoria “Hidráulico/Mangueiras”.

A identificação da principal categoria responsável pelo tempo de parada direcionou a investigação dos fatores associados à frequência e à recorrência das falhas e subsidiou a priorização de recursos e ações de melhoria (Figura 18). A necessidade de estabelecer uma sequência lógica entre o problema observado e suas causas potenciais (análise de causa-raiz) levou à aplicação da técnica dos 5 Porquês. Esse problema foi definido como: “Frequentes manutenções no sistema hidráulico e em mangueiras das colhedoras”. A técnica estruturou a relação entre o efeito observado e os fatores associados à sua ocorrência e recorrência conforme apresentado no Quadro 3.

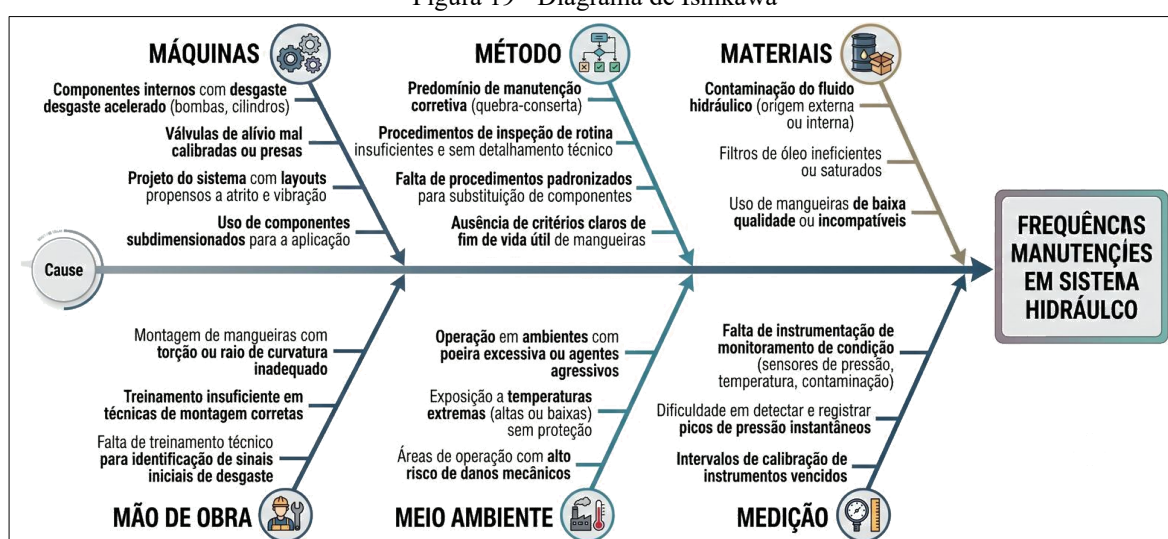
Quadro 03 - Análise pelos 5 porquês

Porquês	Proposição	Resposta
1º	Por que o tempo médio de reparo e inatividade é elevado?	Devido à ocorrência de rupturas catastróficas durante o ciclo de colheita.
2º	Por que os componentes atingem o estado de falha funcional inesperadamente?	Porque os ativos são operados até o limite da vida útil, sem indicadores de degradação.
3º	Por que inexistente um cronograma de substituição preventiva ou preditiva?	Devido à ausência de monitoramento da vida útil baseado em horas de operação ou ciclos.
4º	Por que a vida útil dos componentes críticos não é monitorada?	Pela inexistência de uma sistemática de inspeção e registro técnico de horas de uso no ERP.
5º	Por que a manutenção permanece em estágio reativo e não proativo?	Devido à cultura organizacional centrada na correção de falhas em detrimento da confiabilidade.

Elaborado pelo autor (2026).

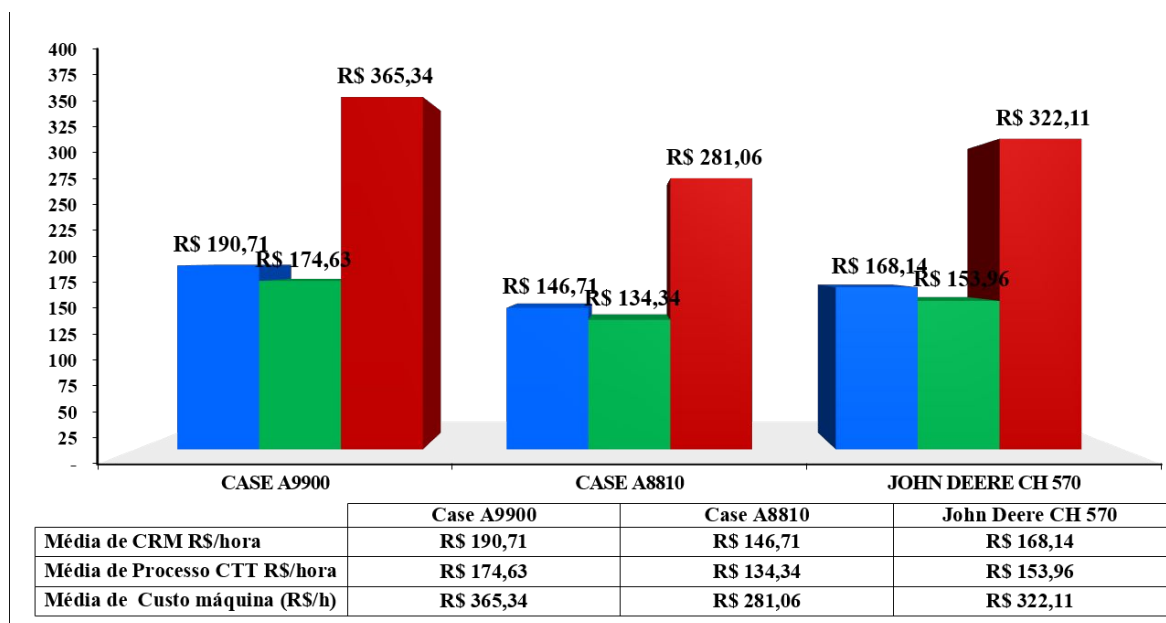
A ausência de investimento sistemático na coleta e análise de dados para antecipação de falhas mantém a cultura de manutenção orientada à disponibilidade imediata da máquina e à prática de “apagar incêndios”. Para expandir a perspectiva, elaborou-se um Diagrama de Ishikawa, conforme ilustrado na Figura 19. A aplicação dessa técnica possibilitou classificar as causas potenciais em categorias como Máquina (vibração), Método (inspeção insuficiente) e Mão de Obra (instalação inadequada). Na sequência foi realizada uma análise financeira para mensurar o impacto dessas ocorrências com base no custo médio por hora de operação de cada modelo de colhedora apresentado na Figura 20.

Figura 19 - Diagrama de Ishikawa



Elaborado pelo autor (2026).

Figura 20 - Custo médio por hora de operação por modelo



Elaborado pelo autor (2026).

A etapa de planejamento consolidou-se na elaboração de um plano de ação com a meta específica de reduzir em 20% (819 horas) o tempo de manutenção por falhas hidráulicas até o final do primeiro semestre de 2026. A tradução desse impacto técnico em termos financeiros foi realizada com base nos custos médios de operação de cada modelo apresentados na Figura 20. Logo, se o custo por hora para a colhedora inoperante é de R\$ 323,75, o tempo de parada gerado pelas falhas no sistema hidráulico e nas mangueiras resultou em custo total acumulado de R\$ 1.325.756,00. A meta de redução (20%) foi estruturada em três frentes principais e reflete uma economia estimada em R\$ 265.151,25: i) *Treinamentos* – capacitar a equipe mecânica para identificar trincas ressecamentos e bolhas; ii) *Checklists* – inserir uma lista de verificação diária para identificação precoce de desgaste no sistema hidráulico; iii) *Desenvolvimento de Procedimentos Operacionais Padrão (POPs)* – documentar o procedimento de instalação das mangueiras com imagens e orientações sobre torque e prevenção de torções.

A conclusão da implementação dessas medidas foi outubro de 2025 e seguiu para a etapa de verificação (Check). A eficácia do plano foi avaliada pela comparação dos novos registros de cada modelo de colhedora com o cenário-base a partir dos dados das OS: i) redução do tempo médio de parada por falhas hidráulicas; ii) redução do consumo de óleo hidráulico; iii) redução da frequência de falhas corretivas com paradas não planejadas por rompimento de mangueiras.

Um dos pilares do plano de ação consiste na capacitação técnica da equipe de manutenção para a correta montagem, o manuseio e a inspeção das mangueiras hidráulicas em

parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI). Esse programa desenvolve competências em instalação e manutenção de sistemas hidráulicos para reduzir falhas prematuras e a contaminação do sistema conforme a padronização apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Padronização das mangueiras e componentes hidráulicos



Elaborado pelo autor (2026).

A estratégia empregada busca reduzir falhas associadas à montagem inadequada, à incompatibilidade entre componentes e à contaminação do circuito hidráulico (Figura 21). Essa padronização junto com a instalação de protetores espirais de alta resistência e a otimização do trajeto das linhas hidráulicas aumentou a confiabilidade operacional dos equipamentos e melhorar a eficiência das atividades de manutenção (Figura 21). Este novo arranjo das mangueiras evita o atrito entre os componentes e a estrutura da colhedora e elimina um dos principais fatores de falhas prematuras durante a operação. A sala de hidráulica e o sistema de controle de componentes utilizados nas atividades de manutenção das colhedoras são apresentados pela Figura 22.

Figura 22 - Sala de hidráulica e controle de componentes



Elaborado pelo autor (2026).

Este ambiente padroniza os processos de inspeção, armazenamento e rastreabilidade dos componentes hidráulicos de forma a aumentar o controle operacional e reduzir falhas decorrentes de manuseio inadequado ou contaminação (Figura 22). A contaminação foi identificada como uma das principais causas de falhas recorrentes. Por isso, a montagem de mangueiras foi transferida para um ambiente mais controlado, limpo e dedicado exclusivamente à prensagem e ao manuseio de componentes hidráulicos. Essa estrutura isola um processo sensível das fontes de contaminação, como poeira, resíduos de soldagem e detritos, e aumenta a confiabilidade do sistema hidráulico.

As melhorias implementadas integram um conjunto de ações fundamentadas nos fatores relevantes para os tempos de parada e os custos de manutenção das colhedoras identificadas pela ANOVA. As análises dos resultados indicam que as variáveis mais importantes para a compreensão da dinâmica dos reparos e dos custos de manutenção são: i) o modelo da máquina; ii) o tipo de manutenção; e iii) a seção de trabalho. Portanto, este estudo fornece subsídios e direciona esforços gerenciais para a transição de uma gestão predominantemente reativa para uma abordagem mais proativa, sistemática e orientada pelos dados registrados no ERP.

As análises também indicaram que a estratégia de aquisição dos ativos está associada aos custos operacionais e à variabilidade dos tempos de reparo. As colhedoras John Deere CH570 apresentaram o maior custo médio de manutenção por safra, estimado em R\$ 468.425,00. Esse comportamento está associado à aquisição dos equipamentos em lotes menores ao longo do tempo, o que dificulta a padronização de componentes, a gestão de

estoques e a consolidação da experiência da equipe técnica. Em contrapartida, a maior uniformidade dos custos favoreceu o planejamento preventivo e a gestão de peças de reposição nas colhedoras Case.

Essa constatação é relevante para a elaboração de planos de manutenção específicos e para subsidiar futuras decisões de renovação e padronização da frota considerando as diferenças entre Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. Um outro resultado de destaque refere-se à elevada variabilidade e à baixa previsibilidade operacional observadas na MC. Em contraste, maior estabilidade e potencial de controle estatístico foram observados na MP. A elevada dispersão dos dados dificultou a identificação de diferenças estatisticamente significativas e evidenciou o caráter estocástico das falhas associadas à MC.

A análise de Pareto identificou as falhas no sistema hidráulico e nas mangueiras como o principal fator de indisponibilidade das colhedoras (4.095 horas). Com base nesse diagnóstico, foi estruturado um projeto-piloto voltado à eliminação das causas-raiz identificadas e fundamentado no ciclo PDCA. As ações voltadas à redução das fontes de variabilidade e contaminação do sistema hidráulico foram executadas na etapa “Do”. As principais iniciativas implementadas foram a capacitação da equipe técnica, a padronização de componentes, a rastreabilidade dos materiais e a criação da Sala de Agregado Hidráulico.

A principal recomendação é a continuidade da implementação de planos de manutenção específicos para as colhedoras Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. A adoção de um programa preventivo mais rigoroso, com ampliação da frequência das inspeções e monitoramento sistemático dos componentes críticos, mostra-se justificável no caso das colhedoras John Deere CH570. Isso implica em direcionar foco gerencial da correção para a prevenção estratégica das falhas e o fortalecimento das práticas de MD e MP.

A sustentabilidade dessas melhorias depende diretamente da qualidade dos dados registrados no sistema ERP. Nesse contexto, o treinamento contínuo das equipes é fundamental para a correta identificação das causas das falhas e para o preenchimento adequado das OS. O acompanhamento dos indicadores de desempenho também permitirá identificar novas oportunidades de melhoria e sustentar o processo de aperfeiçoamento contínuo da gestão da manutenção na unidade de São José do Rio Preto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo de caso analisou estatisticamente os fatores associados aos tempos de parada para manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar em uma usina sucroalcooleira

localizada no interior do estado de São Paulo. Foco foi dado à análise dos custos de manutenção e dos tempos de permanência em manutenção das colhedoras Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. As análises visaram identificar fatores associados ao aumento da disponibilidade física das colhedoras e à redução das perdas operacionais decorrentes de intervenções de MC. A coleta de dados foi realizada a partir das OS registradas no sistema ERP da empresa, referentes ao ano de 2024. Todos os registros foram organizados, saneados e padronizados para compor uma base estruturada para as análises estatísticas, incluindo técnicas de estatística descritiva e ANOVA. Para a análise dos tempos de permanência, os dados foram submetidos à transformação logarítmica na base natural ($\ln$). Essa transformação foi realizada para reduzir os efeitos da assimetria e atender às premissas necessárias à aplicação dos procedimentos estatísticos da ANOVA.

As análises dos resultados demonstraram diferenças no comportamento dos custos de manutenção entre as colhedoras Case A8810, Case A9900 e John Deere CH570. A ANOVA identificou diferença estatisticamente significativa entre os modelos para a variável Valor Total ($p = 0,003$). O modelo John Deere CH570 apresentou o maior custo médio de manutenção por safra, estimado em aproximadamente R\$ 468.101, enquanto os modelos Case apresentaram custos médios inferiores. As comparações múltiplas de Fisher confirmaram que o custo médio do modelo John Deere CH570 foi significativamente superior aos modelos Case A8810 e Case A9900, não sendo identificada diferença estatisticamente significativa entre os dois modelos Case. A análise gráfica, por meio dos *boxplots*, também evidenciou diferenças na distribuição dos custos e a presença de valores atípicos, especialmente nas categorias MC e Oportunidade. Entretanto, diferenças de média e dispersão, isoladamente, não permitem estabelecer superioridade operacional entre os modelos John Deere CH570, Case A8810 e Case A9900.

A análise dos motivos de entrada evidenciou a predominância da MC. A elevada variabilidade dos tempos de permanência observada nessa categoria reflete a natureza não planejada e a menor previsibilidade da MC. Em contrapartida, a menor variabilidade dos tempos observados e a maior concentração das intervenções em torno do comportamento central foram verificadas na MP. Entretanto, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os tempos de permanência dos modelos analisados ($p = 0,491$). Também não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os motivos de entrada em manutenção ($p = 0,128$). A antecipação de atividades de manutenção durante períodos de parada ou indisponibilidade operacional caracteriza as intervenções classificadas como Oportunidade. Apesar de apresentar a maior média do valor total de

manutenção, o reduzido número de observações limita a generalização dos resultados da categoria Oportunidade. A análise temporal dos registros indicou que o período de maior atenção ao planejamento das intervenções, à disponibilidade de peças e à alocação das equipes de manutenção ocorreu entre julho e setembro de 2024.

A investigação dos principais ofensores de manutenção permitiu identificar uma das principais fontes de indisponibilidade da frota no sistema Hidráulico/Mangueiras. A categoria Hidráulico/Mangueiras representou impacto relevante sobre a disponibilidade operacional das colhedoras (≈ 4.095 horas). Logo, considerando o custo médio de operação no período analisado, o impacto financeiro estimado foi de aproximadamente R\$ 1,32 milhão. Esses resultados justificaram a priorização e análise de causa raiz para a categoria Hidráulico/Mangueiras. A análise qualitativa foi conduzida por meio do Diagrama de Ishikawa e da técnica dos 5 Porquês. A investigação permitiu organizar causas potenciais relacionadas às falhas hidráulicas, considerando aspectos associados ao Método, à Máquina e à Mão de Obra. Esse diagnóstico resultou em propostas voltadas à melhoria das práticas de manutenção. As principais iniciativas incluíram procedimentos operacionais padronizados, capacitação das equipes, inspeções sistemáticas e utilização de checklists para identificação antecipada de sinais de desgaste. A premissa de redução do tempo de parada associado às falhas hidráulicas foi de 20%. Essa redução resultou em um ganho de aproximadamente 819 horas produtivas e economia de R\$ 265.151,25 por safra.

Em termos gerenciais, os resultados demonstram que o aumento da disponibilidade das colhedoras depende tanto da redução das falhas quanto do uso adequado das informações de manutenção. Nesse sentido, a identificação dos modos de falha, a análise dos custos, a avaliação dos tempos de parada e o processo de tomada de decisão dependem da qualidade das OS. Assim sendo, é fundamental o aprimoramento do processo de abertura, classificação e encerramento das OS. A utilização de campos obrigatórios, listas padronizadas e procedimentos de validação pode reduzir inconsistências e aumentar a confiabilidade das informações armazenadas no sistema ERP. Também se recomenda a capacitação contínua das equipes e a realização periódica de auditorias para garantir a qualidade dos dados das OS. Essas auditorias devem verificar a coerência entre o problema relatado, a classificação da intervenção, a causa identificada, o serviço executado e os tempos registrados das OS.

A principal contribuição prática deste estudo está na identificação dos fatores que influenciam os custos, os tempos de manutenção e os principais ofensores da indisponibilidade das colhedoras na usina do interior de São Paulo. Uma importante contribuição para a literatura consiste na ampliação das discussões sobre análise estatística,

confiabilidade e gestão de ativos aplicadas a equipamentos agrícolas no Brasil. Além disso, a integração de dados, análise estatística, ferramentas da qualidade e conhecimento operacional fortalece a tomada de decisão em manutenção por meio da gestão estruturada das OS e das informações registradas no ERP. Entre as limitações do estudo, destacam-se a utilização de dados provenientes de uma única unidade operacional e o número reduzido de observações nas categorias Geotecnologia e Oportunidade. Além disso, a elevada variabilidade observada em alguns grupos ampliou os intervalos de confiança e reduziu o poder discriminatório de alguns procedimentos estatísticos da ANOVA. As sugestões para estudos futuros incluem: i) consolidação de bases históricas confiáveis; ii) padronização e qualidade dos registros das OS; iii) mecanismos de controle da qualidade dos dados; iv) estudos de confiabilidade de sistemas hidráulicos e mangueiras; v) padronização da classificação de equipamentos, falhas e intervenções; vi) transição da manutenção corretiva para abordagens preventivas e preditivas; vii) aplicação de aprendizado de máquina e inteligência artificial na previsão de falhas; viii) integração de indicadores de manutenção com sistemas de monitoramento em tempo real. Essas questões estabelecem uma base para a transição de uma gestão predominantemente reativa para uma gestão orientada por dados, com potencial para ampliar a disponibilidade, a confiabilidade e a eficiência operacional das colhedoras de cana-de-açúcar no Brasil.

REFERÊNCIAS

- AFSHARNIA, F.; MARZBAN, A.; ASOODAR, M.; ABDESHAHI, A. Preventive maintenance optimization of sugarcane harvester machine based on FT-Bayesian network reliability. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 38, n. 3, p. 722-750, 2021. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2020-0015>.
- ALSYOUF, I. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 1, p. 212-223, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.006>.
- ABEDINI, R.; GHASEMI-NEJAD-RAEINI, M.; MARZBAN, A.; RAHNAMA, M. Performance comparison between workshop-based and laboratory-based condition monitoring systems for operational and economic performances of sugarcane harvesting. **Results in Engineering**, v. 24, p. 103672, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103672>
- ANDRADE JUNIOR, A. S. de; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; SILVA, E. M. P. da. Produtividade de colmos de cultivares de cana-de-açúcar sob irrigação pivô central em União, microrregião de Teresina, PI. In: **Comunicado Técnico Embrapa Meio-Norte**, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1097203>.
- AYAGI, H. I.; WAN, Z.; YUSUF, İ.; SANUSI, A. Performance estimation of parallel systems under online and offline preventive maintenance. **Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences**, v. 42, n. 4, p. 1088-1100, 2024. <https://doi.org/10.14744/sigma.2024.00090>.
- BACCARIN, H. A.; OLIVEIRA, J. P.; MARDEGAN, R. As técnicas de gestão da manutenção desempenham um papel fundamental na otimização dos processos produtivos. **Revista de Gestão e Produção**, v. 27, n. 3, p. 123-135, 2020.
- BARBOSA, F. C. S.; ANDRADE, P. C. R. Análise de falhas em equipamentos e a importância do planejamento da manutenção: uma aplicação em uma usina sucroalcooleira. **Revista Científica do IFMG**, Formiga, v. 7, n. 2, e00638, 2019. <https://doi.org/10.29069/forscience.2019v7n2.e638>.
- BOKRANTZ, J.; SKOOGH, A.; BERLIN, C.; WUEST, T.; STAHR, J. Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization. **International Journal of Production Economics**, v. 223, p. 107534, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107534>.
- BUCAIY-VALDIVIEZO, J.; ESCUDERO-VILLA, P.; PAREDES-FIERRO, J.; AYALA-CHAUVIN, M. Leveraging classical statistical methods for sustainable maintenance in automotive assembly equipment. **Sustainability**, v. 15, n. 21, p. 15604, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115604>

BELLUZO, R. C. B.; SANTOS, C. A.; ALMEIDA JÚNIOR, O. F. A competência em informação e sua avaliação sob a ótica da mediação da informação: reflexões e aproximações teóricas. 2014. Disponível

em: <https://www.labirintodosaber.com.br/wp-content/uploads/2018/11/coinfo-regina-belluzzo-et-al-2014.pdf>.

CEZARINO, L. O.; LIBONI, L. Social and environmental impacts of the sugarcane industry. **Future Research Journal: Trends and Strategies**, v. 4, n. 1, p. 202-230, 2012. <https://doi.org/10.24023/FutureJournal/2175-5825/2012.v4i1.101>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Produção de cana-de-açúcar na safra 2025/26 é atualizada para 668,8 milhões de toneladas. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2025-26-e-atualizada-para-668-8-milhoes-de-toneladas>

DA SILVA, E. T.; ACHCAR, J. A.; PIRATELLI, C. L. Strategic formulation of industrial maintenance based on equipment reliability in a sugar and ethanol production plant. **Independent Journal of Management & Production**, v. 11, n. 7, p. 2592-2612, 2020. <http://orcid.org/0000-0002-9868-9453>.

DADASHNEJAD, A.-A.; VALMOHAMMADI, C. Investigating the effect of value stream mapping on operational losses: a Case study. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 16, n. 3, p. 478-500, 2018. <https://doi.org/10.1108/JEDT-11-2017-0123>.

DE JONGE, B.; SCARF, P. A. A review on maintenance optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 285, n. 3, p. 805-824, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.047>.

DIAS NETO, A. F.; ALBIERO, D.; ROSSETTO, R.; BIAGI, J. D. Modeling of mechanized sugarcane harvesting to support decision-making on asset management. **Sugar Tech**, v. 24, n. 3, p. 798-812, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01126-2>.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; MARCLIM, W. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.

EINABADI, B.; MAHMOODJANLOO, M.; BABOLI, A.; ROTHER, E. Dynamic predictive and preventive maintenance planning with failure risk and opportunistic grouping considerations: A Case study in the automotive industry. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 69, p. 292-310, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.06.012>.

FISCH, C.; BLOCK, J. Six tips for your (systematic) literature review in business and management research. **Review of Management Quarterly**, v. 68, n. 1, p. 103-106, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11301-018-0142-x>.

FISHER, R. A. Statistical Methods for Research Workers. In: KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. (eds.). **Breakthroughs in Statistics**. New York: Springer, 1992. (Springer Series in Statistics). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_6.

FLORENTINO, H. O.; PATO, M. V. Bi-objective genetic approach for selecting sugarcane varieties. **Journal of the Operational Research Society**, v. 65, n. 6, p. 842-854, 2014. <https://doi.org/10.1057/jors.2013.21>.

FLORENTINO, H. O.; PATO, M. V.; JONES, D.; CANTANE, D. R. Production and Management of Sugarcane Biomass Process Optimization. In: **Biomass production and uses**. London: IntechOpen, 2015. <https://doi.org/10.5772/61533>.

HAEGEMAN, K.; MARINELLI, E.; SCAPOLO, F.; RICCI, A.; SOKOLOV, A. Quantitative and qualitative approaches in future-oriented technology analysis (FTA): from combination to integration? **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 3, p. 386-397, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.002>

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Maintenance: Strategic function**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2015.

JUNQUEIRA, R. D. Á. R.; MORABITO, R. Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 213, p. 150-160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.009>.

LIM, Weng Marc. What is qualitative research? An overview and guidelines. **Australasian Marketing Journal**, v. 33, n. 2, p. 199-229, 2025. <https://doi.org/10.1177/14413582241264619>.

LIM, W. M.; KUMAR, S.; ALI, F. Advancing knowledge through literature reviews: ‘what’, ‘why’ and ‘how to contribute’. **The Service Industries Journal**, v. 42, n. 7-8, p. 481-513, 2022. <https://doi.org/10.1080/02642069.2022.2047941>

LÓPEZ-MILÁN, E.; PLÀ-ARAGONÉS, L. M. A decision support system to manage the supply chain of sugar cane. **Annals of Operations Research**, v. 219, n. 1, p. 285-297, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1361-0>.

MATOVIĆ, N.; OVESNI, K. Interaction of quantitative and qualitative methodology in mixed methods research: Integration and/or combination. **International Journal of Social Research Methodology**, v. 26, n. 1, p. 51-65, 2023. <https://doi.org/10.1080/13645579.2021.1964857>.

MOLENAERS, A.; BAETS, H.; PINTELON, L.; WAEYENBERGH, G. Criticality classification of spare parts: a case study. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 2, p. 570-578, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.013>

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. Hoboken: J. Wiley & Sons, 2017.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

OLIVEIRA, M. A. Estratégias de manutenção preventiva e corretiva em equipamentos agrícolas. **Revista Brasileira de Tecnologia Agrícola**, v. 10, n. 3, p. 123-136, 2022. <https://doi.org/10.52138/citec.v15i1.278>.

OHUE, M.; SASAYAMA, K.; TAKATA, M. Mathematical modeling and problem solving: from fundamentals to applications. **The Journal of Supercomputing**, v. 80, p. 14116-14119, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06007-x>.

ORTIZ, P. A. S.; FLÓREZ-ORREGO, D.; MARIANO, A. P.; KAFAROV, V.; OLIVEIRA JUNIOR, S. de; MACIEL FILHO, R. Exergy and economic assessment of renewable electricity generation from sugarcane straw for improved efficiency of sugarcane biorefineries. **International Journal of Exergy**, v. 38, n. 2, p. 218-237, 2022. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2022.123606>

PAVAN, M. C. O.; RAMOS, D. S.; SOARES, M. Y.; CARVALHO, M. M. Circular business models for bioelectricity: A value perspective for sugar-energy sector in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, p. 127615, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127615>.

PÉREZ-PERALES, David; BOZA, Andrés; ALARCÓN, Faustino; GÓMEZ-GASQUET, Pedro. Mathematical programming-based methodology for the evaluation of supply chain collaborative planning scenarios. **Annals of Operations Research**, v. 337, p. 261-312, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05917-6>

SANTOS, L. F. Benefícios da manutenção preventiva em usinas de cana-de-açúcar. **Revista de Gestão e Produção**, v. 8, n. 1, p. 78-91, 2021. <https://doi.org/10.29069/forscience.2019v7n2.e638>.

SILVA, R. T. Estudo de caso: manutenção em colhedoras de cana-de-açúcar. Universidade Federal de Uberlândia, 2023. <https://doi.org/10.52138/citec.v15i1.278>.

SAMPAIO, I. L. M.; CARDOSO, T. F.; SOUZA, N. R. D.; WATANABE, M. D. B.; CARVALHO, D. J.; BONOMI, A.; JUNQUEIRA, T. L. Electricity production from sugarcane straw recovered through bale system: Assessment of retrofit projects. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 865-877, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10014-9>.

SAMANTA, D.; ISLAM, S. K. H.; CHILAMKURTI, N.; HAMMOUDEH, M., eds. **Data analytics, computational statistics, and operations research for engineers: Methodologies and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003152392>.

SHARMA, G.; TEWARI, P. C. Performance modeling and assessment of maintenance priorities for steam generation unit of a sugar plant. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 36, n. 2, p. 286-296, 2019. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2017-0190>.

SHEIKH, S.; JAIN, M.; TAPRE, P. A technique for determining the prices of steam and electricity generated in the sugar cogeneration industry. **Sigma**, v. 43, n. 2, p. 635-646, 2025. <https://doi.org/10.14744/sigma.2025.00050>.

SHI, Liangxing; LV, Xiaolei; HE, Yingdong; HE, Zhen. Optimising production, maintenance, and quality control for imperfect manufacturing systems considering timely replenishment. **International Journal of Production Research**, v. 62, n. 10, p. 3504-3525, 2024. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2241563>.

ZHOU, K.; NI, Z.; YIN, Y.; YANG, B.; LI, T.; HOU, J. Study of the strategy for agricultural machinery maintenance in China based on the improved genetic-bee colony algorithm. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 14, n. 3, p. 2275-2289, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04485-6>.

ZHANG, W. *et al.* Harvester Maintenance Resource Scheduling Optimization, Based on the Combine Harvester Operation and Maintenance Platform. **Agriculture**, v. 12, n. 9, artigo 1433, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091433>.

WATSON, R. T.; WEBSTER, J. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review roadmap for version 2.0. **Journal of Decision Systems**, v. 29, n. 3, p. 129-147, 2020. <https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1798591>.

WANG, Y.; ZHAO, M.; CHEN, T.; LIU, Y. Maintenance Skill Training Gives Agricultural Socialized Service Providers More Advantages. **Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 135, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010135>.

YUSUF, İ.; GATAWA, R. I.; ISA, M. S. Synergistic integration of RAM methodology for augmenting reliability and efficiency in solar irrigation systems: a comprehensive study for sustainable rural farming. **Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences**, v. 42, n. 6, p. 1763-1779, 2024. <https://doi.org/10.14744/sigma.2024.00138>

APÊNDICE A – Dados de Valor Total e Motivo de Entrada

Row	Modelo	Data Entrada	Motivo Entrada	Valor Total (R\$)
1	Case 8810	27/04/2024	Geotecnologia	202.836,00
2	Case A8810	28/04/2024	Manutenção Corretiva	202.836,00
3	Case A8810	29/04/2024	Manutenção Corretiva	202.836,00
4	Case A8810	29/04/2024	Manutenção Preventiva	202.836,00
5	John Deere CH570	09/12/2024	Manutenção Corretiva	109.786,00
6	Case A8810	05/07/2024	Manutenção Corretiva	363.619,00
7	Case A8810	17/07/2024	Manutenção Preventiva	363.619,00
8	Case A8810	19/07/2024	Geotecnologia	363.619,00
9	Case A8810	26/07/2024	Manutenção Preventiva	363.619,00
10	Case A9900	03/11/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
11	Case A9900	13/04/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
12	Case A9900	17/06/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
13	Case A9900	21/06/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
14	Case A9900	07/01/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
15	Case A9900	07/02/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
16	Case A9900	07/04/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
17	Case A9900	07/04/2024	Manutenção Preventiva	293.113,00
18	Case A9900	19/07/2024	Geotecnologia	293.113,00
19	Case A9900	31/08/2024	Manutenção Corretiva	293.113,00
20	Case A9900	07/01/2024	Manutenção Corretiva	256.037,00
21	Case A9900	09/02/2024	Manutenção Corretiva	256.037,00
22	Case A9900	09/03/2024	Manutenção Corretiva	256.037,00
23	Case A9900	25/10/2024	Manutenção Corretiva	256.037,00
24	Case A9900	16/08/2024	Manutenção Corretiva	443.643,00
25	Case A9900	21/06/2024	Manutenção Corretiva	431.721,00
26	John Deere CH570	07/04/2024	Manutenção Corretiva	723.976,00
27	John Deere CH570	07/05/2024	Manutenção Corretiva	723.976,00
28	John Deere CH570	07/09/2024	Manutenção Corretiva	723.976,00
29	John Deere CH570	07/10/2024	Oportunidade	723.976,00
30	John Deere CH570	07/10/2024	Oportunidade	723.976,00
31	John Deere CH570	07/12/2024	Manutenção Corretiva	723.976,00
32	John Deere CH570	13/07/2024	Manutenção Corretiva	723.976,00
33	John Deere CH570	16/08/2024	Manutenção Corretiva	723.976,00
34	Case A8810	30/05/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
35	Case A8810	19/06/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
36	Case A8810	23/06/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
37	Case A8810	26/06/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
38	Case A8810	24/08/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
39	Case A8810	27/08/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
40	Case A8810	09/01/2024	Manutenção Corretiva	438.013,00
41	John Deere CH570	06/08/2024	Manutenção Corretiva	178.506,00
42	John Deere CH570	29/06/2024	Manutenção Preventiva	468.425,00
43	John Deere CH570	07/02/2024	Oportunidade	468.425,00
44	John Deere CH570	07/05/2024	Manutenção Corretiva	468.425,00
45	John Deere CH570	07/05/2024	Manutenção Preventiva	468.425,00
46	John Deere CH570	07/06/2024	Manutenção Corretiva	468.425,00
47	John Deere CH570	30/08/2024	Manutenção Preventiva	468.425,00
48	John Deere CH570	09/01/2024	Manutenção Corretiva	468.425,00
49	John Deere CH570	20/06/2024	Manutenção Preventiva	535.817,00
50	John Deere CH570	21/06/2024	Manutenção Corretiva	535.817,00
51	John Deere CH570	25/06/2024	Manutenção Corretiva	535.817,00
52	John Deere CH570	11/11/2024	Manutenção Corretiva	535.817,00
53	John Deere CH570	30/03/2024	Manutenção Preventiva	123.294,00
54	John Deere CH570	04/05/2024	Manutenção Corretiva	123.294,00
55	John Deere CH570	04/05/2024	Manutenção Corretiva	123.294,00
56	John Deere CH570	13/04/2024	Manutenção Corretiva	123.294,00
57	John Deere CH570	07/07/2024	Manutenção Corretiva	564.572,00
58	John Deere CH570	07/09/2024	Manutenção Corretiva	564.572,00
59	John Deere CH570	07/11/2024	Manutenção Corretiva	564.572,00
60	John Deere CH570	07/12/2024	Manutenção Corretiva	322.498,00
61	John Deere CH570	07/12/2024	Manutenção Corretiva	322.498,00
62	John Deere CH570	07/12/2024	Manutenção Preventiva	322.498,00
63	John Deere CH570	16/08/2024	Manutenção Corretiva	322.498,00