

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ERICK HENRIQUE ROMERO

**AVALIAÇÃO DO MOMENTO IDEAL PARA SUBSTITUIÇÃO DE COLHEDORAS
AUTOPROPELIDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Ilha Solteira - SP
2025



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ERICK HENRIQUE ROMERO

**AVALIAÇÃO DO MOMENTO IDEAL PARA SUBSTITUIÇÃO DE COLHEDORAS
AUTOPROPELIDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Ronaldo da Silva Viana
Orientador

Ilha Solteira - SP
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R763a Romero, Erick Henrique.
Avaliação do momento ideal para substituição de colhedoras autopropelidas de cana-de-açúcar / Erick Henrique Romero. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
47 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2025

Orientador: Ronaldo da Silva Viana

Inclui bibliografia

1. Análise multivariada. 2. Eficiência operacional. 3. Gestão de custos agrícolas. 4. Renovação de colhedoras. 5. Usina sucroalcooleira.



Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

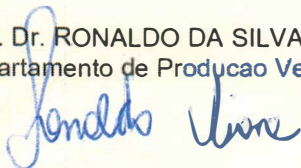
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do momento ideal para substituição de colhedoras autopropelidas de cana-de-açúcar

AUTOR: ERICK HENRIQUE ROMERO

ORIENTADOR: RONALDO DA SILVA VIANA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

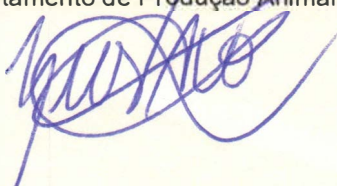
Prof. Dr. RONALDO DA SILVA VIANA (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Assoc. GUSTAVO DO VALLE POLYCARPO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Animal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP



Ilha Solteira, 07 de fevereiro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus que me deu o dom da Vida, à minha mãe Marli Martins Otalora aos avós maternos Izaura Martins Otalora “*In memoriam*” e Antônio Aparecido Garcia Otalora que me criaram e me ensinaram a ser uma pessoa cada dia melhor. À minha esposa Dayara Cristina Franco Romero e meus filhos Pedro Henrique Franco Romero e Helena Maria Franco Romero, que sempre acreditaram em meu potencial e me deram forças para não desistir quando parecia não ter mais condições de continuar.

Obrigado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e de ter me dado o livre arbítrio em escolher minha profissão, à Nossa Senhora Aparecida, padroeira do Brasil e protetora dos engenheiros agrônomos, e a São José, o protetor da sagrada família, que assim alimentam a minha fé e devoção.

Gostaria de agradecer aos meus familiares, em especial à minha esposa Dayara Cristina Franco Romero e aos filhos Pedro Henrique Franco Romero, meu primogênito, e Helena Maria Franco Romero, que por todo instante foram o combustível que me alimentou e me deram palavras de motivação e conforto, bem como tempo, para que eu conseguisse chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ronaldo da Silva Viana, que aceitou o projeto de pesquisa e continuou com minha orientação, pela empatia e compaixão que por muitas vezes me apoiou nas dificuldades e prorrogações que me fizeram necessárias.

Aos membros da banca de qualificação, Prof. Dr. Paulo Alexandre Monteiro de Figueiredo e Prof. Dr. Sérgio Bispo Ramos pelas arguições visando a melhoria do trabalho e conseqüentemente a redação da tese.

A empresa Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, pela concessão do banco de dados e por acreditar na pesquisa que por vários anos teve convicção dos resultados, ajudando-a em futuras tomadas de decisão dos stakeholders.

Por fim, expresso minha gratidão a todos por fazerem parte desta pesquisa, contribuindo fisicamente, espiritualmente e emocionalmente na concretização deste desafio em minha vida.

Muito obrigado!

Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia.

William Edwards Deming

RESUMO

A colhedora de cana desempenha um papel fundamental na qualidade da matéria-prima destinada ao processamento industrial, mas sua gestão é complexa devido aos elevados custos de aquisição e operação. Esta pesquisa teve como objetivo determinar o ponto ótimo para renovação de colhedoras de cana, utilizando metodologias consagradas adaptadas à realidade agrícola. A análise foi baseada na utilização da Análise de Componentes Principais (PCA), com avaliações focadas em custo, produção, disponibilidade, horas trabalhadas e ano-safra para cada colhedora para a colhedora John Deere (JD) modelo JD 3520 durante oito safras e para a colhedora John Deere modelo CH570 durante quatro safras. Os resultados apontaram que, para a colhedora JD 3520, o momento ideal de substituição é ao final do terceiro ano ou no início do quarto ano, momento em que os custos operacionais aumentam drasticamente e a disponibilidade cai significativamente, tornando-se inviável financeiramente em relação à produção obtida. No caso da colhedora JD CH570, a troca deve ser avaliada ao final do terceiro ano, pois os custos por tonelada (R\$/t) e por hora (R\$/h) começam a subir significativamente, enquanto a disponibilidade operacional declina de forma notável. Conclui-se que encontrar o momento ideal para substituição, equilibrando os pilares de operação, manutenção e financeiro, é essencial para a tomada de decisão estratégica da companhia. Isso garante uma renovação planejada da frota, alinhada ao mercado e sustentada por um banco de dados robusto, proporcionando maior confiabilidade e segurança aos stakeholders.

Palavras-chave: análise multivariada; eficiência operacional; gestão de custos agrícolas; renovação de colhedoras; usina sucroalcooleira.

ABSTRACT

Sugarcane harvesters play a fundamental role in the quality of raw materials destined for industrial processing, but their management is complex due to high acquisition and operating costs. This research aimed to determine the optimal point for renewing sugarcane harvesters, using proven methodologies adapted to the agricultural reality. The analysis was based on the use of Principal Component Analysis (PCA), with evaluations focused on cost, production, availability, hours worked and crop year for each harvester for the John Deere (JD) harvester model JD 3520 during eight harvests and for the John Deere harvester model CH570 during four harvests. The results indicated that, for the JD 3520 harvester, the ideal time for replacement is at the end of the third year or at the beginning of the fourth year, when operating costs increase drastically and availability drops significantly, becoming financially unfeasible in relation to the production obtained. In the case of the JD CH570 harvester, replacement should be evaluated at the end of the third year, since costs per ton (R\$/t) and per hour (R\$/h) begin to rise significantly, while operational availability declines significantly. It is concluded that finding the ideal time for replacement, balancing the pillars of operation, maintenance and finance, is essential for the company's strategic decision-making. This ensures a planned renewal of the fleet, aligned with the market and supported by a robust database, providing greater reliability and security to stakeholders.

Keywords: agricultural cost management; harvester renewal; multivariate analysis; operational efficiency; sugar-alcohol plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da unidade sucroenergética Vale do Paraná, Município de Suzanápolis, Noroeste Paulista	27
Figura 2 – Colhedoras John Deere reformadas pós safra 2022/2023.	28
Figura 3 – Representatividade de cada componente principal da colhedora John Deere modelo JD 3520.....	34
Figura 4 – Gráfico de dispersão para os componentes 1 e 2 dos dados obtidos da colhedora John Deere modelo JD 3520.....	35
Figura 5 – Representatividade de cada componente principal da colhedora John Deere modelo CH570.....	38
Figura 6 – Gráfico de dispersão para os componentes 1 e 2 dos dados obtidos da colhedora John Deere modelo CH570	39
Figura 7 – Evolução dos custos acumulados para a colhedora JD 3520 ao longo dos anos de avaliação	42
Figura 8 – Evolução dos custos acumulados para a colhedora JD CH570 ao longo dos anos de avaliação	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo de aplicação do método dos Custos Médios por Período.....	29
Tabela 2 – Modelo de aplicação do método do CAUE	31
Tabela 3 – Apuração aplicando o método CAUE.	31
Tabela 4 – Dados obtidos para a colhedora John Deere modelo JD 3520.	33
Tabela 5 – Carregamento da colhedora John Deere modelo JD 3520.....	34
Tabela 6 – Dados obtidos para a colhedora John Deere modelo CH570	37
Tabela 7 – Carregamento da colhedora John Deere modelo CH570.....	38
Tabela 8 – Acompanhamento das colhedoras indicando o aumento expressivo nos custos por hora e custos por tonelada	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Gestão de ativos agrícolas: Práticas e desafios na era da modernização tecnológica.....	16
2.1.1	Modernização Tecnológica na Gestão de Ativos	17
2.1.2	Sustentabilidade na Gestão de Ativos Agrícolas.....	17
2.1.2.1	<i>Sustentabilidade Econômica</i>	<i>17</i>
2.1.2.2	<i>Sustentabilidade Ambiental.....</i>	<i>17</i>
2.1.2.3	<i>Sustentabilidade Social</i>	<i>18</i>
2.2	Métodos de Análise de Ciclo de Vida de Máquinas Agrícolas	18
2.2.1	Metodologias Tradicionais de Análise de Ciclo de Vida.....	18
2.2.2	Metodologias Modernas de Análise de Ciclo de Vida.....	19
2.2.2.1	<i>Análise de Componentes Principais (PCA).....</i>	<i>19</i>
2.2.2.2	<i>Análise de Ciclo de Vida Ambiental (LCA).....</i>	<i>19</i>
2.2.3	Inovações Tecnológicas no Ciclo de Vida de Máquinas Agrícolas	19
2.2.3.1	<i>Agricultura Conectada e Big Data.....</i>	<i>19</i>
2.2.3.2	<i>Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning (ML)</i>	<i>20</i>
2.2.3.3	<i>Digital Twins</i>	<i>20</i>
2.2.4	Benefícios das Metodologias Modernas.....	20
2.3	Desgaste de Colhedoras de Cana: Fatores Críticos e Estratégias de Mitigação.	21
2.3.1	Fatores que Intensificam o Desgaste	21
2.3.1.1	<i>Condicionantes Ambientais.....</i>	<i>21</i>
2.3.1.2	<i>Desafios Operacionais</i>	<i>21</i>
2.3.1.3	<i>Impacto do Design e Materiais</i>	<i>22</i>
2.3.2	Estratégias para Mitigação do Desgaste.....	22
2.3.2.1	<i>Manutenção Preventiva e Preditiva</i>	<i>22</i>
2.3.2.2	<i>Substituição de Materiais e Componentes</i>	<i>22</i>
2.3.2.3	<i>Tecnologias Avançadas.....</i>	<i>23</i>
2.3.2.4	<i>Capacitação de Operadores.....</i>	<i>23</i>
2.3.3	Benefícios das Estratégias de Mitigação	23

2.4	Crêterios de Substitui�o de Máquinas Agrícolas: Um Estudo Comparativo entre Metodologias Tradicionais e Modernas	24
3	OBJETIVOS	26
3.1	Objetivo Geral	26
3.2	Objetivos específicos.....	26
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1	Custos médios por período (CM).....	28
4.2	Custo anual equivalente (CAE).....	30
4.3	Custo anual uniforme equivalente (CAUE)	30
4.4	ISO 55000	32
4.5	Análise Estatística.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é fundamental para o desenvolvimento do Brasil e do mundo, sendo uma das fontes de energias renováveis e biocombustíveis em crescente demanda. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2024), a terceira estimativa para a safra 2023/24 projeta uma colheita de 677,6 milhões de toneladas, com a região Sudeste destacando-se como a principal produtora, abrangendo mais de 5,39 milhões de hectares e estimada em 434,98 milhões de toneladas.

A colheita representa a etapa final do ciclo de qualquer cultura, sendo fundamental considerar os aspectos relevantes durante sua execução. No que se refere à cana-de-açúcar, a colheita ocorre no final do ciclo vegetativo e do processo de maturação, momento em que atinge o pico de produtividade e a soma total de açúcar recuperável (ATR), o qual pode ser transformado em açúcar e/ou etanol, sendo possível sua extração de maneira manual ou mecanizada (Spaunhorst *et al.*, 2019).

Na modalidade de corte manual, a colheita da cana-de-açúcar é executada por um operário que utiliza um facão, o que implica elevados riscos de acidentes e uma eficiência relativamente baixa. O corte mecanizado é efetuado por meio de colhedoras autopropelidas projetadas para essa função, apresentando como benefícios a extração de matéria-prima sem o uso do fogo, o que contribui para a diminuição da emissão de gases tóxicos ao meio ambiente, assegurando, assim, elevado conforto ao operador e uma produção mais lucrativa (Vilela *et al.*, 2015). Ou seja, a cana-de-açúcar é colhida crua e na área agrícola permanece a palhada do ponteiro da planta.

No Brasil, o nível de mecanização na colheita de cana-de-açúcar atinge 92,4%, com esse percentual chegando a 98,6% na região Centro-Sul, favorecida pelas características do relevo e pela modernização das operações. A aceleração da colheita mecanizada torna-se imprescindível em função dos avanços tecnológicos, os quais propiciam benefícios ambientais, resultando, sobretudo, em uma diminuição da emissão de poluentes atmosféricos e na preservação do solo, além de favorecer uma maior eficiência e reduzir os custos de produção. Na unidade em questão, a colheita mecanizada corresponde a 100% das entregas destinadas ao processamento industrial (Castro *et al.*, 2022).

Dados da ANFAVEA (2024) contabilizam em 2020 uma produção de 780 unidades de colhedoras de cana entre seus associados. Seu histórico abrange indicadores de produção desde 2013, sendo o recorde de produção com quase 1500 unidades produzidas. Para entender esse

cenário, podemos voltar no tempo e identificar que em 2007, teve-se a criação do Protocolo Agroambiental, que foi aderido por várias empresas do setor sucroenergético paulista. No mesmo ano, foi criado o Projeto de Lei no 1.778, que proíbe a queimada de canaviais e toma outras providências. Considerando o prazo estipulado pela Lei para regularização de três anos, a adequação dos produtores, fabricantes de máquinas, a escassez de mão de obra qualificada, além da taxa de juros para financiamento deflacionados, favoreceu a aquisição dos equipamentos.

Dedicada a preservar resultados operacionais competitivos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) normatizou, em 2014, a ISO 55000, referente à gestão de ativos. Os benefícios da gestão de ativos incluem a otimização do desempenho financeiro, a tomada de decisões fundamentadas acerca de investimentos em ativos e a administração de riscos

Banchi *et al.* (2012 a) afirmaram que o ponto ideal de substituição é definido em função do Custo de Reparo e Manutenção (CRM) de acordo com a idade dos equipamentos. Isso ocorre quando o CRM de uma máquina utilizada ultrapassa o valor da parcela do financiamento de uma nova, acrescido de suas despesas de manutenção. Tal situação demanda a renovação do ativo; além disso, se o período de operação dessa máquina se prolonga, o CRM tende a aumentar, seguindo uma função matemática crescente, podendo alcançar valores superiores aos aceitos pelo mercado no momento de desfazer-se do bem. Adicionalmente, geralmente observa-se uma diminuição na disponibilidade operacional, configurando essas máquinas como de elevado risco, o que pode resultar na falta de matéria-prima na indústria devido à sua indisponibilidade.

Tendo em vista o exposto, o objetivo desta pesquisa foi determinar o ponto ótimo para a renovação de colhedoras de cana-de-açúcar, utilizando metodologias consagradas e adaptadas à realidade agrícola. O estudo buscou criar uma base robusta e confiável para embasar decisões estratégicas de substituição, promovendo sustentabilidade operacional e alinhamento com as exigências do mercado sucroalcooleiro, enquanto proporciona maior segurança aos responsáveis pela gestão de ativos agrícolas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gestão de ativos agrícolas: Práticas e desafios na era da modernização tecnológica

A gestão de ativos agrícolas desempenha um papel estratégico no agronegócio, especialmente em setores mecanizados, como o sucroalcooleiro. Colhedoras de cana-de-açúcar, por exemplo, são equipamentos essenciais para garantir eficiência na colheita e qualidade da matéria-prima destinada ao processamento industrial. No entanto, o desgaste acentuado, as condições severas de operação e os custos elevados de aquisição e manutenção tornam a gestão desses ativos um desafio contínuo.

Conforme definido pela norma ISO 55000, a gestão de ativos envolve práticas estruturadas voltadas para o controle e otimização de bens ao longo de seu ciclo de vida. No setor agrícola, porém, essas práticas enfrentam particularidades como sazonalidade, variações climáticas e a necessidade de adaptar metodologias globais à realidade regional. Tradicionalmente, métodos como a idade técnica do equipamento, custos acumulados de manutenção e valor residual têm sido usados para nortear decisões de substituição. Embora úteis, esses critérios frequentemente desconsideram fatores mais complexos, como eficiência operacional, impacto financeiro de longo prazo e sustentabilidade (Hunt, 2001).

Com o avanço da tecnologia, novas ferramentas têm transformado a gestão de ativos agrícolas. Tecnologias emergentes, como sensores inteligentes, sistemas informatizados de gestão (CMMS) e métodos avançados de análise, permitem o monitoramento em tempo real de máquinas e oferecem dados precisos para decisões estratégicas. Por exemplo, a análise multivariada (PCA) correlaciona variáveis como custo operacional, horas trabalhadas e produtividade, enquanto o custo total de propriedade (TCO) avalia a viabilidade econômica ao longo do ciclo de vida do equipamento (Jolliffe; Cadima, 2016; Kayikci, 2018).

Apesar dessas inovações, a modernização tecnológica enfrenta desafios significativos. Barreiras econômicas, como o alto custo de aquisição de tecnologias, somam-se à necessidade de capacitação de operadores e à infraestrutura limitada em áreas rurais, como conectividade à internet. Além disso, a adaptação de soluções globais às condições específicas da agricultura brasileira exige esforço adicional e eleva a complexidade da implementação (Bolfe *et al.*, 2020).

2.1.1 Modernização Tecnológica na Gestão de Ativos

O avanço tecnológico tem introduzido metodologias inovadoras que substituem práticas tradicionais e melhoram a eficiência na gestão de ativos agrícolas. Sensores conectados, por exemplo, monitoram variáveis como desempenho operacional, consumo de combustível e desgaste de componentes, possibilitando diagnósticos precisos e intervenções preditivas (Evangelista; Vezzani, 2010).

A resistência à mudança também é um obstáculo relevante, especialmente em pequenas propriedades agrícolas e organizações familiares. A formação técnica tradicional de operadores e gestores dificulta a adaptação a ferramentas digitais, resultando na subutilização ou abandono das tecnologias. Além disso, a dependência de soluções desenvolvidas para mercados globais muitas vezes ignora a necessidade de personalização para condições regionais, como solos heterogêneos e variações sazonais (Ripoli; Ripoli, 2009).

2.1.2 Sustentabilidade na Gestão de Ativos Agrícolas

A sustentabilidade tem se tornado um pilar estratégico na gestão de ativos agrícolas, integrando dimensões econômicas, ambientais e sociais.

2.1.2.1 *Sustentabilidade Econômica*

A sustentabilidade econômica na gestão de ativos está ligada à eficiência operacional e à redução de custos. Métodos como o TCO auxiliam gestores a avaliar custos ao longo do ciclo de vida do equipamento, enquanto tecnologias como sensores e manutenção preditiva reduzem falhas e otimizam recursos (Elkington, 1997; Banchi *et al.*, 2019).

2.1.2.2 *Sustentabilidade Ambiental*

Colhedoras mais eficientes ajudam a mitigar impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa, enquanto programas de reciclagem e reutilização de peças promovem uma economia circular. A gestão de resíduos eletrônicos também é uma preocupação crescente com a modernização tecnológica, exigindo iniciativas de descarte responsável (Kayikci, 2018).

2.1.2.3 *Sustentabilidade Social*

No aspecto social, a modernização tecnológica promove inclusão ao capacitar operadores e gestores, criando novas oportunidades de trabalho qualificado. Além disso, práticas sustentáveis, como a mecanização que elimina a queima da palha da cana, contribuem para a melhoria da qualidade de vida nas comunidades agrícolas (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

2.2 **Métodos de Análise de Ciclo de Vida de Máquinas Agrícolas**

A análise do ciclo de vida (ACV) de máquinas agrícolas é essencial para avaliar os impactos econômicos, operacionais e ambientais associados ao uso desses equipamentos. No setor sucroalcooleiro, onde o desempenho das colhedoras de cana-de-açúcar é vital para a eficiência produtiva, a aplicação de métodos de ACV oferece uma visão integrada, permitindo identificar oportunidades de melhoria ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, desde a aquisição até o descarte (Kiehbardroudinezhad *et al.*, 2025).

2.2.1 Metodologias Tradicionais de Análise de Ciclo de Vida

O ciclo de vida de uma máquina agrícola abrange as fases de aquisição, operação, manutenção, declínio de desempenho e descarte ou renovação. Entre as metodologias tradicionais, destacam-se o Custo Total de Propriedade (TCO) e a análise baseada na Idade Técnica e Econômica.

O TCO é amplamente utilizado no agronegócio, pois considera todos os custos associados ao ciclo de vida do equipamento, incluindo aquisição, operação, manutenção e valor residual. Isso permite identificar o ponto de maior eficiência econômica, auxiliando na decisão de substituição (HUNT, 2001). Já a análise de idade técnica avalia o tempo ou as horas de trabalho como critérios de substituição. Embora seja uma abordagem prática, estudos destacam que a análise de idade técnica desconsidera variáveis como clima, tipo de solo e manejo agrícola, o que pode levar a decisões menos eficazes (Pagare *et al.*, 2019).

2.2.2 Metodologias Modernas de Análise de Ciclo de Vida

Com os avanços tecnológicos, novas ferramentas têm revolucionado a gestão do ciclo de vida de máquinas agrícolas.

2.2.2.1 *Análise de Componentes Principais (PCA)*

A PCA é amplamente usada para correlacionar múltiplas variáveis que impactam o desempenho de equipamentos, como custos operacionais, eficiência de combustível e disponibilidade. Um estudo de Shuai *et al.* (2020) aplicou a Análise de Componentes Principais (PCA) para avaliar atividades de gestão agrícola, destacando que variáveis como custo operacional, eficiência no uso de recursos e disponibilidade de máquinas são determinantes no desempenho produtivo. Essa abordagem multivariada contribui para decisões mais fundamentadas sobre a substituição e alocação de equipamentos.

2.2.2.2 *Análise de Ciclo de Vida Ambiental (LCA)*

A LCA avalia os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos equipamentos, incluindo consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa e uso de materiais recicláveis. Segundo Schenck e White (2014), a aplicação da LCA é fundamental para alinhar os processos produtivos às exigências de desempenho ambiental ao longo de toda a cadeia de valor. No setor agrícola, tecnologias mais eficientes têm contribuído para reduzir emissões e custos operacionais, promovendo práticas mais sustentáveis.

2.2.3 Inovações Tecnológicas no Ciclo de Vida de Máquinas Agrícolas

A introdução de tecnologias como Big Data, Inteligência Artificial (IA) e Digital Twins tem transformado a análise de ciclo de vida de máquinas agrícolas no setor agrícola.

2.2.3.1 *Agricultura Conectada e Big Data*

A aplicação de tecnologias como Internet das Coisas (IoT) ou Agricultura Conectada (AC) e Inteligência Artificial (IA) na agricultura tem impulsionado práticas mais eficientes de monitoramento, manutenção e tomada de decisão. Segundo Lee (2024), a integração de

middleware baseado em IoT e IA possibilita um ambiente agrícola inteligente, promovendo melhor gestão de recursos e aumento da produtividade operacional.

2.2.3.2 *Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning (ML)*

Modelos preditivos baseados em inteligência artificial e aprendizado de máquina analisam dados históricos e em tempo real para identificar padrões ocultos, antecipar falhas e determinar o momento ideal para substituição ou manutenção. De acordo com Liakos *et al.* (2018), o uso de algoritmos de aprendizado de máquina tem se mostrado promissor para melhorar a eficiência e a tomada de decisões no setor agrícola, inclusive em aplicações como manutenção preditiva de maquinário.

2.2.3.3 *Digital Twins*

Os Digital Twins são réplicas virtuais de máquinas que simulam seu desempenho em condições reais ou projetadas. De acordo com Tao *et al.* (2018), essa tecnologia auxilia na previsão de falhas, permite testar configurações antes da implementação e reduz custos operacionais ao otimizar o uso dos equipamentos. No contexto agrícola, Wang *et al.* (2024) demonstram que a aplicação de gêmeos digitais no sistema de melhoramento da cana-de-açúcar proporciona maior eficiência no manejo, integração de dados e apoio à tomada de decisão.

2.2.4 Benefícios das Metodologias Modernas

As metodologias modernas oferecem diversos benefícios para a gestão de ativos agrícolas, tais como:

- ✓ **Decisões Baseadas em Dados:** Métodos como PCA, Big Data e Digital Twins fornecem análises precisas, orientando decisões informadas sobre manutenção e substituição.
- ✓ **Sustentabilidade Ambiental:** A integração de LCA e AC reduz emissões e promove práticas mais sustentáveis.
- ✓ **Redução de Custos:** Tecnologias como IA e Machine Learning identificam oportunidades de economia ao longo do ciclo de vida dos ativos (Liakos *et al.*, 2018).

2.3 Desgaste de Colhedoras de Cana: Fatores Críticos e Estratégias de Mitigação

As colhedoras de cana-de-açúcar são indispensáveis para o setor sucroalcooleiro, mas enfrentam condições severas de operação que aceleram o desgaste. Esse desgaste afeta diretamente a eficiência, disponibilidade e custos operacionais, exigindo estratégias eficazes para mitigação.

2.3.1 Fatores que Intensificam o Desgaste

2.3.1.1 *Condicionantes Ambientais*

O contato constante com materiais abrasivos, como solo, pedras e resíduos vegetais, é uma das principais causas de desgaste em peças críticas, como facas de corte, esteiras transportadoras e discos de despalha. Solos arenosos e compactados intensificam o desgaste, enquanto terrenos inclinados aumentam o esforço mecânico sobre o sistema de tração e os rolamentos (Malvajerdi, 2023).

A corrosão é uma das principais causas de deterioração em componentes metálicos de máquinas agrícolas, especialmente em regiões com alta umidade. A presença de fertilizantes, pesticidas e gases corrosivos no ambiente acelera esse processo. Segundo Wang *et al.* (2023), a exposição prolongada a essas condições compromete a integridade das superfícies metálicas, favorecendo falhas mecânicas por fadiga e abrasão. Estratégias como manutenção adequada, seleção de materiais resistentes e tratamentos de superfície são essenciais para prolongar a vida útil dos equipamentos.

2.3.1.2 *Desafios Operacionais*

O trabalho contínuo durante a safra, com jornadas longas e intervalos reduzidos para manutenção, contribui para o desgaste acumulado. Essa sobrecarga operacional muitas vezes limita a aplicação de práticas preventivas, aumentando a frequência de falhas inesperadas (Liakos *et al.*, 2018).

2.3.1.3 *Impacto do Design e Materiais*

A utilização de materiais avançados, como ligas metálicas com revestimento de carboneto de tungstênio, aumenta significativamente a durabilidade de peças críticas. Estudos demonstram que esse tipo de revestimento pode reduzir drasticamente o desgaste em ferramentas agrícolas submetidas a solos abrasivos. Segundo Wang *et al.* (2023), materiais resistentes ao desgaste e tratamentos superficiais, como revestimentos de carboneto de tungstênio, são estratégias eficazes para prolongar a vida útil de componentes submetidos a ambientes abrasivos. Além disso, Bochtis *et al.* (2014) destacam que avanços na gestão de máquinas agrícolas, aliados a práticas adequadas de manutenção, desempenham papel fundamental na melhoria da eficiência operacional e na extensão da vida útil dos equipamentos.

2.3.2 *Estratégias para Mitigação do Desgaste*

2.3.2.1 *Manutenção Preventiva e Preditiva*

A manutenção preventiva, com inspeções regulares e substituições programadas, reduz a ocorrência de falhas inesperadas, especialmente durante períodos críticos, como a safra. Já a manutenção preditiva, viabilizada por sensores de vibração, temperatura e pressão, permite monitorar o desgaste em tempo real. Segundo Pachayappan *et al.* (2020), o uso de tecnologias IoT aplicadas à produção de cana-de-açúcar possibilita o monitoramento inteligente dos equipamentos e recursos, promovendo maior eficiência e redução de perdas operacionais.

2.3.2.2 *Substituição de Materiais e Componentes*

A utilização de materiais avançados, como revestimentos com carboneto de tungstênio, aumenta significativamente a durabilidade de peças críticas em contato com o solo. Bartkowski e Bartkowska (2017) demonstraram que revestimentos de Stellite-6 reforçados com WC aplicados por laser cladding em ferramentas agrícolas aumentaram em até 25% a resistência ao desgaste em campo, comparados a ferramentas convencionais. Esse tipo de solução tecnológica representa um avanço relevante no combate ao desgaste abrasivo em solos arenosos.

2.3.2.3 Tecnologias Avançadas

Ferramentas modernas, como os Digital Twins, permitem simular o desempenho de máquinas agrícolas em diferentes condições operacionais, possibilitando prever falhas e testar configurações antes da implementação em campo (TAO *et al.*, 2018). A análise de dados históricos, aliada a sensores inteligentes e algoritmos de aprendizado de máquina, contribui para identificar padrões de desgaste e otimizar estratégias de manutenção (Liakos *et al.*, 2018).

2.3.2.4 Capacitação de Operadores

Treinamentos regulares capacitam operadores para evitar práticas que intensifiquem o desgaste, como velocidades inadequadas e operação fora dos limites recomendados. Essas iniciativas prolongam a vida útil das máquinas e reduzem falhas causadas por erro humano. Segundo Paman *et al.* (2023), a baixa qualificação técnica dos operadores está entre as principais causas de falhas operacionais, desgaste prematuro e aumento nos custos de manutenção. O estudo mostrou que apenas 23% dos operadores receberam treinamento formal para operar as máquinas, e apenas 7% foram capacitados em manutenção preventiva, evidenciando a necessidade urgente de programas estruturados de capacitação no setor agrícola.

2.3.3 Benefícios das Estratégias de Mitigação

A aplicação de estratégias de mitigação traz os seguintes benefícios significativos:

- ✓ Aumento da durabilidade: Componentes com maior resistência reduzem a frequência de substituições e os custos associados.
- ✓ Melhoria da eficiência operacional: Menor tempo de inatividade das máquinas garante o cumprimento das metas de produção.
- ✓ Sustentabilidade ambiental: A redução do consumo de peças e a reciclagem de componentes diminuem a geração de resíduos e o impacto ambiental.

Embora o desgaste em colhedoras de cana seja inevitável, as estratégias disponíveis, que combinam avanços tecnológicos e boas práticas de operação, são essenciais para melhorar a competitividade e a sustentabilidade no setor sucroalcooleiro (Testa *et al.*, 2016).

2.4 Critérios de Substituição de Máquinas Agrícolas: Um Estudo Comparativo entre Metodologias Tradicionais e Modernas

A substituição de máquinas agrícolas é uma decisão estratégica que exige o equilíbrio entre custos operacionais, desempenho técnico e inovação tecnológica. No setor agrícola, onde equipamentos como colhedoras de cana-de-açúcar desempenham um papel fundamental, o momento da substituição pode impactar diretamente a produtividade e a viabilidade financeira das operações. Historicamente, as decisões de substituição eram guiadas por metodologias tradicionais, como idade técnica do equipamento, custos acumulados de manutenção e valor residual. No entanto, com o avanço das tecnologias e o aumento da complexidade das operações agrícolas, abordagens modernas, como análise multivariada (SHUAI *et al.*, 2020), custo total de propriedade (Pagare *et al.*, 2019) e inteligência artificial, têm emergido como ferramentas indispensáveis para decisões mais fundamentadas e alinhadas à sustentabilidade.

As metodologias tradicionais, amplamente utilizadas até hoje, baseiam-se em critérios relativamente simples. A idade técnica do equipamento é frequentemente usada como parâmetro, com fabricantes e manuais técnicos indicando uma vida útil média, geralmente medida em anos ou horas trabalhadas. Apesar de sua simplicidade, esse método ignora variáveis importantes, como o tipo de solo, clima e condições específicas de operação, que podem prolongar ou reduzir significativamente a durabilidade da máquina. De forma semelhante, o custo acumulado de manutenção é um critério importante para a substituição. Quando os gastos com reparos começam a superar um percentual significativo do valor original da máquina, a substituição se torna recomendada. Embora eficaz em cenários onde os custos de manutenção são previsíveis, essa abordagem não considera avanços tecnológicos ou ganhos de eficiência que podem ser obtidos com a aquisição de modelos mais modernos (Hunt, 2001).

Quanto o valor residual, outro critério tradicional, avalia o momento ideal de substituição com base na depreciação do equipamento. Gestores frequentemente optam por trocar as máquinas antes que seu valor de mercado se torne insignificante. No entanto, esse método está sujeito a flutuações no mercado de revenda e pode não refletir o estado real do equipamento, especialmente em máquinas bem mantidas (Herranz-Matey; Ruiz-Garcia, 2023).

Em contraste, as metodologias modernas oferecem abordagens mais abrangentes e adaptáveis. O TCO, por exemplo, considera todos os custos associados à vida útil do equipamento, incluindo aquisição, operação, manutenção e valor residual. Ao fornecer uma visão mais ampla, o TCO ajuda os gestores a identificar o momento em que o custo por unidade de produção atinge o ponto mais eficiente, permitindo decisões baseadas em métricas

econômicas claras. Estudos como o de Nascimento *et al.* (2020) demonstram que a confiabilidade das colhedoras de cana-de-açúcar influencia diretamente o desempenho operacional e os custos de manutenção, justificando a substituição estratégica de máquinas em determinados ciclos produtivos.

A análise multivariada é outra ferramenta moderna que tem ganhado espaço. Essa metodologia analisa simultaneamente múltiplas variáveis, como eficiência de combustível, custos de manutenção e disponibilidade operacional, identificando os fatores que mais influenciam o desempenho das máquinas.

Além disso, a aplicação de inteligência artificial e machine learning tem revolucionado a gestão de ativos agrícolas. Modelos preditivos analisam dados históricos e em tempo real para prever falhas e determinar o momento ideal de substituição. Liakos *et al.* (2018) destacam que o uso de algoritmos de aprendizado de máquina tem contribuído para o aprimoramento da eficiência operacional e da tomada de decisões no setor agrícola, inclusive no monitoramento e manutenção de equipamentos. Essas ferramentas também oferecem potencial para personalizar intervenções com base em variáveis como tipo de solo e intensidade de uso.

Outro avanço significativo é a análise de ciclo de vida ambiental, que avalia os impactos ambientais associados ao uso do equipamento, incluindo emissões de carbono, consumo de energia e geração de resíduos. Segundo Schenck e White (2014), a aplicação da LCA é fundamental para medir os impactos ambientais ao longo de todas as fases do ciclo de vida dos produtos, contribuindo para decisões mais sustentáveis na gestão de ativos agrícolas.

Comparando as metodologias, as abordagens tradicionais se destacam por sua simplicidade e custo reduzido, mas tendem a ser limitadas em cenários complexos, onde múltiplas variáveis impactam o desempenho e os custos. Por outro lado, as metodologias modernas exigem maior coleta e análise de dados, além de infraestrutura tecnológica, mas oferecem maior precisão e flexibilidade, permitindo decisões otimizadas e alinhadas às tendências de sustentabilidade (Liakos *et al.*, 2018).

Com base nos avanços tecnológicos e na crescente complexidade das operações agrícolas, a combinação de metodologias tradicionais e modernas pode ser a chave para decisões mais eficazes. Ao utilizar ferramentas como TCO e análise multivariada em conjunto com indicadores clássicos, como custo acumulado de manutenção, gestores conseguem equilibrar simplicidade e eficiência, maximizando a produtividade e a sustentabilidade das operações (Liakos *et al.*, 2018).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Determinar o ponto ótimo para renovação de colhedoras de cana-de-açúcar, utilizando metodologias consagradas adaptadas à realidade agrícola.

3.2 Objetivos específicos

1. Avaliar os componentes de custo, produção, disponibilidade, horas trabalhadas e ano-safra para colhedora John Deere modelo JD 3520 durante oito safras, utilizando a análise multivariada (PCA);
2. Avaliar a os componentes de custo, produção, disponibilidade, horas trabalhadas e ano-safra para colhedora John Deere modelo CH570 durante quatro safras, utilizando a análise multivariada (PCA);
3. Determinar os custos acumulados das colhedoras evidenciando a proporção desses custos em cada ano de produção, em relação a um ativo novo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Empresa Vale do Paraná S/A, durante a safra 2022/2023, localizada no município de Suzanápolis - SP, situados nas coordenadas geográficas 20° 23'07" S 51° 02'05" O (Figura 1).

Figura 1 – Localização da unidade sucroenergética Vale do Paraná, Município de Suzanápolis, Noroeste Paulista



Fonte: próprio autor.

O sistema informatizado da unidade pertence ao grupo TOTVS PIMS AGRO BIOENERGIA no módulo de planejamento e controle da manutenção automotiva (MANFRO). A alimentação que compõe as informações de cada máquina é realizada através de um posto de ordem de serviço (POS) que funciona durante 24 horas por dia. Repassadas do campo por meio da comunicação via rádio pelo líder da frente, os auxiliares de manutenção abrem a ordem de serviço (OS) que contém os campos obrigatórios informando a máquina, horário da parada, previsão de término do serviço, horímetro do motor, matrícula do operador e a descrição do serviço a realizar. A ordem de serviço segue um sequencial de números disponibilizados pelo banco de dados do sistema, após esse processo informa o líder de manutenção e o mecânico, onde este vai até o equipamento e aponta via tablet o serviço, os materiais necessários para o retorno da máquina. Após encerrada a OS, é possível verificar o tempo de permanência, os

custos dos materiais e a mão de obra. Na Figura 2 constam algumas colhedoras John Deere que foram reformadas após a safra dos anos 2022/2023.

Figura 2 – Colhedoras John Deere reformadas pós safra 2022/2023.



Fonte: próprio autor.

As metodologias aplicadas foram utilizadas para o cálculo dos custos médios (CM), Custos Anual Equivalente (CAE) e Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

4.1 Custos médios por período (CM)

Conforme Lima (2002), que investigou os equipamentos do setor de transporte rodoviário, a análise desse método abrange dois principais grupos: os custos de capital, que incluem a depreciação e a remuneração do capital, e os custos de manutenção, que consideram as peças, a mão de obra e a paralisação. Assim, a mesma metodologia foi aplicada nas colhedoras de cana e através dos cálculos, foi possível determinar qual a faixa encontrada pela metodologia. Os valores em consideração foram os custos gerados desde a primeira intervenção realizada pela oficina mecânica, acompanhando mensalmente até o mês de maio de 2022, quando se completou o período de safra e entressafra, deixando o equipamento disponível para a safra subsequente, foi agrupado anualmente os custos com cada equipamento.

Os dados de cada colhedora existente na unidade destinada à colheita da matéria-prima remetida à fábrica para processamento foram coletados. A marca John Deere, no que diz respeito aos modelos JD 3520, produzidos entre 2013 e 2015, apresenta uma amostra composta por 11 colhedoras, enquanto os modelos JD CH570, fabricados nos anos de 2016 e 2017, estão acompanhados pela evolução de 8 e 4 safras, respectivamente. No ano de 2015 a colhedora do modelo JD 3520 foi descontinuada John Deere, sendo alterado pelo modelo JD CH570.

O ponto ideal de substituição foi identificado quando os custos médios atingirem seu menor valor no período e não quando os custos foram menores. O modelo de aplicação da metodologia está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelo de aplicação do método dos Custos Médios por Período

Tempo de uso (Anos) (A)	Valor do Equipamento (R\$) (B)	Depreciação (R\$) (C)	Remuneração de Capital (R\$) (D)	Custos de Capital (R\$) (E)	Custos de Manutenção (R\$) (F)	Custos Totais no Período (R\$) (G)	Custos Acumulados (R\$) (H)	Custos Médios (R\$) (I)
Novo	1000	-	-	-	-	-	-	-
1	857	143	100	243	100	343	343	343
2	714	143	85,7	228,7	120	348,7	691,7	346
3	571	143	71,4	214,4	120	334,4	1026,1	342
4	428	143	57,1	200,1	130	330,1	1356,2	339
5	285	143	42,8	185,8	180	365,8	1722	344
6	142	143	28,5	171,5	230	401,5	2123,5	354
7	0	142	14,2	156,2	380	536,2	2659,7	380
TMA	10%							

Fonte: Adaptado de Lima (2002).

Para o cálculo apresentado na Tabela 1 considera-se:

- ✓ a taxa mínima de atratividade (TMA) é de 10% a.a.;
- ✓ valores do equipamento (B), são valores do ano anterior subtraído a depreciação;
- ✓ depreciação (C), obtida através da desvalorização do valor de aquisição por método linear em sete períodos sem valor residual;
- ✓ remuneração de capital (D), obtida aplicando-se a TMA 10% a.a. ao valor do equipamento (B) do ano anterior: $D_n = 10\% \times B_{n-1}$
- ✓ os custos de capital (E), obtido através da soma da depreciação (C) com a remuneração de capital (D), sendo: $E_n = C_n + D_n$
- ✓ os custos de manutenção (F), são valores estimados e em unidade monetária aleatória;
- ✓ os custos totais no período (G), são obtidos pela soma dos custos de capital (E) com os custos de manutenção (F), sendo: $G_n = E_n + F_n$
- ✓ os custos acumulados (H), são obtidos pela soma do custo total do período considerado aos custos totais dos períodos anteriores, sendo:

$$H_n = \sum_{n=1}^n G_n \quad (1)$$

- ✓ os custos médios (I), são obtidos pela divisão dos custos acumulados até o período pelo número de períodos (A), sendo: $I_n = H_n / N_n$.

4.2 Custo anual equivalente (CAE)

Tal abordagem consiste em examinar, com base no fluxo de caixa, uma equivalência entre os custos incorridos em diferentes períodos. Conforme Grejianin (2014), os fluxos de caixa equivalentes são utilizados por meio de fatores de juros compostos, os quais são comparados aos custos anuais equivalentes. Neste método, o momento ideal para a substituição do ativo ocorre quando o custo anual equivalente atinge seu menor valor durante o período em questão. O autor chega à conclusão de que, ao empregar o Custo Anual Equivalente (CAE), a idade de substituição está condicionada ao preço de aquisição, aos gastos anuais com manutenção e ao valor de revenda do equipamento.

4.3 Custo anual uniforme equivalente (CAUE)

Essa abordagem envolve a análise dos custos relacionados à manutenção e à interrupção do equipamento, combinada a uma taxa mínima de atratividade estabelecida pelos interessados. Conforme os cálculos apresentados por Lima (2002), foram ajustados para satisfazer as demandas do setor agrícola, apresentados nas tabelas 2 e 3. Cada equipamento foi analisado individualmente, conforme descrito no item 4.1.

Tabela 2 – Modelo de aplicação do método do CAUE

Idade (Anos)	Custo de Manutenção (R\$)		Horas paradas na Oficina (h)	Valor de Revenda (R\$)
	Peças	Mão-de-Obra		
0	-	-	-	835.000
1	197.644	45.857	1.034	1.056.791
2	371.213	107.987	892	880.659
3	355.091	124.250	1.880	704.527
4	385.327	280.172	1.745	528.395
5	361.779	227.162	843	352.264
6	392.538	278.416	685	176.132
7	320.526	356.387	1.025	-
8	325.924	408.793	1.014	-

Fonte: Adaptado de Lima (2002).

Tabela 3 – Apuração aplicando o método CAUE

	1º Ano	2º Ano	3º Ano	4º Ano	5º Ano	6º Ano	7º Ano	8º Ano
<u>Horas paradas (h)</u>	1.034	892	1.880	1.745	843	685	1.025	1.014
<u>Custo Horas Paradas no Período Real (R\$)</u>	28.736	24.782	52.227	48.484	23.412	19.038	28.477	28.171
<u>Custo Peças no Período Real (R\$)</u>	197.644	371.213	355.091	385.327	361.779	392.538	320.526	325.924
<u>Custo Mão-de-Obra no Período Real (R\$)</u>	45.857	107.987	124.250	280.172	227.162	278.416	356.387	408.793
<u>Custo Manutenção Anual no Período Real (R\$)</u>	272.236	503.982	531.569	713.983	612.353	689.992	705.390	762.887
<u>Fator de Valor Atual</u>	0,9091	0,8264	0,7513	0,6830	0,6209	0,5645	0,5132	0,4665
<u>Custo Manutenção Anual Trazido a Valor Presente (R\$)</u>	247.487	458.165	483.244	649.075	556.684	627.266	641.264	693.534
<u>Custo Manut. Acumulado no Valor Presente (R\$)</u>	247.487	705.653	1.188.897	1.837.972	2.394.657	3.021.922	3.663.186	4.356.720
<u>Valor de Revenda no Período Real (R\$)</u>	1.056.791	880.659	704.527	528.395	352.264	176.132	-	-
<u>Valor de Revenda Trazido a Valor Presente (R\$)</u>	960.719	800.599	640.479	480.359	320.240	160.120	-	-
<u>Custo anual Depreciação Trazido a Valor Presente (R\$)</u>	201.628	160.120	160.120	160.120	160.120	160.120	160.120	-
<u>Custo Anual Depreciação Levado ao Período Real (R\$)</u>	221.791	193.745	213.119	234.431	257.875	283.662	312.028	-
<u>Custo Total Depreciação no Valor Presente (R\$)</u>	201.628	41.508	118.612	278.731	438.851	598.971	759.091	759.091
<u>Custo Total Anual (R\$)</u>	50.445	697.727	744.688	948.414	870.227	973.654	1.017.418	762.887
Fator de Recuperação de Capital	1,100000	0,576190	0,402115	0,315471	0,263797	0,229607	0,205405	0,187444
<u>Custo Anual Uniforme Equivalente (R\$) (CAUE)</u>	50.445	382.674	525.769	667.758	747.472	831.384	908.360	958.928

Fonte:

4.4 ISO 55000

De acordo com a ABNT 55.000 (2014), a gestão de ativos é uma importante decisão estratégica para uma organização, trazendo benefícios como a redução de riscos, a identificação de oportunidades e/ou melhorias nos processos. Essa prática auxilia no entendimento dos ativos, de seus desempenhos, riscos e necessidades de investimento. Além disso, conclui-se que o sistema pode estimular a criatividade e a inovação, apoiando as pessoas que compreendem a importância da gestão de ativos e as motivando a alcançar os objetivos propostos por essa gestão.

Foram implementados os conceitos dessa gestão de ativos na unidade de pesquisa, com a manutenção de uma equipe multidisciplinar composta por um comitê de diferentes áreas interligadas, como operação, manutenção, financeiro, contabilidade, fiscal e tecnologia da informação.

4.5 Análise Estatística

Os equipamentos foram analisados por meio da análise multivariada com padrões de componentes principais (PCA), utilizando o software PAST, versão gratuita. As avaliações realizadas incluíram custo, produção, disponibilidade, horas trabalhadas e ano-safra por colhedora de cana. Além disso, foram aplicadas regressões múltiplas para avaliar o comportamento e a evolução dessas variáveis ao longo das safras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização das análises, constatou-se que, para a colhedora John Deere modelo JD3520, os componentes principais identificados foram os custos unitários, expressos em R\$ h⁻¹ e R\$ t⁻¹, os quais explicaram 60,88% da variância associada ao Componente Principal 1 (CP1). No Componente Principal 2 (CP2), destacaram-se os custos anuais, a produção em horas, a produção por toneladas e a disponibilidade, contribuindo conjuntamente para 79,69% da variância total explicada pela análise multivariada (PCA). Os dados obtidos no PAST para esse modelo, acompanhados por oito safras, estão apresentados na Tabela 4.

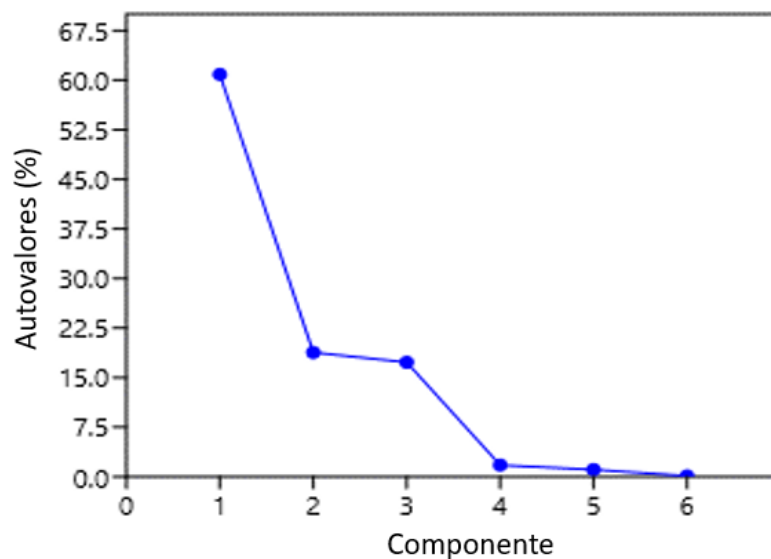
Tabela 4 – Dados obtidos para a colhedora John Deere modelo JD 3520.

PC	<i>Autovalores</i>	<i>Variância (%)</i>
1	3,91	60,88
2	1,21	18,81
3	1,11	17,32
4	0,11	1,77
5	0,07	1,09
6	0,01	0,13

Fonte:

Adicionalmente, na Figura 3 observa-se a representatividade de cada componente principal avaliado na Tabela 4, corroborando visualmente com a informação de que os componentes 1 e 2 obtiveram os maiores valores na análise.

Figura 3 – Representatividade de cada componente principal da colhedora John Deere modelo JD 3520



Fonte:

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de carga das variáveis nos componentes principais, evidenciando aquelas com maior contribuição na formação dos fatores extraídos. O Componente Principal 1 (PC1) é fortemente influenciado pelas variáveis Produção (h), Produção (t), Custo (R\$ t⁻¹) e Custos (R\$ h⁻¹), enquanto o PC2 destaca os Custos anuais como principal variável associada. A Disponibilidade (%), por sua vez, apresenta alta carga no PC3, demonstrando sua importância isolada nesse componente. Tais padrões indicam a estrutura latente dos dados e contribuem para a compreensão dos fatores subjacentes ao desempenho das máquinas avaliadas.

Tabela 5 – Carregamento da colhedora John Deere modelo JD 3520

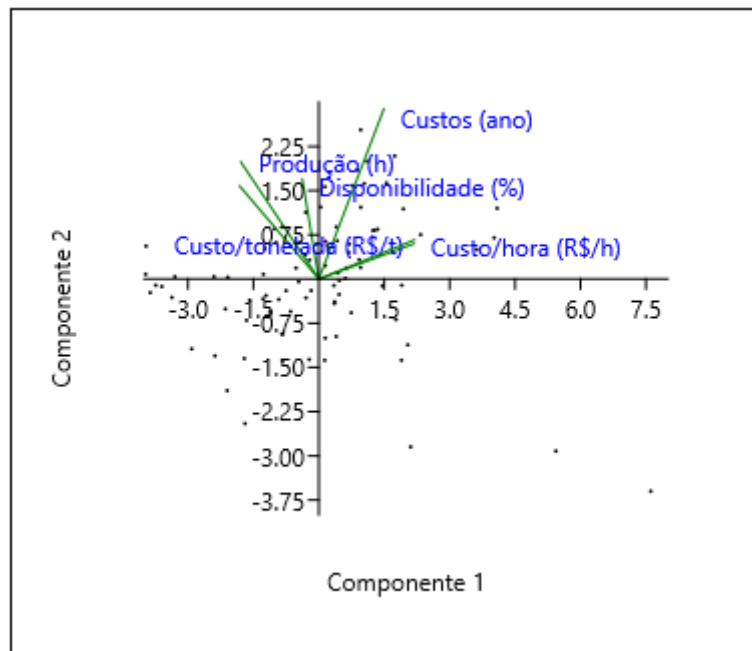
<i>Variável</i>	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6
Produção (h)	-0,42	0,46	-0,21	0,17	-0,63	0,38
Produção (t)	-0,42	0,37	-0,33	0,39	0,55	-0,35
Custos (ano)	0,35	0,67	-0,17	-0,61	0,08	-0,13
Disponibilidade (%)	-0,09	0,40	0,89	0,15	0,12	0,04
Custo (R\$ t ⁻¹)	0,51	0,14	-0,02	0,51	-0,42	-0,54
Custos (R\$ h ⁻¹)	0,51	0,15	-0,16	0,40	0,33	0,65

Fonte:

Para manter valores competitivos no mercado, é essencial dispor de planos de manutenção preventiva bem estruturados, assegurando que as colhedoras permaneçam disponíveis pelo maior tempo possível para a colheita de cana. Segundo Mobley (2002), a disponibilidade física — expressa em termos percentuais — corresponde à proporção de tempo em que um equipamento está operacional e apto para uso em relação ao tempo total disponível. Esse indicador é fundamental para a estratégia de funcionamento dos departamentos de manutenção e para o atendimento às demandas do processo produtivo.

Os valores dos dois principais componentes, apresentados na Tabela 5, foram utilizados para a elaboração do gráfico de dispersão (Figura 4).

Figura 4 – Gráfico de dispersão para os componentes 1 e 2 dos dados obtidos da colhedora John Deere modelo JD 3520



Fonte:

O gráfico de dispersão apresentado ilustra a relação entre os dois principais componentes obtidos por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), aplicada aos dados da colhedora John Deere modelo JD 3520. Esses componentes explicam a maior parte da variância das variáveis analisadas, permitindo identificar padrões significativos e possíveis correlações.

O Componente 1, representado no eixo X, está fortemente associado às variáveis de custo, como Custos (ano) e Custos (R\$ h⁻¹). Isso indica que este é responsável por capturar a maior parte da variabilidade relacionada aos aspectos financeiros do maquinário, tornando os

custos a característica predominante nesse componente. Segundo Jolliffe e Cadima (2016), o PCA é uma ferramenta eficaz para identificar padrões em grandes conjuntos de dados ao simplificar a estrutura original em componentes mais interpretáveis.

Por outro lado, o Componente 2, no eixo Y, reflete variáveis relacionadas ao desempenho operacional, como Produção (t), Produção (h) e Disponibilidade (%). Essas variáveis estão associadas à eficiência do maquinário durante a operação, demonstrando que o segundo componente é mais relevante para aspectos produtivos. De acordo com Abdi e Williams (2010), os componentes principais secundários frequentemente capturam variações complementares que não são observadas no principal eixo de variância.

Os vetores representados no gráfico indicam a direção e a magnitude da contribuição de cada variável nos componentes. Vetores mais longos, como o de Custos (ano), destacam a relevância dessa variável no conjunto de dados, enquanto o ângulo entre vetores reflete o grau de correlação entre eles. Por exemplo, a proximidade entre os vetores de Custos (ano) e Custos (R\$ h⁻¹) sugere uma forte correlação, enquanto vetores de produção e custo demonstram menor alinhamento, evidenciando que esses fatores são menos relacionados (Hair *et al.*, 2014).

A dispersão dos pontos no gráfico representa as observações individuais, como diferentes máquinas ou safras analisadas. Observações mais próximas indicam similaridades nos padrões de comportamento, enquanto pontos mais distantes podem refletir condições específicas ou possíveis outliers.

De forma geral, no gráfico evidencia-se que os custos operacionais são o principal fator diferenciador entre as observações, enquanto as variáveis de produção e disponibilidade desempenham papéis complementares, contribuindo para a análise da eficiência operacional. Essa representação gráfica permite identificar padrões importantes e direcionar estratégias para equilibrar custos e produtividade, otimizando o desempenho do maquinário agrícola (JOLLIFFE; CADIMA, 2016).

Os dados obtidos no PAST para o modelo CH570 da colhedora da John Deere, acompanhados por quatro safras, constam na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados obtidos para a colhedora John Deere modelo CH570

PC	<i>Autovalores</i>	<i>Variância (%)</i>
1	19.570,90	98,57
2	180,39	0,91
3	101,89	0,51
4	1,15	0,01
5	0,08	0,00
6	0,00	0,00

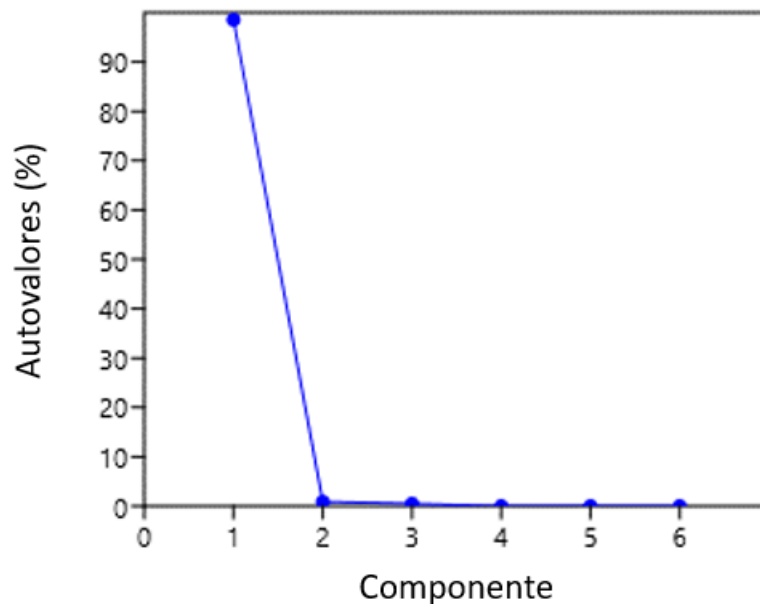
Fonte:

Para a colhedora John Deere, modelo CH570, os custos anuais representam 98,57% do Componente Principal 1, evidenciando que os custos de manutenção são significativamente elevados. Esses custos demandam critérios rigorosos para garantir o ponto de equilíbrio no momento da renovação, uma vez que, de uma safra para outra, os valores tendem a se tornar insustentáveis, iniciando um ciclo de custos sem benefícios para a companhia.

A predominância do PC1 na explicação da variabilidade sugere que o desempenho da colhedora John Deere, modelo CH570, pode ser avaliado de forma eficiente considerando apenas um conjunto reduzido de variáveis principais. Isso simplifica o modelo de análise, permitindo que decisões operacionais e financeiras sejam baseadas em indicadores-chave. Variáveis altamente correlacionadas com o PC1 (como custos e produção) devem ser priorizadas na análise estratégica da colhedora. Embora menor, o PC2 pode fornecer informações adicionais sobre fatores secundários, como eficiência em condições específicas ou variações anuais. Os componentes do PC3 em diante possuem contribuição desprezível e podem ser ignorados para reduzir a complexidade da análise.

Adicionalmente, na Figura 5 observa-se a representatividade de cada componente principal avaliado na Tabela 6, corroborando visualmente com a informação de que o componente 1 teve maior predominância na explicação da variabilidade.

Figura 5 – Representatividade de cada componente principal da colhedora John Deere modelo CH570



Fonte:

Na Tabela 7 observa-se as cargas fatoriais dos principais componentes (PC1 a PC6) obtidos por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), aplicada às variáveis de desempenho e custos operacionais da colhedora John Deere CH570. Essas cargas representam a contribuição de cada variável na formação dos componentes principais.

Tabela 7 - Carregamento da colhedora John Deere modelo CH570

<i>Variável</i>	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6
Produção (h)	-0,00	0,02	-0,01	0,01	0,30	0,96
Produção (t)	-0,04	0,69	0,72	0,07	0,05	-0,02
Custos (ano)	0,92	0,31	-0,24	0,00	-0,02	-0,00
Disponibilidade (%)	-0,02	-0,00	-0,09	0,99	-0,05	0,00
Custo (R\$ t ⁻¹)	0,01	-0,02	-0,06	0,05	0,95	-0,30
Custos (R\$ h ⁻¹)	0,39	-0,66	0,64	0,06	0,02	0,01

Fonte:

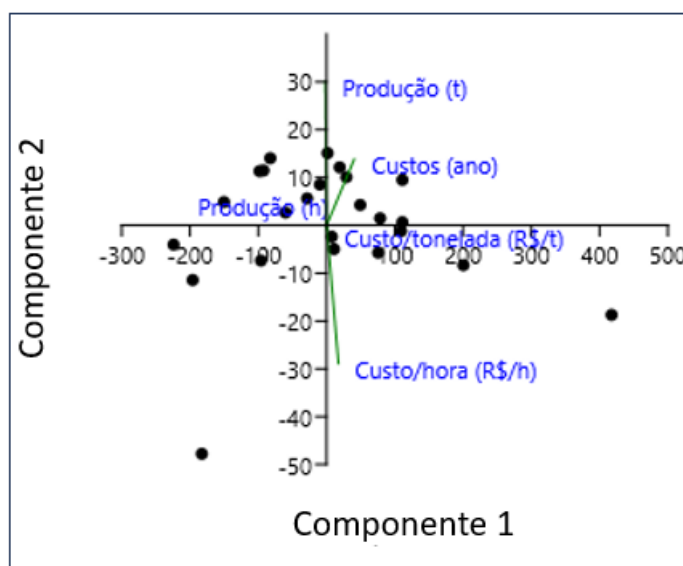
A análise de componentes principais (PCA) aplicada à colhedora John Deere CH570 revelou que o PC1, associado principalmente aos custos operacionais anuais e custos por hora, representa o principal fator de variabilidade no conjunto de dados. O PC2 destaca a relação entre a produção em toneladas e os custos por hora, enquanto o PC3 reflete variações complementares desses fatores. Componentes como o PC4 e o PC5 estão associados,

respectivamente, à disponibilidade operacional e aos custos unitários por tonelada. Por fim, o PC6 captura as informações relacionadas à produção em horas.

Os resultados obtidos estão alinhados com estudos que destacam o uso da PCA como ferramenta para identificar fatores-chave em variáveis correlacionadas e reduzir a complexidade dos dados (Jolliffe; Cadima, 2016). No contexto da mecanização agrícola, a utilização de técnicas multivariadas é amplamente recomendada para avaliar indicadores de desempenho e custos operacionais de máquinas agrícolas, como as colhedoras de cana-de-açúcar (Banchi *et al.*, 2012 b). Além disso, a literatura técnica da John Deere reforça a importância da análise de dados para otimizar a operação e manutenção das colhedoras, aumentando a disponibilidade física e reduzindo os custos de produção (John Deere, 2023).

Os valores dos dois principais componentes, apresentados na Tabela 7, foram utilizados para a elaboração do gráfico de dispersão (Figura 6).

Figura 6 – Gráfico de dispersão para os componentes 1 e 2 dos dados obtidos da colhedora John Deere modelo CH570



Fonte:

O gráfico acima exibe os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) resultantes da aplicação da PCA. Esses componentes são eixos ortogonais que representam combinações lineares das variáveis originais e explicam a maior parte da variabilidade dos dados.

O componente 1, representado no eixo X, está fortemente associado às variáveis “Produção (t)” e “Custos (ano)”. Isso indica que a variabilidade capturada por este componente está ligada principalmente à quantidade total produzida e aos custos anuais da operação. Além disso, pode indicar que melhorias na eficiência operacional poderiam reduzir essa correlação.

O componente 2, representado no eixo Y, este componente tem maior contribuição da variável “Custo/hora (R\$ h⁻¹)”, refletindo a influência dos custos operacionais por hora na variabilidade dos dados. A variável Custo/hora (R\$ h⁻¹) se destaca como independente em relação à produção, sugerindo que fatores específicos de custo operacional por hora devem ser avaliados separadamente.

A relação Custo/tonelada (R\$ t⁻¹) apresenta um vetor mais curto, sugerindo que sua influência é menor em ambos os componentes. A menor influência de Custo/tonelada (R\$ t⁻¹) nos componentes principais sugere que este pode ser uma variável derivada das outras ou que sua variabilidade é menor.

Além das avaliações efetuadas no PAST, notou-se que, ao longo do tempo, as colhedoras apresentam uma diminuição na eficiência em horas de trabalho, resultando, por conseguinte, em uma queda na produção. Para garantir a disponibilidade mecânica, o investimento financeiro se torna mais elevado, como evidenciado pelo exemplo de uma colhedora de cada tipo da empresa, conforme ilustrado na Tabela 8 .

Tabela 8 – Acompanhamento das colhedoras indicando o aumento expressivo nos custos por hora e custos por tonelada

Equipamento	Modelo	Ano	Produção (h)	Produção (t)	Custos (ano)	Disponibilidade (%)	Custo/tonelada (R\$ t ⁻¹)	Custo/hora (R\$ h ⁻¹)
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 1	3.376	141.159	198.141	80,7	1,40	58,70
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 2	2.754	96.495	356.536	81,2	3,69	129,45
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 3	2.431	98.691	158.401	66,1	1,61	65,16
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 4	1.874	73.501	766.715	64,5	10,43	409,09
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 5	2.700	102.902	602.269	83,5	5,85	223,07
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 6	2.403	89.790	599.087	86,1	6,67	249,28
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 7	2.258	77.642	499.400	85,2	6,43	221,17
802001	Colhedora JD 3520 342 CV	Ano 8	2.271	90.242	401.732	81,3	4,45	176,89
802016	Colhedora JD CH570 342 CV	Ano 1	2.758	108.156	198.549	91,2	1,84	71,99
802016	Colhedora JD CH570 342 CV	Ano 2	2.907	110.811	376.986	88,5	3,40	129,66
802016	Colhedora JD CH570 342 CV	Ano 3	2.669	99.710	485.445	86,9	4,87	181,90
802016	Colhedora JD CH570 342 CV	Ano 4	2.297	88.543	755.537	77,3	8,53	328,89

Fonte:

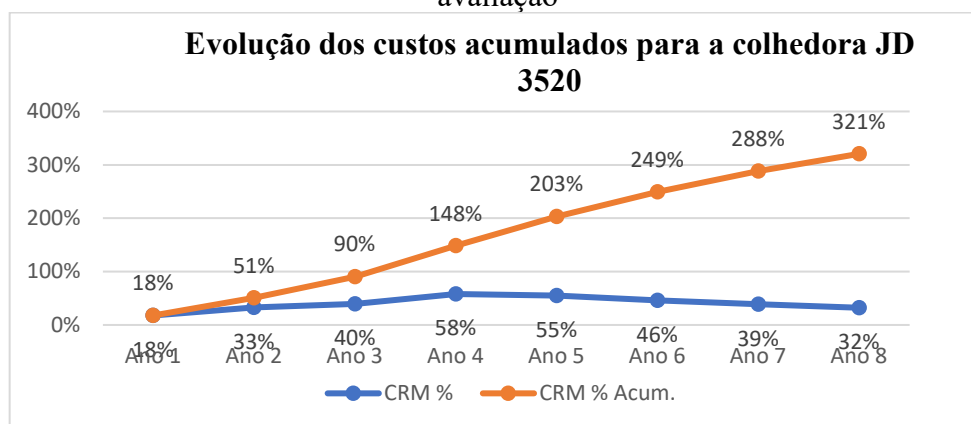
A análise dos dados das colhedoras JD 3520 e JD CH570 evidencia uma variação significativa nos custos operacionais e na produção ao longo dos anos. Para a colhedora JD 3520, nota-se que, enquanto a produção em toneladas (t) apresenta uma tendência de redução ao longo dos anos, os custos anuais aumentam consideravelmente. Essa relação é especialmente evidente a partir do ano 4, quando a produção diminuiu para 73.501 toneladas, mas os custos anuais aumentaram para R\$ 766.715, resultando em um custo por tonelada (R\$ t⁻¹) de 10,43 e um custo por hora (R\$ h⁻¹) de 409,09. Esses números refletem um declínio na eficiência econômica e operacional, possivelmente devido à maior idade do equipamento ou a um aumento nos custos de manutenção e operação.

A colhedora JD CH570 apresenta um comportamento semelhante em relação aos custos crescentes e à produção decrescente nos últimos anos analisados. No ano 4, por exemplo, a produção totalizou 88.543 toneladas, enquanto os custos anuais atingiram R\$ 755.537, resultando em um custo por tonelada (R\$ t⁻¹) de 8,53 e um custo por hora (R\$ h⁻¹) de 328,89. Apesar de apresentar maior disponibilidade operacional em comparação à JD 3520, o aumento nos custos operacionais também impacta negativamente a eficiência econômica desta colhedora.

Essa tendência indica que, com o passar dos anos, os custos de operação das colhedoras aumentam de forma desproporcional à produção, destacando a importância de estratégias de manutenção preventiva e renovação de frota para mitigar perdas econômicas e operacionais. Conforme Grejjanin (2014), a relação custo-benefício de máquinas agrícolas está diretamente condicionada ao tempo de uso, aos gastos com manutenção e à eficiência operacional. Assim, o monitoramento contínuo e a substituição programada de equipamentos antigos são medidas fundamentais para garantir a sustentabilidade técnica e econômica das operações agrícolas.

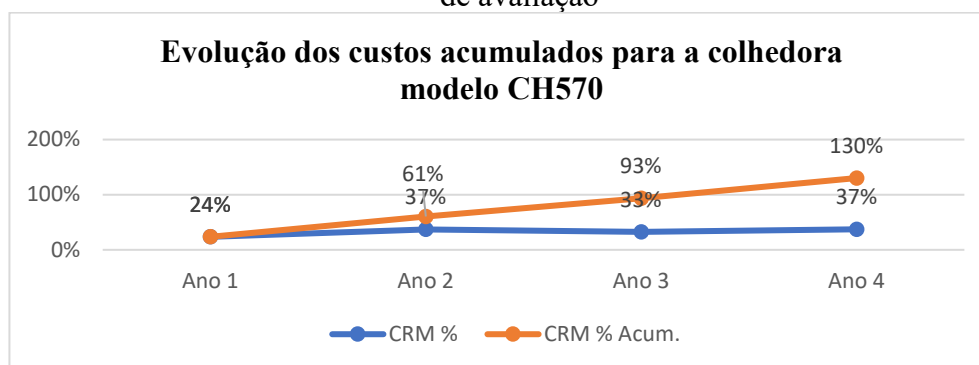
Elaborou-se dois gráficos representativos dos custos acumulados das colhedoras, em que se verifica a proporção desses custos em cada ano de produção, em relação a um ativo novo, conforme ilustram a Figura 7 e a Figura 8.

Figura 7 – Evolução dos custos acumulados para a colhedora JD 3520 ao longo dos anos de avaliação



Fonte:

Figura 8 – Evolução dos custos acumulados para a colhedora JD CH570 ao longo dos anos de avaliação



Fonte:

Na Figura 7 nota-se a evolução dos custos acumulados (CRM % Acum.) e anuais (CRM %) da colhedora JD 3520 ao longo de oito anos. Observa-se que os custos acumulados aumentam progressivamente, atingindo 321% do valor inicial no oitavo ano, evidenciando um crescimento contínuo e significativo com o passar das safras. Em contraste, os custos anuais apresentam uma variação menos expressiva, com um pico de 58% no quarto ano, seguido por uma redução gradual até 32% no oitavo ano.

Essa tendência reflete o impacto do envelhecimento do equipamento nos custos operacionais e reforça a importância da renovação da frota ou de práticas robustas de gestão de manutenção para mitigar o aumento dos custos a longo prazo.

A Figura 8 ilustra a evolução dos custos anuais (CRM %) e acumulados (CRM % Acum.) da colhedora CH570 ao longo de quatro anos de operação. Observa-se que os custos acumulados apresentam um crescimento contínuo, atingindo 130% no quarto ano, refletindo o impacto financeiro progressivo associado ao uso prolongado do equipamento. Em contraste, os

custos anuais demonstram relativa estabilidade, variando entre 24% no primeiro ano e 37% no segundo e no quarto anos, com uma ligeira redução para 33% no terceiro ano.

Essa dinâmica evidencia a necessidade de práticas robustas de manutenção e gestão de ativos para mitigar o aumento dos custos a longo prazo e otimizar a eficiência operacional. A análise destaca a importância de um planejamento estratégico voltado à renovação da frota e à redução de despesas operacionais acumuladas. Conforme apontado por Banchi (2013), o custo operacional de uma colhedora tende a aumentar proporcionalmente ao prolongamento de sua vida útil. Essa tendência é evidente na análise do modelo CH570, em que os custos anuais representam 98% da variância explicada pelo primeiro componente principal (PCA), destacando a significativa influência desses custos na gestão do ativo ao longo do tempo.

A norma ISO 55000 (2014) estabelece diretrizes para monitorar o desempenho de ativos, implementar processos eficazes de aquisição, operação, manutenção, descarte e otimização, além de promover continuamente melhorias nas práticas de gestão. Nesse contexto, sua aplicação poderia ter evitado a permanência de colhedoras com mais de 5 safras de uso, considerando que os custos de manutenção para uma nova safra ultrapassam 55% do valor de aquisição de um equipamento novo.

6 CONCLUSÃO

A análise PCA destaca os custos operacionais como o maior peso no desempenho da colhedora JD 3520, enquanto fatores adicionais no CP2 fornecem informações complementares para a gestão eficiente do equipamento. A análise reforça a importância de monitorar os custos e a produtividade, permitindo identificar oportunidades para otimização e tomada de decisões estratégicas.

A análise PCA para a colhedora JD CH570 destaca os custos anuais como a principal variável de impacto, sendo essencial para a tomada de decisões estratégicas. A predominância do CP1 sugere que ações voltadas para a redução e o controle dos custos operacionais podem gerar os maiores benefícios. Além disso, as contribuições menores dos demais componentes podem ser utilizadas para ajustes específicos e para identificar oportunidades de otimização

Com base nesses fatores, o momento ideal para a troca da colhedora JD 3520 seria ao final do terceiro ano ou no início do quarto ano, antes que os custos anuais aumentem drasticamente e a disponibilidade caia ainda mais. Esse momento coincide com o ponto em que os custos operacionais se tornam inviáveis em relação à produção obtida.

Para a colhedora JD CH570, a troca poderia ser avaliada no final do terceiro ano, já que os custos por tonelada (R\$ t⁻¹) e por hora (R\$ h⁻¹) começam a subir significativamente, e a disponibilidade operacional cai de 88,5% no segundo ano e para 77,3% no quarto ano. Portanto, avaliar a relação custo-benefício nesse período ajudaria a tomar uma decisão mais estratégica.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR ISO 55000: 2014. **Gestão de ativos: visão geral, princípios e terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira.** [S. l.], 2024. Disponível em: ANFAVEA-ANUARIO-DIGITAL-2024_compressed.pdf. Acesso em: 05 mar. 2024.
- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 4, p. 433-459, 2010.
- BANCHI, Â. D.; GARCIA, A. P.; GRESPAN, A.; ALBIERO, D.; FAVARIN, L. G. A.; GALVÃO, C. B. Operating cost of sugarcane harvester in function of agricultural productivity and harvester age. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 7, p. 552-557, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n7p552-557>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- BANCHI, A. D.; LOPES, J. R.; FERREIRA, V. A. C.; SCARANELLO, L. T. Análise de reforma de colhedora de cana. **Revista Agrimotor**, [s. l.], p. 40-43, 2012 a.
- BANCHI, A. D.; TEIXEIRA, M. M.; RAMOS, P. A. Capacidade Operacional de colhedoras de cana-de-açúcar: Modelagem matemática em função da produtividade agrícola e da vida da máquina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 858-865, 2012 b.
- BANCHI, A. D.; LOPES, J. R.; ALBULQUERQUE, R. de la F. Gestão de mecanização: frota e operações agrícolas. **Revista Agrimotor**, [s. l.], p. 9-13, 2013.
- BARTKOWSKI, D.; BARTKOWSKA, A. Wear resistance in the soil of Stellite-6/WC coatings produced using laser cladding method. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, London, v. 64, p. 20-26, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.12.013>.
- BOCHTIS, D. D.; SØRENSEN, C. G. C.; BUSATO, P. Advances in agricultural machinery management: A review. **Biosystems Engineering**, London, v. 126, p. 69-81, 2014.
- BOLFE, E. L.; BARBEDO, J. G. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; SOUZA, K. X. S.; ASSAD, E. D. Desafios, tendências e oportunidades em agricultura digital no Brasil. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S. (org.) **Agricultura Digital: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação nas Cadeias Produtivas.** Brasília: Embrapa, 2020. Cap. 16, p. 380-401.
- CASTRO, N. R.; GILIO, L.; MACHADO, G. C. Impactos da mecanização na produtividade agrícola agregada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo de 2007 a 2013. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 60, n. 2, e235496, 2022.
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** v. 11, safra 2023/24, n. 3. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>. Acesso em: 05 mar. 2024.

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business.** Oxford: Capstone, 1997.

EVANGELISTA, R.; VEZZANI, A. The economic impact of technological and organizational innovations: A firm-level analysis. **Research Policy**, Amsterdam, v. 39, n. 10, p. 1253-1263, 2010.

GREJIANIN, R. L. **Estudo da viabilidade econômica de tratores agrícolas.** 2014. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Agronegócio) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/46541>. Acesso em: 10 jan. 2025.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate data analysis.** 7th. ed. [S. l.]: Pearson Education, 2014.

HERRANZ-MATEY, I.; RUIZ-GARCIA, L. A new method and model for the estimation of residual value of agricultural tractors. **Agriculture**, Basel, v. 13, n. 2, art. 409, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020409>.

HUNT, D. R. **Farm power and machinery management.** [S. l.]: Iowa State Press, 2001.

JOHN DEERE. **Análise de dados para otimização da operação e manutenção de colhedoras.** Literatura técnica John Deere. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.deere.com.br>. Acesso em: 5 jan. 2025.

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: A review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, London, v. 374, p. 20150202, 2016.

KAYIKCI, Y. Sustainability impact of digitization in logistics. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 21, p. 782-789, 2018.

KIEHBADROUDINEZHAD, M.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; SHEIKH AHMAD TAJUDDIN, S. A. F.; TABATABAEI, M.; AGBASHLO, M. A critical review of life cycle assessment of renewable agricultural systems. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 73, p. 104100, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104100>.

LEE, H-J. The Application of Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) Middleware in Agriculture. **Journal of Electrical Systems**, Noisy le Grand, v. 20, supl. 4, p. 125-131, 2024. <https://doi.org/10.52783/jes.1861>.

LIAKOS, K. G.; BUSATO, P.; MOSHOU, D.; PEARSON, S.; BOCHTIS, D. Machine learning in agriculture: a review. **Sensors**, Basel, v. 18, n. 8, p. 2674, 2018.

LIMA, A. A. **Uma metodologia para a determinação do ponto econômico de substituição de equipamentos de transporte.** 2002. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/8387>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MALVAJERDI, A. S. Wear and coating of tillage tools: A review. **Heliyon**, London, v. 9, n. 6, e16669, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16669>.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. 2nd. ed. Burlington: Elsevier, 2002.

NASCIMENTO, D. C.; RAMOS, P. L.; ENNES, A.; COCOLO, C.; NICOLA, M. J.; ALONSO, C., RIBEIRO, L. G., & LOUZADA, F. A reliability engineering case study of sugarcane harvesters. **Gestão & Produção**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. e4569. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X4569-20>.

PACHAYAPPAN, M.; GANESHKUMAR, C.; SUGUNDAN, N. Technological implication and its impact in agricultural sector: An IoT Based Collaboration framework. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 171, p. 1166-1173, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.125>

PAGARE, V.; NANDI, S.; KHARE, D. K. Appraisal of Optimum Economic Life for Farm Tractor: A Case Study. **Economic Affairs**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 111-118, 2019. <https://doi.org/10.30954/0424-2513.1.2019.15>.

PAMAN, U.; KHAIRIZAL; SUTRIANA, S.; ZULHANAFIAH; PAMUNGKAS, A. B. Evaluation of operator's competence to operate and maintain farm machines in Riau Province, Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 1228, p. 012014, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1228/1/012014>.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Energia da cana-de-açúcar: doze anos de desenvolvimento tecnológico para uso eficiente**. São Paulo: Editora USP, 2009.

SCHENCK, R.; WHITE, P. **Environmental life cycle assessment: measuring the environmental performance of products**. Heidelberg: Springer, 2014.

SHUAI, C.-J.; ZHOU, S.; LI, R.-M. Evaluation analysis of agricultural management activities by principal component analysis method. **Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata)**, Buenos Aires, v. 37, n. 2, p. 571-577, 2020.

SPAUNHORST, D. J.; TODD, J. R.; HALE, A. L. Sugarcane cultivar response to glyphosate and trinexapac-ethyl ripeners in Louisiana. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 14, n. 6, p. e0218656, 2019.

TAO, F.; ZHANG, H.; LI, A.; LIU, Y. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 94, n. 9-12, p. 3563-3576, 2018.

TESTA, J. V.; LANÇAS, K. P.; MARTINS, M. B.; SANDI, J.; DRUDI, F. V. Desempenho operacional e energético de colhedoras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para uma e duas linhas da cultura. **Energia na Agricultura**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 253-258, 2016.

VILELA, R. A. G.; LAAT, E. F.; LUZ, V. G.; SILVA, A. J. N.; TAKAHASHI, M. A. C. Pressão por produção e produção de riscos: a “maratona” perigosa do corte manual da cana-

de-açúcar. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 40, n. 131, p. 30-48, 2015.

WANG, Y.; LI, D.; NIE, C.; GONG, P.; YANG, J.; HU, Z.; LI, B.; MA, M. Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery. **Materials**, London, v. 16, n. 24, p. 7646, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247646>.

WANG, X.; WU, Q.; ZENG, H.; YANG, X.; YANG, X.; YI, X.; KHALIL, I.; QUE, Y. Digital evolution and twin miracle of sugarcane breeding. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 318, p. 109588, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109588>.