



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

JOSE RODRIGO BARBOSA FERREIRA

**ANÁLISE DE ÓLEO COMO FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA EM UM
PULVERIZADOR AGRÍCOLA**

TUCURUÍ-PA

2026

JOSE RODRIGO BARBOSA FERREIRA

**ANÁLISE DE ÓLEO COMO FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA EM UM
PULVERIZADOR AGRÍCOLA**

Trabalho de curso apresentado como requisito parcial para
obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica, pela
Universidade Federal do Pará

Orientador: Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado

TUCURUÍ-PA

2026

JOSE RODRIGO BARBOSA FERREIRA

ANÁLISE DE ÓLEO COMO FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA EM UM PULVERIZADOR AGRÍCOLA

Trabalho de curso apresentado como requisito parcial para
obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica, pela
Universidade Federal do Pará

Orientador: Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado

Data de aprovação: 17/07/2026

Conceito: Excelente

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MACIEL DA COSTA FURTADO**
Data: 27/07/2026 14:37:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **JESSE LUIS PADILHA**
Data: 27/07/2026 15:43:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a)

Prof. Dr. Jessé Luís Padilha
NDAE/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **WASSIM RAJA EL BANNA**
Data: 27/07/2026 14:42:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a)

Prof. Dr. Wassim Raja El Banna
NDAE/CAMTUC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança durante toda esta caminhada. Foi por meio de Sua graça que encontrei coragem para superar os desafios, aprender com as dificuldades e concluir mais esta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais, José Roberto do Carmo Ferreira e Marinilda Rodrigues Barbosa, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor, dedicação, incentivo e pelos ensinamentos que moldaram meu caráter. Obrigado por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis e por sempre me apoiarem na busca pelos meus objetivos. Esta conquista também pertence a vocês.

À minha irmã, Mayra Jaquelyny Barbosa Ferreira, pelo carinho, amizade, incentivo e por sempre estar presente ao longo dessa jornada. Sua companhia e apoio foram fundamentais para que eu permanecesse firme em busca dos meus sonhos.

Aos meus amigos, em especial Alex, Ivan, Larisse, Benivaldo, Felipe, Mateus e Paloma, agradeço pela amizade, pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e pelos momentos compartilhados durante essa etapa da graduação. A presença de vocês tornou essa caminhada mais leve e inesquecível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado, minha sincera gratidão pela orientação, pela confiança, pela disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Suas contribuições, sugestões e incentivo foram essenciais para o aprimoramento desta pesquisa e para minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço também a todos os professores da Universidade Federal do Pará que, ao longo da graduação, contribuíram para minha formação por meio dos conhecimentos transmitidos, da dedicação ao ensino e do compromisso com a educação.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e fizeram parte desta importante etapa da minha vida. Levo comigo os ensinamentos, as amizades construídas e a certeza de que esta conquista representa apenas o início de uma nova jornada.

RESUMO

A crescente utilização de máquinas agrícolas de elevada complexidade tecnológica tem aumentado a necessidade de técnicas capazes de monitorar a condição dos equipamentos e subsidiar decisões de manutenção de forma mais eficiente. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva em um pulverizador agrícola, visando identificar precocemente indícios de desgaste nos componentes mecânicos e verificar sua contribuição para o planejamento das intervenções de manutenção. A metodologia consistiu na realização da primeira campanha de monitoramento por análise de óleo do equipamento, com coleta de amostras dos compartimentos motor, sistema hidráulico e comandos finais, encaminhadas para um laboratório especializado, onde foram realizadas análises espectrométricas e físico-químicas dos lubrificantes. Os resultados evidenciaram concentrações elevadas de metais de desgaste e valores elevados do Índice PQI nos comandos finais traseiros, indicando desgaste prematuro desses compartimentos. Posteriormente, a inspeção mecânica realizada pela assistência técnica autorizada confirmou o desgaste dos componentes internos, validando o diagnóstico obtido por meio da análise de óleo. Além disso, a identificação antecipada da anomalia possibilitou que a intervenção fosse realizada ainda durante o período de garantia do fabricante, reduzindo significativamente o valor efetivamente desembolsado pela empresa em relação ao orçamento integral do reparo. Conclui-se que a análise de óleo lubrificante constitui uma ferramenta eficiente para o monitoramento da condição de máquinas agrícolas, permitindo identificar precocemente processos de desgaste, direcionar inspeções mecânicas, subsidiar o planejamento da manutenção e contribuir para o aumento da confiabilidade e da disponibilidade operacional dos equipamentos.

Palavras-chave: Tribologia. Monitoramento da condição. Desgaste mecânico. Diagnóstico de falhas. Comandos finais.

ABSTRACT

The increasing use of technologically advanced agricultural machinery has intensified the need for techniques capable of monitoring equipment condition and supporting more efficient maintenance decision-making. In this context, the present study aimed to evaluate the application of lubricating oil analysis as a predictive maintenance tool for an agricultural sprayer, with the purpose of identifying early signs of wear in mechanical components and assessing its contribution to maintenance planning. The methodology consisted of the first oil monitoring campaign carried out on the equipment, involving the collection of oil samples from the engine, hydraulic system, and final drives, which were sent to a specialized laboratory for spectrometric and physicochemical analyses. The results revealed high concentrations of wear metals and elevated Particle Quantifier (PQI) Index values in the rear final drives, indicating premature wear in these compartments. Subsequently, a mechanical inspection performed by an authorized John Deere service team confirmed the wear of the internal components, validating the diagnosis obtained through oil analysis. Furthermore, the early detection of the anomaly allowed maintenance to be performed while the equipment was still under the manufacturer's warranty, significantly reducing the amount effectively paid by the company compared to the total repair estimate. It is concluded that lubricating oil analysis is an effective condition monitoring tool for agricultural machinery, enabling the early identification of wear processes, supporting mechanical inspections, improving maintenance planning, and contributing to increased equipment reliability and operational availability.

Keywords: Tribology. Condition monitoring. Mechanical wear. Fault diagnosis. Final drives.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Custos de manutenção	17
Figura 2 - Pulverizador M4040	22
Figura 3 - Frasco para armazenamento da amostra	23
Figura 4 - Bomba de coleta	24
Figura 5 - Ficha da amostra	24
Figura 6 - Procedimento de coleta.....	25
Figura 7 - Amostras pronta para envio	26
Figura 8 - Carcaça do cubo desgastada	31
Figura 9 - Rolamento cônico desgastado.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos metálicos presentes nas amostras.....	29
Tabela 2 - Contaminantes	32
Tabela 3 - Comparação entre o orçamento integral do reparo e o custo efetivamente pago pela empresa	33

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier)
ISO	International Organization for Standardization
PQI	Particle Quantifier Index
ppm	Partes por milhão
SAE	Society of Automotive Engineers
TBN	Total Base Number
TAN	Total Acid Number

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo geral.....	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Tipos de manutenção.....	13
2.1.1	Manutenção corretiva	13
2.1.2	Manutenção preventiva	14
2.1.3	Manutenção preditiva	15
2.1.4	Comparativo técnico e econômico da manutenção preditiva baseada na análise de óleo.....	17
3	METODOLOGIA	22
3.1	Caracterização da pesquisa	22
3.2	Caracterização do equipamento	22
3.3	Materiais utilizados	23
3.4	Procedimentos de coleta.....	25
3.5	Envio das amostras para análise laboratorial	26
3.6	Critérios para interpretação dos resultados	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	Análise dos componentes de desgastes.....	29
4.2	Análise dos contaminantes.....	32
4.3	Comparação dos custos.....	33
5	CONCLUSÃO	35
6	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola tem desempenhado papel fundamental na modernização do setor agropecuário, contribuindo para o aumento da produtividade, eficiência operacional e qualidade das atividades realizadas no campo. Com a evolução da agricultura e a crescente demanda por produção em larga escala, surgiu a necessidade de se obter maquinários cada vez mais eficientes, capazes de otimizar as operações de plantio, manejo e colheita. Nesse contexto, equipamentos como adubadoras, plantadeiras, tratores, pulverizadores e colheitadeiras passaram a ser amplamente utilizados, permitindo maior precisão nas operações agrícolas e redução do tempo necessário para execução das atividades (SENSIX, 2024).

Entretanto, a intensificação do uso dessas máquinas também aumenta a necessidade de estratégias de manutenção capazes de garantir confiabilidade operacional e evitar paradas não planejadas. Nesse cenário, a manutenção preditiva tem se consolidado como uma importante ferramenta de gestão na área de manutenção, pois permite monitorar o estado dos equipamentos por meio de técnicas de diagnóstico, possibilitando a identificação antecipada de falhas e a tomada de decisões mais assertivas (KARDEC; NASCIF, 2019).

Entre as técnicas utilizadas na manutenção preditiva, a análise de óleo lubrificante se destaca por permitir o monitoramento indireto das condições internas de motores e sistemas mecânicos. A partir da avaliação físico-química do lubrificante e da identificação de partículas de desgaste, é possível detectar processos anormais de atrito, contaminações e degradação do óleo, indicando possíveis falhas em componentes internos antes que ocorram danos mais severos ao equipamento (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o óleo lubrificante utilizado em um pulverizador agrícola, buscando identificar possíveis indícios de falhas mecânicas. A partir da análise do óleo lubrificante será possível identificar anomalias relacionadas ao desgaste de componentes e possíveis problemas operacionais do equipamento. A partir dos resultados obtidos, busca-se demonstrar a importância da análise de óleo como ferramenta de apoio à manutenção preditiva na gestão de máquinas agrícolas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a utilização da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva em um pulverizador agrícola, identificando possíveis desgastes e condições de funcionamento dos componentes mecânicos do equipamento.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar a presença de contaminantes e partículas metálicas provenientes do desgaste de componentes;
- Interpretar os resultados obtidos nas análises laboratoriais;
- Avaliar a eficácia da análise de óleo como ferramenta de manutenção preditiva em máquinas agrícolas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O agronegócio brasileiro tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos, refletindo o avanço tecnológico e a intensificação da mecanização agrícola. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2026), a produção brasileira de cereais, leguminosas e oleaginosas atingiu 346,1 milhões de toneladas em 2025, estabelecendo um novo recorde histórico. Esse cenário evidencia a importância da eficiência operacional e da confiabilidade dos equipamentos agrícolas para sustentar altos níveis de produtividade.

Os sistemas mecanizados estão continuamente sujeitos a processos de desgaste ao longo de sua vida útil, o que impacta diretamente sua confiabilidade, desempenho e disponibilidade operacional, falhas não previstas tendem a ocasionar paradas abruptas, resultando em prejuízos econômicos significativos e perdas no tempo produtivo, evidenciando a criticidade da gestão da manutenção. Nesse sentido, para assegurar níveis adequados de eficiência e produtividade, torna-se indispensável que os ativos operem sob condições ideais de funcionamento. Assim, ao longo de sua utilização, os equipamentos demandam a execução de estratégias de manutenção bem definidas, incluindo inspeções sistemáticas, intervenções preventivas programadas, substituição de componentes desgastados, renovação de lubrificantes, além de procedimentos de limpeza e recuperação estrutural, com o objetivo de minimizar falhas, prolongar a vida útil dos sistemas e garantir maior confiabilidade operacional. (IWASAKI, 2022)

2.1 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Segundo KARDEC E NASCIF (2009) a manutenção é composta por seis principais tipos, são elas: Manutenção corretiva não planejada; Manutenção corretiva planejada; Manutenção preventiva; Manutenção preditiva; manutenção detectiva e Engenharia de manutenção. Algumas ferramentas para aplicação da manutenção e aumento da confiabilidade foram desenvolvidas para melhor aplicação desses tipos de manutenção as principais ferramentas são: Manutenção preditiva total (TPM); Manutenção centrada em confiabilidade (RCM); Manutenção baseada em confiabilidade (RBM).

2.1.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva caracteriza-se como a intervenção executada após a ocorrência de uma falha ou quando o equipamento deixa de desempenhar a função para a qual foi projetado. Segundo Kardec e Nascif (2009), essa estratégia pode ser classificada em corretiva planejada e corretiva não planejada, diferenciando-se pela existência ou não de planejamento prévio para a realização da intervenção.

No contexto da mecanização agrícola, a manutenção corretiva está presente principalmente em equipamentos submetidos a condições severas de operação, como tratores, pulverizadores, colhedoras e plantadeiras. Esses equipamentos trabalham continuamente em ambientes com elevada presença de poeira, umidade, impactos mecânicos e grandes variações de carga, fatores que aceleram o desgaste de componentes como rolamentos, engrenagens, mancais, sistemas hidráulicos e transmissões. Quando não há monitoramento adequado das condições de operação, esses componentes podem apresentar falhas inesperadas, ocasionando paradas durante períodos críticos da safra e comprometendo a produtividade das operações agrícolas. Conforme destacam Iwasaki (2022) e Galé (2019), falhas em comandos finais, motores, redutores e sistemas hidráulicos frequentemente resultam em manutenções corretivas de elevado custo, especialmente quando não são identificadas em seus estágios iniciais.

A manutenção corretiva planejada ocorre quando o monitoramento das condições do equipamento permite identificar um desgaste ou uma anomalia antes da perda total da função. Nessa situação, a intervenção pode ser programada, possibilitando melhor gerenciamento dos recursos, menor tempo de parada e redução dos custos de manutenção. Já a manutenção corretiva não planejada caracteriza-se pela ocorrência súbita da falha, exigindo intervenção imediata e, frequentemente, ocasionando indisponibilidade do equipamento em períodos de elevada demanda operacional, situação bastante crítica em atividades agrícolas sazonais, nas quais atrasos podem comprometer a eficiência da produção (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.1.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A manutenção preventiva consiste em um conjunto de ações sistemáticas e programadas, realizadas em equipamentos que ainda se encontram em condições operacionais adequadas, com o propósito de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas e prolongar sua vida útil. Fundamenta-se na definição de intervalos predeterminados, estabelecidos com base em critérios como tempo de operação, número de ciclos, quilometragem ou recomendações do fabricante. De acordo com Kardec (2009) e Viana (2002), essa estratégia busca minimizar a incidência de quebras inesperadas por meio de intervenções previamente planejadas. Embora possa implicar substituição de componentes antes do término de sua vida útil — o que representa custos diretos adicionais —, a manutenção preventiva contribui significativamente para o aumento da confiabilidade do sistema, melhoria da previsibilidade operacional e redução de falhas críticas, conforme argumentam Branco Filho (2008) e Xenos (2004).

Nas máquinas agrícolas, a manutenção preventiva é normalmente baseada em intervalos de horas trabalhadas estabelecidos pelos fabricantes. Em pulverizadores autopropelidos, por exemplo, são realizadas trocas periódicas de óleo lubrificante, substituição de filtros, inspeções dos sistemas hidráulicos, reaperto de fixações estruturais, verificação de folgas em rolamentos, inspeção de comandos finais, calibração dos sistemas de pulverização e avaliação do estado de mangueiras e conexões hidráulicas. Essas intervenções visam reduzir a probabilidade de falhas durante as operações agrícolas, aumentando a disponibilidade do equipamento e prolongando sua vida útil. Entretanto, embora eficiente, essa estratégia pode resultar na substituição prematura de componentes ainda em boas condições de funcionamento, razão pela qual muitas empresas vêm incorporando técnicas de manutenção preditiva baseadas no monitoramento da condição dos ativos (IWASAKI, 2022; GEREMIAS, 2024).

2.1.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva, constitui uma abordagem fundamentada no monitoramento sistemático de parâmetros operacionais para antecipar o momento adequado de intervenção nos ativos. De acordo com Xenos (1998), essa modalidade está inserida no escopo da manutenção preventiva e tem por finalidade otimizar a substituição de peças ou a reforma de componentes, permitindo que sejam utilizados até que se aproximem de seus limites de vida útil. Dutra (2019) complementa que a manutenção preditiva tem como principais objetivos determinar antecipadamente a necessidade de serviços de manutenção, eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção, aumentar o tempo de disponibilidade das máquinas, reduzir intervenções corretivas, impedir o aumento de danos, aproveitar a vida útil total dos componentes e aumentar o grau de confiabilidade dos equipamentos. Para alcançar tais objetivos, essa abordagem emprega técnicas específicas que permitem o monitoramento contínuo ou periódico das condições dos ativos, destacando-se a análise de vibração, a termografia, a análise de óleo e o ultrassom.

A análise de vibração é reconhecida como uma das mais completas para equipamentos rotativos, sendo capaz de identificar desbalanceamento de massa, desalinhamento e empenamento de eixos, desgaste de rolamentos e engrenagens, folgas, problemas estruturais, lubrificação deficiente e falhas elétricas em motores. A termografia, por sua vez, permite identificar, monitorar e registrar alterações nos níveis de temperatura de componentes, gerando imagens térmicas que auxiliam na detecção de pontos quentes em equipamentos elétricos e mecânicos, bem como em sistemas de isolamento. A análise de óleo lubrificante atua de forma análoga a um exame de sangue para as máquinas, revelando contaminações, oxidação, degradação de aditivos, desgaste de componentes mecânicos como engrenagens e rolamentos, desalinhamentos e problemas em

mancais de deslizamento. Por fim, a técnica de ultrassom é eficaz na detecção de vazamentos em sistemas de ar comprimido, vapor e outros gases, além de descargas elétricas e defeitos mecânicos incipientes, contribuindo para a economia de energia e a prevenção de paradas inesperadas Dutra (2019). Xenos (2004) também destaca a importância do monitoramento de temperatura e da inspeção visual como práticas complementares no contexto da manutenção preditiva.

Os resultados apresentados por Carvalho (2021) demonstram que a utilização da análise de óleo lubrificante como parte da manutenção preditiva proporciona maior disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos ao permitir o monitoramento contínuo das condições do lubrificante e dos componentes mecânicos internos. O estudo evidencia que a avaliação periódica de parâmetros como viscosidade, presença de água, contaminantes, desgaste do conjunto mecânico e concentração de aditivos fornece suporte técnico para intervenções planejadas, reduzindo a necessidade de ações corretivas não programadas e favorecendo decisões mais assertivas no processo de manutenção. Além disso, o autor destaca que a utilização de banco de dados e acompanhamento histórico dos resultados possibilita identificar a evolução de anomalias, melhorar a gestão das intervenções e otimizar o desempenho operacional dos equipamentos (CARVALHO, 2021).

Os resultados apresentados por Cavalcante Júnior e Couras (2024) demonstram que a aplicação da manutenção preditiva por meio da análise de óleo em uma frota de equipamentos pesados permitiu identificar diferentes níveis de criticidade nos componentes monitorados, direcionando intervenções mais assertivas e reduzindo o risco de falhas operacionais. O estudo evidenciou que a análise possibilitou a identificação precoce de desgastes, contaminações externas e inadequações na lubrificação, favorecendo a execução de ações corretivas planejadas antes da ocorrência de falhas severas. Entre os resultados observados, verificou-se a execução de 63% dos planos de ação definidos durante o período analisado, além da recuperação das condições operacionais dos ativos por meio de intervenções direcionadas, como substituição de vedações, troca correta do lubrificante e eliminação de fontes de contaminação. Os autores também destacam ganhos econômicos significativos, indicando economia aproximada de 80% quando comparados os custos das intervenções planejadas com os custos potenciais de manutenções corretivas não programadas, reforçando a viabilidade técnica e econômica da análise de óleo como ferramenta de apoio à gestão da manutenção preditiva (CAVALCANTE JÚNIOR; COURAS, 2024).

2.1.4 COMPARATIVO TÉCNICO E ECONÔMICO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA BASEADA NA ANÁLISE DE ÓLEO.

A comparação entre as diferentes estratégias de manutenção demonstra que a escolha da política adotada influencia diretamente os custos operacionais e a disponibilidade dos equipamentos. Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva não planejada apresenta os maiores custos, enquanto a manutenção preditiva associada à corretiva planejada apresenta melhor desempenho econômico, podendo representar custos significativamente menores quando comparada às demais modalidades. Na figura 1, observa-se que a evolução das práticas de manutenção está relacionada ao aumento dos resultados operacionais e à redução progressiva dos custos globais do sistema (KARDEC; NASCIF, 2009).

Figura 1 - Custos de manutenção



Fonte: Kardec e Nascif (2009)

No contexto da mecanização agrícola, Iwasaki (2022) investigou a utilização da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva em máquinas agrícolas de uma usina sucroalcooleira, envolvendo equipamentos empregados nas operações de produção, como colhedoras de cana-de-açúcar, tratores, pulverizadores e caminhões. O autor destaca que o monitoramento periódico do lubrificante possibilita identificar precocemente partículas provenientes do desgaste dos componentes internos, bem como contaminantes capazes de comprometer a confiabilidade dos equipamentos, permitindo que as intervenções de manutenção sejam planejadas antes da ocorrência de falhas que resultem em paradas não programadas. Como estudo de caso, foi avaliada uma colhedora John Deere CH570, na qual os resultados das análises de óleo indicaram alterações compatíveis com desgaste anormal dos componentes internos do motor. A inspeção mecânica subsequente constatou desgaste no tucho hidráulico e no comando de

válvulas, sendo identificado que a ausência de um parafuso na tampa de válvulas ocasionou vazamento do óleo lubrificante e favoreceu a entrada de contaminantes externos, comprometendo a lubrificação do conjunto mecânico. A identificação antecipada dessa condição permitiu direcionar a manutenção para o componente afetado, evitando a continuidade da operação em condições inadequadas e possibilitando a execução de uma intervenção planejada. Na análise econômica desenvolvida pelo autor, verificou-se que a adoção da análise de óleo como ferramenta de monitoramento proporcionou uma redução de 44,1% nos custos de manutenção quando comparada à manutenção corretiva não planejada, além de contribuir para o aumento da disponibilidade operacional dos equipamentos e para uma gestão da manutenção baseada na condição real dos ativos, demonstrando a aplicabilidade e a viabilidade técnica dessa estratégia em máquinas agrícolas.

Galé (2019) avaliou a aplicabilidade da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva em máquinas agrícolas, por meio de estudos de caso realizados no motor de um trator John Deere 5075EF e de uma colhedora John Deere 3520. O monitoramento foi conduzido a partir da coleta periódica de amostras de óleo a cada 250 horas de operação, submetidas aos ensaios de espectrometria de emissão óptica e viscosidade cinemática, permitindo acompanhar a evolução dos metais de desgaste, dos contaminantes e das propriedades do lubrificante. No trator, o aumento das concentrações de ferro, silício e alumínio indicou contaminação do óleo por partículas provenientes do ambiente externo, direcionando a inspeção para o sistema de admissão de ar. A avaliação mecânica confirmou deformação da abraçadeira responsável pela vedação do sistema, possibilitando a entrada de poeira no motor e favorecendo o desgaste dos componentes internos. Na colhedora, a análise laboratorial também indicou contaminação e desgaste progressivo do motor, sendo constatados, durante a inspeção, o ressecamento e a ruptura da tampa do filtro de ar, além de danos no elemento filtrante, condições que permitiram a entrada de impurezas no sistema de admissão e comprometeram o desempenho de alguns cilindros do motor. Em ambos os estudos de caso, os resultados das análises de óleo orientaram as inspeções mecânicas e permitiram identificar a origem das anomalias antes da realização das intervenções, evidenciando que o monitoramento periódico do lubrificante fornece informações relevantes para o planejamento da manutenção e para a redução dos custos quando comparado às estimativas de manutenção corretiva apresentadas pelo autor

Em estudo desenvolvido por Cavalcante Júnior e Couras (2024), foi avaliada a implantação de um programa de manutenção preditiva baseado na análise de óleo em uma empresa de grande porte atuante nos segmentos de mineração, construção e pavimentação, localizada no estado do Rio Grande do Norte. A empresa possuía uma frota superior a 250 ativos, composta por máquinas

pesadas e caminhões, sendo monitorados inicialmente 33 equipamentos, correspondentes a aproximadamente 13% da frota, dos quais foram coletadas 110 amostras de óleo provenientes de diferentes compartimentos mecânicos entre julho e dezembro de 2023. O programa teve como objetivo avaliar as condições reais de operação dos equipamentos, identificar precocemente processos de desgaste e contaminação, além de subsidiar a definição de planos de ação para redução das manutenções corretivas não programadas. Para isso, as amostras foram coletadas durante as manutenções preventivas por meio de bomba de sucção e encaminhadas a laboratório especializado, responsável pela avaliação dos parâmetros físico-químicos do lubrificante, concentração de metais de desgaste, índice PQI, viscosidade e presença de contaminantes, classificando cada compartimento em quatro níveis de criticidade: Normal, Atenção, Anormal e Crítico. Os resultados demonstraram que 76,35% das amostras apresentaram algum tipo de anormalidade, sendo 52 classificadas como críticas, 28 como anormais, 4 em atenção e apenas 26 em condição normal, evidenciando a importância do monitoramento contínuo da condição dos sistemas lubrificados. Os autores verificaram que os compartimentos pertencentes ao sistema de transmissão, especialmente caixas de marcha, diferenciais, eixos dianteiros e traseiros, concentraram a maior parte das condições críticas, atribuídas principalmente à contaminação por água, partículas metálicas, silício, alumínio, ferro, cobre, alterações de viscosidade e elevado índice PQI, indicando desgaste acentuado dos componentes internos. A partir dessas informações, foram executados planos de ação que incluíram substituição de óleo, troca de retentores, juntas de vedação, respiros dos diferenciais e correção de falhas responsáveis pela entrada de contaminantes externos, sem que fosse necessária, em nenhum dos casos avaliados, a substituição completa dos conjuntos de engrenagens ou dos motores. Segundo Cavalcante Júnior e Couras (2024), a utilização da análise de óleo permitiu direcionar as intervenções para a causa raiz dos problemas, evitando substituições desnecessárias de componentes e reduzindo significativamente os custos de manutenção. Na comparação entre o custo das intervenções planejadas e o custo estimado de uma manutenção corretiva decorrente da falha dos componentes monitorados, os autores observaram uma economia aproximada de 80%, além do aumento da disponibilidade operacional dos equipamentos e da melhoria na confiabilidade da gestão da manutenção baseada na condição dos ativos.

No setor de mineração, Cardoso (2026) desenvolveu um estudo de caso com o objetivo de implantar um programa de monitoramento por análise de óleo no sistema de trem de força de uma escavadeira hidráulica utilizada em operações de extração mineral. O monitoramento contemplou os sistemas do motor, hidráulico, redutor de giro e comandos finais, por meio da análise sistemática das amostras de óleo, da avaliação de tendências dos parâmetros laboratoriais e da

comparação dos resultados com os limites técnicos recomendados pelos fabricantes. A partir dos resultados obtidos, o autor propôs novos limites operacionais, mais conservadores que aqueles originalmente utilizados pela empresa, buscando aumentar a confiabilidade do diagnóstico e melhorar a identificação precoce de processos de desgaste e contaminação do lubrificante. Além disso, o estudo demonstrou que a análise integrada dos parâmetros físico-químicos do óleo, dos metais de desgaste e dos contaminantes permite compreender de forma mais precisa o comportamento dos componentes monitorados, subsidiando decisões de manutenção baseadas na condição real dos equipamentos. Segundo Cardoso (2026), a padronização dos procedimentos de monitoramento e a utilização da análise de tendências contribuíram para tornar o processo de diagnóstico mais consistente, possibilitando intervenções planejadas antes da evolução de anomalias para condições críticas e evidenciando o potencial da análise de óleo como ferramenta para aumentar a confiabilidade e a disponibilidade operacional de equipamentos de mineração.

Carvalho (2021) desenvolveu um programa de manutenção preditiva baseado na análise de óleo lubrificante aplicado a máquinas de tração engrenadas de elevadores, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos equipamentos e fornecer maior respaldo técnico às decisões de manutenção. O trabalho propõe uma metodologia completa para implantação do monitoramento da condição, contemplando a padronização da coleta das amostras, a definição da periodicidade das análises, a seleção dos ensaios laboratoriais mais adequados e a criação de um sistema para armazenamento e acompanhamento histórico dos resultados. Entre os ensaios recomendados pela autora destacam-se a viscosidade cinemática, cor, ponto de fluidez, ponto de fulgor, corrosão em lâmina de cobre, teor de água e ferrografia, por serem capazes de avaliar simultaneamente a degradação do lubrificante, a presença de contaminantes e o desgaste dos componentes internos do sistema mecânico. A autora ressalta que a interpretação conjunta desses parâmetros permite identificar alterações nas condições de lubrificação, desgaste anormal e contaminação do óleo, fornecendo informações mais confiáveis para o planejamento das intervenções de manutenção. Além disso, o estudo demonstrou que a análise integrada dos parâmetros físico-químicos do óleo, dos metais de desgaste e dos contaminantes permite compreender de forma mais precisa o comportamento dos componentes monitorados, subsidiando decisões de manutenção baseadas na condição real dos equipamentos.

Silva Filho (2020) apresenta uma revisão técnica sobre a utilização da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva aplicada a sistemas automotivos e equipamentos de grande porte. O autor destaca que a interpretação conjunta dos parâmetros relacionados à contaminação, degradação do lubrificante e desgaste dos componentes permite identificar anomalias em estágios iniciais, subsidiando o planejamento das intervenções antes da

ocorrência de falhas catastróficas. O trabalho descreve os fundamentos da lubrificação, os principais mecanismos de desgaste, os procedimentos para coleta representativa das amostras e os métodos laboratoriais empregados no monitoramento da condição, enfatizando que a confiabilidade dos diagnósticos depende diretamente da padronização da amostragem e da análise histórica dos resultados. Além disso, o autor apresenta critérios para definição de limites de ação, baseados em tendências estatísticas dos parâmetros monitorados, permitindo classificar a severidade das anomalias e estabelecer níveis de alerta e criticidade para apoio à tomada de decisão. O estudo também relaciona os principais elementos metálicos encontrados nas análises com os componentes mecânicos correspondentes, possibilitando identificar a origem do desgaste em motores, transmissões, engrenagens e sistemas hidráulicos. Como conclusão, Silva Filho (2020) afirma que a análise de óleo constitui uma das principais ferramentas da manutenção preditiva por possibilitar a detecção antecipada de processos de degradação, contaminação e desgaste, contribuindo para o aumento da confiabilidade operacional, redução de custos de manutenção e melhor planejamento das intervenções.

A comparação entre os diferentes estudos evidencia que, independentemente do setor de aplicação, os benefícios proporcionados pela análise de óleo apresentam elevada convergência. Em máquinas agrícolas, a técnica demonstrou expressiva redução dos custos de manutenção e do tempo de indisponibilidade dos equipamentos. Em equipamentos pesados utilizados na construção civil, mineração e pavimentação, possibilitou identificar diferentes níveis de criticidade, direcionar intervenções específicas e reduzir significativamente os custos associados às falhas. Na mineração, mostrou-se eficiente para estruturar programas de monitoramento contínuo do trem de força de escavadeiras hidráulicas, aumentando a confiabilidade operacional e permitindo o acompanhamento da evolução do desgaste dos componentes. Já nos sistemas automotivos e máquinas pesadas, consolidou-se como uma ferramenta capaz de fornecer diagnósticos precisos sobre o estado dos equipamentos, orientando a tomada de decisão baseada na condição dos ativos.

Em conjunto, os estudos analisados demonstram que a análise de óleo lubrificante ultrapassa a função tradicional de avaliar apenas as condições do lubrificante, consolidando-se como uma importante ferramenta de diagnóstico da saúde dos componentes mecânicos. A identificação precoce de partículas de desgaste, contaminantes e alterações nas propriedades físico-químicas do óleo permite antecipar falhas, otimizar o planejamento das intervenções, reduzir custos de manutenção, aumentar a disponibilidade dos equipamentos e elevar a confiabilidade operacional. Esses resultados reforçam a importância da análise de óleo como uma das principais técnicas da manutenção preditiva moderna, justificando sua aplicação em máquinas agrícolas, como o pulverizador autopropelido analisado neste trabalho.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia adotada consiste na coleta de amostras de óleo, envio para análise em laboratório especializado e interpretação dos resultados obtidos nos laudos técnicos. Dessa forma, busca-se avaliar a condição dos componentes internos do equipamento sem a necessidade de desmontagem, utilizando a análise de óleo como ferramenta de diagnóstico.

Além disso, a pesquisa possui caráter descritivo, pois busca apresentar e interpretar os dados obtidos a partir das análises laboratoriais, relacionando-os com as condições de funcionamento do equipamento analisado.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O estudo foi realizado em um pulverizador agrícola utilizado em operações de aplicação de defensivos e insumos em atividades agrícolas. Esse tipo de equipamento é amplamente utilizado no setor agrícola devido à sua capacidade de realizar aplicações em grandes áreas com eficiência e precisão.

O pulverizador possui diversos sistemas mecânicos que operam continuamente durante as atividades no campo, como transmissão, redutores e comandos finais. Esses componentes são submetidos a esforços mecânicos constantes, o que pode resultar em desgaste ao longo do tempo.

Nesse contexto, o monitoramento da condição do óleo lubrificante presente nesses sistemas torna-se uma ferramenta importante para identificar possíveis falhas ou desgastes prematuros, contribuindo para o planejamento das atividades de manutenção.

Figura 2 - Pulverizador M4040



Fonte: John Deere

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização da coleta das amostras de óleo lubrificante foram utilizados materiais específicos fornecidos pelo laboratório responsável pelas análises, visando garantir a representatividade das amostras e evitar contaminações durante o procedimento. O conjunto de coleta foi composto por frascos apropriados para o armazenamento das amostras, uma bomba manual de sucção acoplada a uma mangueira plástica descartável, utilizada para transportar o lubrificante do compartimento até o frasco coletor, minimizando o risco de contaminação cruzada entre as amostras, além de uma ficha de identificação contendo as informações do equipamento e dos compartimentos analisados, assegurando a rastreabilidade das amostras. Esses materiais são apresentados nas **Figuras 3, 4 e 5**, respectivamente.

Figura 3 - Frasco para armazenamento da amostra



Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Bomba de coleta



Fonte: Autoria própria

Figura 5 - Ficha da amostra

ALIS

DADOS

Cliente/CNPJ _____

Obra/Operação/Cliente _____

Quem coletou a amostra? _____

Horímetro/km/Período _____

EQUIPAMENTO

Série/Chassi _____

Frota/TAG _____

Modelo _____

Fabricante _____

Data da coleta _____

Horas/km do fluido _____

Fluido trocado? ☐ Sim ☐ Não

AMOSTRA

Vol. fluido adic. _____

Código Ext./OS _____

FLUIDO

Fabricante e modelo _____

Viscosidade _____

TIPO DE COMPARTIMENTO

*Obrigatório! Sem este dado não é possível processar sua amostra.

☐ **Móvel***

☐ Motor

☐ Comando Final Dir.

☐ Comando Final Esq.

☐ Comando de Giro

☐ Compressor

☐ Diesel

☐ Direção

☐ Eixo Dianteiro

☐ Eixo Traseiro

☐ Graxa

☐ Radiador

☐ Transmissão

☐ Hidráulico

☐ **Industrial***

☐ Compressor

☐ Graxa

☐ Hidráulico

☐ Isolante

☐ Mancal

Observações/Feedback _____

Amostra 09/07/25

2500650576

[Uso interno ALIS]

Bomba

Sistema de Lubr.

Redutor

Sistema Térmico

Turbina

Ponto de coleta:

TBI-DAE-LA-GT-10010-PT Rev.11/Mar/2024

Fonte: Autoria Própria

3.4 PROCEDIMENTOS DE COLETA

A coleta das amostras de óleo foi realizada diretamente nos compartimentos do pulverizador agrícola. Os pontos de coleta compreenderam o comando final dianteiro direito, o comando final dianteiro esquerdo, o comando final traseiro esquerdo, o comando final traseiro direito, o motor e o sistema hidráulico. Antes da coleta, realizou-se a limpeza da região ao redor de cada ponto de amostragem, com o objetivo de evitar a entrada de contaminantes externos na amostra. Em seguida, o óleo foi coletado utilizando frascos apropriados e devidamente identificados. A **Figura 6** ilustra o procedimento de coleta das amostras realizado nos compartimentos do equipamento. As amostras foram coletadas com o equipamento em condições normais de operação, permitindo que o óleo estivesse em circulação e representasse fielmente o estado dos componentes internos do sistema. Após a coleta, os frascos foram fechados adequadamente e identificados com informações referentes ao equipamento, ao compartimento de origem e à data da coleta.

Figura 6 - Procedimento de coleta



Fonte: Autoria Própria

3.5 ENVIO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE LABORATORIAL

Após a realização da coleta, as amostras de óleo foram acondicionadas e encaminhadas para uma empresa especializada em análise de lubrificantes. O envio foi realizado seguindo os procedimentos recomendados pelo laboratório, garantindo a integridade das amostras durante o transporte e preservando suas características até a realização dos ensaios. A **Figura 7** apresenta as amostras devidamente identificadas e preparadas para envio ao laboratório, assegurando a rastreabilidade de cada compartimento analisado.

No laboratório, as amostras passaram por diferentes tipos de análises, incluindo ensaios físico-químicos e análises espectrométricas. As análises físico-químicas avaliaram propriedades do óleo lubrificante, como viscosidade, contaminação e degradação do lubrificante. Já as análises espectrométricas tiveram como objetivo identificar e quantificar partículas metálicas presentes no óleo, que podem indicar o desgaste de componentes internos do equipamento. Após o processamento das amostras, os resultados foram disponibilizados por meio de laudos técnicos emitidos pelo laboratório responsável.

Figura 7 - Amostras pronta para envio



Fonte: Mundo ALS

3.6 CRITÉRIOS PARA INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos a partir da interpretação dos laudos técnicos emitidos pelo laboratório ALS Tribology, empresa especializada em monitoramento da condição de equipamentos por meio da análise de óleo lubrificante. A avaliação concentrou-se nos parâmetros relacionados ao desgaste mecânico, à contaminação e à degradação do lubrificante, considerando principalmente as concentrações dos metais de desgaste, como ferro (Fe), cobre (Cu), cromo (Cr), estanho (Sn), alumínio (Al) e demais elementos presentes nas amostras, além da presença de contaminantes, das propriedades físico-químicas do óleo e do Índice PQI (Particle Quantifier Index), utilizado para indicar a quantidade relativa de partículas ferromagnéticas provenientes do desgaste dos componentes internos. A interpretação desses

parâmetros foi realizada de forma integrada, uma vez que a avaliação isolada de um único resultado não é suficiente para caracterizar a condição operacional do equipamento, sendo necessária a correlação entre os diferentes ensaios laboratoriais para obtenção de um diagnóstico mais consistente.

A classificação dos compartimentos monitorados em condições normais, anormal ou crítica seguiu a metodologia adotada pela ALS Tribology, que considera a avaliação conjunta dos resultados laboratoriais, das características do compartimento analisado, do tempo de utilização do lubrificante, das condições operacionais do equipamento e da experiência técnica dos analistas. De acordo com a metodologia empregada pelo laboratório, a interpretação dos laudos é complementada, sempre que possível, pela análise do histórico das amostras e pela avaliação da tendência de evolução dos parâmetros monitorados, permitindo distinguir alterações decorrentes do desgaste normal daquelas associadas a processos anormais de degradação ou contaminação. Essa abordagem está em consonância com a metodologia proposta por Cardoso (2026), que destaca a importância da análise integrada dos parâmetros laboratoriais e da avaliação de tendências para aumentar a confiabilidade do diagnóstico e subsidiar decisões de manutenção baseadas na condição real dos equipamentos.

Ressalta-se que os valores de referência utilizados pelo laboratório para classificar as amostras nas condições Normal, Anormal ou Grave constituem metodologia proprietária e confidencial. Dessa forma, os limites numéricos adotados para cada parâmetro não são divulgados pelo laboratório. A classificação apresentada nos laudos resulta da interpretação conjunta de diversos fatores, como a concentração de metais de desgaste, contaminantes, propriedades físico-químicas do lubrificante, tipo de compartimento analisado e histórico operacional do equipamento.

Entretanto, deve-se ressaltar que esta foi a primeira campanha de monitoramento por análise de óleo realizada no pulverizador objeto deste estudo, inexistindo histórico laboratorial que permitisse a avaliação da tendência de evolução dos parâmetros ao longo do tempo. Dessa forma, a interpretação dos resultados fundamentou-se principalmente na correlação entre os parâmetros obtidos em cada amostra, nos critérios técnicos adotados pela ALS Tribology e nas características construtivas e operacionais de cada compartimento analisado. Assim, os resultados apresentados representam a condição inicial (baseline) dos sistemas lubrificados do equipamento, constituindo uma referência para futuras campanhas de monitoramento, nas quais será possível acompanhar a evolução dos indicadores de desgaste, contaminação e degradação do lubrificante por meio da análise de tendências.

Com base nessa metodologia, foi possível avaliar a condição dos principais compartimentos lubrificados do pulverizador agrícola, identificando indícios de desgaste, contaminação e alterações nas propriedades do lubrificante que poderiam comprometer a confiabilidade operacional do equipamento. A interpretação integrada dos resultados permitiu correlacionar os elementos metálicos encontrados nas amostras com os componentes potencialmente afetados, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento das intervenções de manutenção e contribuindo para uma tomada de decisão fundamentada na condição real do equipamento, princípio essencial da manutenção preditiva.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DOS COMPONENTES DE DESGASTES

A análise espectrométrica dos elementos metálicos presentes no óleo lubrificante constitui uma das principais ferramentas para identificação do desgaste interno de componentes mecânicos. Por meio da quantificação dos metais presentes nas amostras é possível identificar o estágio de degradação dos componentes e localizar os sistemas mais críticos do equipamento. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os diferentes compartimentos do pulverizador agrícola, contemplando os principais elementos indicadores de desgaste, bem como o índice PQI, utilizado para quantificar partículas ferromagnéticas presentes no lubrificante.

Tabela 1 - Elementos metálicos presentes nas amostras

Compartimento	Estado	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Sn (ppm)	Ni (ppm)	Mo (ppm)	Ti (ppm)	V (ppm)	Mn (ppm)	Cd (ppm)	Ag (ppm)	PQI
Comando Final Dianteiro Direito	Anormal	104	209	1	0	5	0	1	0	0	1	0	0	21
Comando Final Dianteiro Esquerdo	Anormal	64	275	1	0	4	0	4	0	0	1	0	0	14
Comando Final Traseiro Direito	Grave	435	843	4	0	11	0	2	1	0	4	0	0	260
Comando Final Traseiro Esquerdo	Grave	1244	1250	15	0	57	0	2	0	0	13	0	0	185
Sistema Hidráulico	Normal	8	4	0	0	1	0	256	0	0	0	0	0	6
Motor	Normal	9	0	0	1	1	0	277	0	0	0	0	0	5

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados da análise de óleo do laboratório ALS Tribology (2025).
Nota: Fe = ferro; Cu = cobre; Cr = cromo; Pb = chumbo; Sn = estanho; Ni = níquel; Mo = molibdênio; Ti = titânio; V = vanádio; Mn = manganês; Cd = cádmio; Ag = prata; PQI = índice de quantificação de partículas ferromagnéticas.

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam que os comandos finais traseiros foram os compartimentos que apresentaram as maiores concentrações de metais de desgaste, sendo classificados pela ALS Tribology como grave, indicando a necessidade de inspeção e intervenção no equipamento. O comando final traseiro esquerdo apresentou as maiores concentrações de ferro (1.244 ppm), cobre (1.250 ppm), estanho (57 ppm) e cromo (15 ppm), enquanto o comando final traseiro direito registrou 435 ppm de ferro, 843 ppm de cobre e o maior Índice PQI (260) entre os compartimentos monitorados. Conforme a avaliação técnica emitida pelo laboratório, essas concentrações elevadas de metais de desgaste são compatíveis com um processo de desgaste

premature dos componentes internos dos comandos finais, justificando a classificação de criticidade atribuída a esses compartimentos.

A análise conjunta dos resultados demonstra que o aumento simultâneo das concentrações de ferro, cobre, estanho e cromo, associado aos elevados valores do Índice PQI, indica intensa geração de partículas metálicas durante a operação dos comandos finais. Enquanto a espectrometria identifica partículas metálicas finas em suspensão no lubrificante, o Índice PQI complementa essa avaliação ao indicar a presença de partículas ferromagnéticas de maiores dimensões. Dessa forma, a associação entre esses parâmetros reforçou a suspeita de desgaste anormal nos componentes internos e justificou a realização de uma inspeção mecânica detalhada nesses compartimentos.

Após a emissão dos laudos laboratoriais, foi realizada a inspeção técnica do pulverizador, sendo constatado desgaste acentuado nos cubos traseiros direito e esquerdo, tanto na estrutura dos cubos quanto nos componentes internos dos comandos finais. A Figura 8 apresenta o desgaste observado na carcaça de um dos cubos dos comandos finais traseiros. A inspeção confirmou que os compartimentos indicados como críticos pela análise de óleo eram justamente aqueles que apresentavam maior deterioração mecânica, demonstrando a eficiência da técnica em direcionar a investigação para os locais com maior probabilidade de ocorrência de falhas e subsidiar a tomada de decisão quanto às intervenções de manutenção. A Figura 9 apresenta um dos rolamentos cônicos removidos durante a desmontagem, evidenciando o desgaste dos componentes internos dos comandos finais e corroborando os resultados obtidos por meio da análise de óleo.

Em contrapartida, o motor e o sistema hidráulico permaneceram classificados como normais, apresentando baixas concentrações de metais de desgaste e reduzidos valores de Índice PQI. Embora esses compartimentos tenham registrado valores mais elevados de teor de água em relação aos comandos finais, a avaliação técnica da ALS não identificou necessidade de intervenção corretiva, recomendando apenas a continuidade do monitoramento periódico. Esse comportamento demonstra que a condição dos compartimentos foi definida pela interpretação integrada de todos os parâmetros analisados, e não pela avaliação isolada de um único indicador, permitindo distinguir os sistemas que efetivamente apresentavam desgaste prematuro daqueles que permaneciam em condições normais de operação.

Figura 8 - Carcaça do cubo desgastada



Fonte: Autoria própria

Figura 9 - Rolamento cônico desgastado



Fonte: Autoria Própria

4.2 ANÁLISE DOS CONTAMINANTES

Além da avaliação dos metais de desgaste, o monitoramento dos contaminantes presentes no óleo lubrificante fornece informações importantes sobre as condições de vedação, exposição ambiental e integridade do sistema de lubrificação. A presença de contaminantes sólidos e de água pode acelerar o desgaste dos componentes mecânicos e comprometer as propriedades do lubrificante. Dessa forma, a Tabela 2 apresenta os resultados referentes aos elementos associados à contaminação, bem como o teor de água determinado nas amostras coletadas.

Tabela 2 - Contaminantes.

Compartimento	Si (ppm)	Al (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	ÁGUA. (ppm)
Comando Final Dianteiro Direito	9	3	5	0	122
Comando Final Dianteiro Esquerdo	8	2	5	0	126
Comando Final Traseiro Direito	17	13	4	0	259
Comando Final Traseiro Esquerdo	14	3	5	0	155
Sistema Hidráulico	7	5	12	0	694
Motor	8	4	7	0	682

Fonte: Dados do relatório de análise de óleo do laboratório ALS Tribology, organizados pelo autor (2025).

Nota: Si = silício; Al = alumínio; Na = sódio; K = potássio; KF Coul = teor de água determinado pelo método Karl Fischer conforme ASTM D6304.

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que as concentrações dos elementos associados à contaminação do lubrificante permaneceram baixas em todos os compartimentos avaliados. Os maiores valores de silício e alumínio foram observados nos comandos finais traseiros, com destaque para o comando final traseiro direito, que apresentou 17 ppm de silício e 13 ppm de alumínio, enquanto o comando final traseiro esquerdo registrou 14 ppm de silício e 3 ppm de alumínio. Embora esses elementos sejam normalmente utilizados como indicadores da presença de partículas provenientes do ambiente externo, suas concentrações não foram apontadas pela avaliação técnica da ALS Tribology como responsáveis pela condição crítica atribuída aos comandos finais. Da mesma forma, as concentrações de sódio permaneceram entre 4 e 12 ppm, enquanto potássio não foi detectado em nenhuma das amostras, não sendo observados indícios de contaminação significativa associados a esses elementos.

Em relação ao teor de água, os maiores valores foram registrados no sistema hidráulico (694 ppm) e no motor (682 ppm), enquanto os comandos finais apresentaram concentrações inferiores, variando entre 122 e 259 ppm. Apesar desses resultados, tanto o sistema hidráulico quanto o motor foram classificados pela ALS Tribology como normais, sem recomendação de intervenções corretivas, demonstrando que, nas condições avaliadas, a presença de água não comprometeu o desempenho do lubrificante nem a condição operacional desses compartimentos. Esse comportamento evidencia que a interpretação dos laudos não se baseia na avaliação isolada de um único parâmetro, mas na análise integrada de todos os resultados obtidos.

A comparação entre as Tabelas 1 e 2 demonstra que a condição crítica observada nos comandos finais traseiros esteve associada principalmente às elevadas concentrações de metais de desgaste e aos valores do Índice PQI, enquanto os parâmetros relacionados à contaminação permaneceram em níveis que, segundo a avaliação do laboratório, não justificavam por si só a classificação de criticidade. Esses resultados reforçam a importância da interpretação integrada dos laudos de análise de óleo, permitindo distinguir situações em que a degradação do equipamento está relacionada predominantemente ao desgaste mecânico daquelas em que a contaminação do lubrificante constitui o principal fator de preocupação. Essa abordagem possibilita diagnósticos mais confiáveis e direciona as intervenções de manutenção para os compartimentos que efetivamente apresentam maior probabilidade de falha.

4.3 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS

Após a identificação do desgaste prematuro nos comandos finais por meio da análise de óleo lubrificante, foi solicitada a avaliação técnica da concessionária autorizada John Deere, que deslocou sua equipe até a unidade onde o pulverizador se encontrava em operação. Durante a inspeção mecânica realizada pelos técnicos, foi confirmada a necessidade de substituição de componentes dos comandos finais, sendo elaborado o orçamento para execução do reparo. Com o objetivo de avaliar os benefícios econômicos proporcionados pela identificação antecipada da anomalia, realizou-se uma comparação entre o valor total orçado para a manutenção e o valor efetivamente desembolsado pela empresa após a aplicação das condições de garantia do fabricante como mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre o orçamento integral do reparo e o custo efetivamente pago pela empresa.

DESCRIÇÃO	CUSTO
Valor total do reparo orçado pela concessionária	R\$ 112.996,51
Valor efetivamente pago após identificação precoce	R\$ 37.665,50

Conforme apresentado na Tabela 3, o orçamento elaborado pela concessionária autorizada John Deere totalizou R\$ 112.996,51, contemplando mão de obra especializada, deslocamento da equipe técnica até a unidade da empresa, substituição de dois cubos, um espaçador, um anel de vedação, materiais de vedação e óleo lubrificante para os comandos. Durante a inspeção mecânica, os técnicos confirmaram o desgaste dos componentes internos dos comandos finais apontado pela análise de óleo, validando o diagnóstico obtido por meio do monitoramento do lubrificante.

Como o pulverizador ainda se encontrava em operação e dentro do período de garantia do fabricante, o desgaste foi reconhecido durante a avaliação técnica, permitindo que parte significativa dos componentes e dos serviços fosse coberta pela garantia. Dessa forma, embora o orçamento integral do reparo correspondesse a R\$ 112.996,51, o valor efetivamente desembolsado pela empresa foi de R\$ 37.665,50, representando uma redução aproximada de 66,7% em relação ao custo total inicialmente previsto.

Além da expressiva redução dos custos, a identificação antecipada do desgaste permitiu que a intervenção fosse realizada de forma planejada, sem que o pulverizador apresentasse perda de funcionalidade durante a operação. A confirmação do desgaste pelos técnicos da concessionária demonstrou a compatibilidade entre os resultados obtidos pela análise de óleo e a condição real dos componentes, evidenciando a eficiência dessa técnica como ferramenta de manutenção preditiva para o diagnóstico precoce de anomalias e para o suporte à tomada de decisão quanto às intervenções de manutenção

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva em um pulverizador agrícola, verificando sua capacidade de identificar precocemente indícios de desgaste nos componentes mecânicos e subsidiar a tomada de decisões relacionadas à manutenção do equipamento. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo geral foi alcançado, uma vez que a interpretação dos laudos laboratoriais permitiu identificar anomalias nos comandos finais traseiros, posteriormente confirmadas por meio da inspeção mecânica realizada pela assistência técnica autorizada da John Deere. As análises laboratoriais evidenciaram concentrações elevadas de ferro, cobre, cromo e estanho, associadas a elevados valores do Índice PQI nos comandos finais traseiros, indicando desgaste prematuro desses compartimentos. Em contrapartida, o motor e o sistema hidráulico permaneceram classificados como normais, demonstrando que a análise de óleo foi capaz de diferenciar os compartimentos que necessitavam de intervenção daqueles que apresentavam condições adequadas de operação. A confirmação do desgaste durante a desmontagem reforçou a confiabilidade da técnica na identificação precoce de falhas, possibilitando o planejamento da manutenção antes da ocorrência de falhas mais severas.

Além dos benefícios técnicos, verificou-se que a identificação antecipada do desgaste permitiu que a inspeção e a substituição dos componentes fossem realizadas ainda durante o período de garantia do fabricante, reduzindo os custos de manutenção da empresa e evidenciando um benefício econômico adicional da utilização da análise de óleo. Em relação aos objetivos específicos estabelecidos, todos foram alcançados. Foi possível identificar a presença de contaminantes e partículas metálicas provenientes do desgaste dos componentes, interpretar os resultados obtidos nas análises laboratoriais e comprovar a eficácia da análise de óleo como ferramenta de manutenção preditiva em máquinas agrícolas, por meio da correspondência entre os resultados laboratoriais e o desgaste constatado durante a inspeção mecânica.

Como esta pesquisa correspondeu à primeira campanha de monitoramento do pulverizador, os resultados obtidos constituem uma linha de base para futuras análises, permitindo acompanhar a evolução dos indicadores de desgaste ao longo da vida útil do equipamento.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade do monitoramento desse pulverizador por meio de campanhas periódicas de análise de óleo, possibilitando a construção de séries históricas e análises de tendência. Sugere-se, ainda, a integração da análise de óleo com outras técnicas de manutenção preditiva, como análise de vibração, termografia e ultrassom, além da ampliação da pesquisa para outros modelos de pulverizadores e máquinas agrícolas.

6 REFERÊNCIAS

ALS TRIBOLOGY. **Reporting Guidelines**. Houston, TX: ALS Tribology,. Disponível em: <https://webtrieve.alstribology.com/Content/Brand/Webtrieve/ReportingGuidelines.pdf>.

Acesso em: 06 jun. 2026.

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

BRANCO FILHO, Gil. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Em dezembro, IBGE prevê safra de 346,1 milhões de toneladas para 2025 e de 339,8 milhões de toneladas para 2026**. Rio de Janeiro, 15 jan. 2026. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/45673-em-dezembro-ibge-preve-safra-de-346-1-milhoes-de-toneladas-para-2025-e-de-339-8-milhoes-de-toneladas-para-2026>. Acesso em: 07 abr. 2026..

CARDOSO, Arthur Souza Sales. **Análise de óleo para o sistema de trem de força de uma escavadeira: o caso de uma empresa do setor de mineração**. 2026. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 2026.

CARVALHO, Clara Maia de. **Utilização da análise de óleo lubrificante como parte do programa de manutenção preditiva de máquinas de tração engrenadas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2021.

CAVALCANTE JÚNIOR, Luiz Claudio Paulino; COURAS, Daut de Jesus Nogueira Peixoto. **Manutenção preditiva por análise de óleo: um estudo de caso em frota de equipamentos pesados**. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semiárido, Centro de Engenharias, Curso de Engenharia Mecânica, 2024.

DUTRA, Jhonata Teles. **Planejamento e controle da manutenção descomplicado: uma metodologia passo a passo para implantação do PCM**. 1. ed. Brasília, DF: Engeteles Editora, 2019.

GALÉ, Mohammed Tizzo. **Aplicabilidade de análise de fluidos como manutenção preditiva em maquinário agrícola com estudo de caso visando economia em manutenção corretiva**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

IWASAKI, Joshua Enrico Pereira. **A análise de óleo como manutenção preditiva em máquinas agrícolas de uma usina sucroalcooleira visando economia em manutenção corretiva**. 2022. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, 2022.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SENSIX. **Mecanização da colheita agrícola: o que é e como ela pode otimizar a produtividade no setor**. Disponível em: <https://blog.sensix.ag/mecanizacao-da-colheita-agricola-o-que-e-e-como-ela-pode-otimizar-a-produtividade-no-setor/>. Acesso em: 06 abr. 2026.

SILVA FILHO, Luiz Paulo. **Análise preditiva do óleo lubrificante usado em sistemas automotivos de equipamentos e maquinário pesado**. *Revista Gestão Industrial*, Ponta Grossa, v. 16, n. 1, p. 40-63, jan./mar. 2020. Disponível em: <http://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi>. Acesso em: 06 abr. 2026.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering tribology**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

XENOS, Harilaus Georgius D'Philippos. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.