

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Lara Juliely de Alcena

**MANUTENÇÃO PREDITIVA POR MONITORAMENTO ONLINE DE FLUIDOS:  
Estudo de Caso em um Sistema Hidráulico de uma Colhedora Case A9900**

Betim  
2026

LARA JULIELY DE ALCENA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA POR MONITORAMENTO ONLINE DE FLUIDOS:  
Estudo de Caso em um Sistema Hidráulico de uma Colhedora Case IH A9900**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Ronald Leite Barbosa

Betim

2026

## FICHA CATALOGRÁFICA

A351m Alcena, Lara Juliely de

Manutenção preditiva por monitoramento *online* de fluidos: estudo de caso em um sistema hidráulico de uma colhedora Case A9900 / Lara Juliely de Alcena. – 2026.

59 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Ronald Leite Barbosa

1. Manutenção preditiva. 2. Monitoramento on-line. 3. Óleos lubrificantes. 4. Máquinas agrícolas. 5. Engenharia Mecânica. I. Alcena, Lara Juliely de. II. Título.


CDU: 631.3

Lara Juliely de Alcena

**MANUTENÇÃO PREDITIVA POR MONITORAMENTO ONLINE DE FLUIDOS:  
Estudo de Caso em um Sistema Hidráulico de uma Colhedora Case A9900**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 06/02/2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **RONALD LEITE BARBOSA**  
Data: 17/03/2026 15:41:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Ronald Leite Barbosa (Orientador) – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente  
 **GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO**  
Data: 17/03/2026 11:54:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida – IFMG

Documento assinado digitalmente  
 **JOAO PAULO MOREIRA SANTOS BARBOSA**  
Data: 18/03/2026 11:35:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. João Paulo Moreira Barbosa – IFMG



Dedico este trabalho a Deus,  
à minha família, ao meu orientador  
e a todos que contribuíram para sua  
realização.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, que me concedeu saúde, força e sabedoria ao longo de toda essa jornada, possibilitando a superação dos desafios e a conquista desta etapa tão importante.

Aos meus familiares e ao meu namorado, pelo apoio incondicional, incentivo constante, paciência e compreensão durante todo o período da graduação. O carinho, a presença e o encorajamento de vocês foram fundamentais para que eu mantivesse a motivação e a confiança, especialmente nos momentos mais desafiadores dessa caminhada.

Ao meu orientador, Ronald Leite, pela orientação, paciência, disponibilidade e valiosas contribuições técnicas, essenciais para o desenvolvimento e a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, pelos conhecimentos transmitidos ao longo da graduação, que contribuíram significativamente para a minha formação acadêmica.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais, por proporcionar a base necessária para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos colegas e amigos, pelo apoio, troca de experiências e companheirismo ao longo dessa caminhada.

Por fim, registro meu agradecimento a todos que contribuíram para esta conquista e reconheço a importância de concluir a graduação como mulher na Engenharia Mecânica. Cada conquista ao longo dessa trajetória reforça que conhecimento, capacidade técnica e excelência não possuem gênero, e que a diversidade fortalece a engenharia e impulsiona a inovação.

*“É justo que me custe o que muito vale.”*

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a aplicação da manutenção preditiva por meio do monitoramento online de fluidos em um sistema hidráulico de uma colhedora de cana-de-açúcar Case IH A9900. O objetivo principal foi validar a funcionalidade de uma solução de monitoramento contínuo do óleo hidráulico, utilizando um sensor Predic 6 em 1, capaz de medir em tempo real variáveis físico-químicas relevantes para a confiabilidade do sistema. A metodologia adotada consistiu na instalação do sensor no circuito hidráulico da colhedora e na coleta contínua de dados durante um período de operação em condições reais de trabalho. As variáveis monitoradas incluíram temperatura, viscosidade, densidade, constante dielétrica, atividade de água e umidade do óleo. Os resultados evidenciaram a ocorrência de alertas relacionados principalmente à elevação da temperatura e a variações na viscosidade, indicando condições de sobrecarga térmica e possíveis impactos na degradação do fluido. A análise dos dados demonstrou que o monitoramento online possibilita a identificação precoce de desvios operacionais, contribuindo para a tomada de decisões assertivas quanto à manutenção, redução de falhas não planejadas e aumento da disponibilidade do equipamento durante a safra. Conclui-se que o monitoramento online de fluidos é uma ferramenta eficaz para aprimorar estratégias de manutenção preditiva em sistemas hidráulicos de máquinas agrícolas de grande porte.

**Palavras-chave:** Manutenção preditiva; Monitoramento online; Análise de óleo; Sistema hidráulico; Colhedora de cana.

## ABSTRACT

This work presents a case study on the application of predictive maintenance through online fluid monitoring in the hydraulic system of a Case IH A9900 sugarcane harvester. The main objective was to validate the functionality of a continuous hydraulic oil monitoring solution using a Predic 6-in-1 sensor capable of measuring relevant physicochemical variables in real time. The methodology involved installing the sensor in the harvester's hydraulic circuit and continuously collecting data during operation under real working conditions. The monitored variables included temperature, viscosity, density, dielectric constant, water activity, and oil moisture. The results revealed the occurrence of alerts mainly associated with high variations in temperature and viscosity, indicating thermal overload conditions and potential oil degradation. Data analysis demonstrated that online monitoring allows for the early detection of operational deviations, supporting more precise maintenance decision-making, reducing unplanned failures, and increasing equipment availability during the harvest period. It is concluded that online fluid monitoring is an effective tool for improving predictive maintenance strategies in hydraulic systems of large agricultural machines.

**Keywords:** Predictive maintenance; Online monitoring; Oil analysis; Hydraulic system; Sugarcane harvester.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de Manutenção.....	21
Figura 2 – Curva PF x Custo para Reparo .....	23
Figura 3 – Níveis de manutenção e evolução da falha.....	23
Figura 4 – Coleta de óleo .....	25
Figura 5 – Esquema hidráulico.....	27
Figura 6 - Componentes Sistema Hidráulico .....	28
Figura 7 - Colhedora Case IH A9900 .....	33
Figura 8 - Sistema hidráulico colhedora Case IH A9900.....	34
Figura 9 - Funções sistema hidráulico colhedora Case IH A9900.....	35
Figura 10 - Conjunto de instalação.....	36
Figura 11 - Manifold .....	37
Figura 12 - Conjunto instalado .....	37
Figura 13 - Módulo de gerenciamento.....	38
Figura 14 - Sensor Predic 6 em 1.....	39
Figura 15 - Sistema de Monitoramento .....	42

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Alarmes Temperatura Elevada .....	46
Gráfico 2 - Alarmes Viscosidade Alta .....	48
Gráfico 3 - Viscosidade Baixa .....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução da Manutenção.....	20
Quadro 2 - Categorias de análise de óleo.....	26
Quadro 3 – Inter-relações com a Constante Dielétrica.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alarmes Temperatura Alta.....	44
Tabela 2 - Alarmes Viscosidade Alta.....	47
Tabela 3 - Alarmes Viscosidade Baixa.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFS – (Sistemas Avançados de Agricultura) *Advanced Farming Systems*

CBM – (Manutenção Baseada em Condição) *Condition-Based Maintenance*

CMMS – (Sistema Computadorizado de Gestão da Manutenção) *Computerized Maintenance Management System*

FTIR – (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier) *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais

IoT – (Internet das Coisas) *Internet of Things*

MTBF – (Tempo Médio Entre Falhas) *Mean Time Between Failures*

PF – Potencial de Falha

RCM – (Manutenção Centrada na Confiabilidade) *Reliability-Centered Maintenance*

TPM – (Manutenção Produtiva Total) *Total Productive Maintenance*

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
cSt	Centistokes
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
ppm	Partes por milhão
aw	Atividade de água

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivo geral: .....	17
1.2.2	Objetivos específicos:.....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Manutenção.....</b>	<b>18</b>
2.1.1	História da Manutenção.....	18
2.1.2	Tipos de Manutenção .....	20
2.1.3	Manutenção Preditiva .....	21
<b>2.2</b>	<b>Análise de Óleo.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistema Hidráulico .....</b>	<b>26</b>
2.3.1	Componentes do Sistema Hidráulico .....	27
2.3.2	Tipos de Óleos Hidráulicos.....	28
2.3.3	Confiabilidade e Falhas em Sistemas Hidráulicos.....	29
<b>2.4</b>	<b>Monitoramento Online de Fluidos.....</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Colhedora Case IH A9900 .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Coleta de Dados .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Variáveis monitoradas .....</b>	<b>39</b>
3.3.1	Temperatura.....	40
3.3.2	Viscosidade .....	40
3.3.3	Densidade .....	40
3.3.4	Atividade de água (aw).....	40
3.3.5	Umidade .....	40
3.3.6	Constante Dielétrica .....	40
<b>3.4</b>	<b>Monitoramento Online do fluido hidráulico .....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise dos Alertas Gerados pelo Monitoramento.....</b>	<b>43</b>
4.1.1	Temperatura Elevada .....	43
4.1.2	Viscosidade Alta .....	47

4.1.3	Viscosidade Baixa .....	49
4.1.4	Ausência de Outros Alarmes Monitorados .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção preditiva tem se firmado como uma tática valiosa na gestão da segurança dos equipamentos, possibilitando a identificação antecipada de falhas através do monitoramento contínuo ou periódico dos seus indicadores operacionais. Segundo Mobley (2002), a manutenção preditiva requer o monitoramento programado dos parâmetros de vibração, temperatura e contaminação do óleo, utilizando a análise de tendências para identificar potenciais falhas antes que causem danos significativos nos equipamentos.

Nesse sentido, a análise de fluidos destaca-se como uma ferramenta crucial para complementar as estratégias de monitoramento. Conforme Fitch (2010), a análise de fluidos é uma técnica fundamental para aprimorar as decisões sobre manutenção e lubrificação, permitindo a identificação precoce de condições anormais, contaminação e desgaste dos componentes. Essa análise é dividida em três categorias principais: a avaliação das propriedades químicas e físicas do óleo para determinar sua vida útil restante, o monitoramento da contaminação que pode comprometer a confiabilidade do equipamento e a análise dos detritos de desgaste para detectar falhas de forma antecipada.

No contexto da colheita mecanizada de cana-de-açúcar, a colhedora Case IH A9900 representa um avanço tecnológico significativo em capacidade operacional e inteligência embarcada. Segundo dados técnicos do manual de manutenção da Case IH (2023), o modelo é equipado com sistemas hidráulicos de alta performance, incluindo o sistema de processamento de cana e os ventiladores de limpeza que atuam na remoção de impurezas leves, como palha e resíduos vegetais, por meio de controle de fluxo hidráulico variável. O fabricante destaca que a eficiência dessas operações depende diretamente da qualidade do fluido, uma vez que a contaminação ou degradação térmica do óleo pode comprometer os componentes de precisão e a conectividade do sistema AFS (Advanced Farming Systems). Esse sistema é responsável pela integração entre sensores, atuadores e unidades eletrônicas de controle, permitindo o ajuste automático de parâmetros operacionais, o monitoramento do desempenho da máquina e a comunicação em tempo real com sistemas de gestão agrícola.

Entretanto, o ambiente severo de trabalho marcado por altas temperaturas, poeira e umidade, coloca o sistema hidráulico em constante risco. Conforme diretrizes

do manual de manutenção da Case IH (2023), a utilização de fluidos em condições ideais com temperatura controlada, viscosidade adequada, baixos níveis de contaminação sólida e ausência de umidade excessiva, é essencial para maximizar a economia de combustível e a vida útil dos componentes do sistema Smart700. Esse sistema é caracterizado pela utilização de bombas hidráulicas de alta eficiência, válvulas eletro-hidráulicas proporcionais e circuitos com controle eletrônico integrado, permitindo a distribuição inteligente da potência hidráulica conforme a demanda instantânea dos diferentes subsistemas da máquina. As análises laboratoriais convencionais apresentam limitações, pois oferecem diagnósticos "post-mortem" ou atrasados, o que justifica a necessidade de uma abordagem de monitoramento online.

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a aplicação do monitoramento online de fluidos de um sistema hidráulico da colhedora Case IH A9900, com objetivo de validar o uso dessa tecnologia para otimizar os planos de manutenção, reduzir a possibilidade de ocorrência de "break-down" e garantir a alta disponibilidade mecânica do equipamento durante o período da safra agrícola.

## **1.1 Justificativa**

Os sistemas hidráulicos são o núcleo operacional das máquinas agrícolas modernas, especialmente em colhedoras de cana-de-açúcar como a case A9900, onde são responsáveis por acionar o corte de base, o picador, os extratores e o sistema de tração. Diferente de motores de combustão, onde o óleo atua primariamente na lubrificação, em sistemas hidráulicos o fluido é o meio de transmissão de potência, tornando a sua integridade crítica para a execução de todos os movimentos da máquina.

Conforme as diretrizes de manutenção da Case IH (2019), a limpeza e a integridade do fluido são vitais, uma vez que mais de 70% das falhas em sistemas hidráulicos de alta pressão são causadas pela contaminação do óleo, comprometendo a precisão dos controles eletrônicos e a vida útil dos componentes.

Tradicionalmente, o setor agrícola utiliza análises laboratoriais periódicas para mitigar esses riscos. No entanto, o intervalo entre coletas e o tempo de processamento das amostras, que pode variar de 2 a 7 dias úteis, representa um risco operacional elevado. Durante esse período, contaminações severas, como a entrada

de água ou o aumento súbito de partículas metálicas, pode ocorrer sem detecção imediata, resultando em paradas não planejadas e danos catastróficos.

Nesse contexto, a implementação de um sensor online de monitoramento da qualidade do óleo no sistema hidráulico se justifica plenamente. Através da obtenção de parâmetros físico-químicos em tempo real, como viscosidade, temperatura, atividade de água, densidade, umidade e constante dielétrica, é possível detectar alterações críticas instantaneamente. Essa agilidade na detecção permite intervenções preditivas precisas, aumentando a disponibilidade da colhedora Case A9900 durante o período de colheita e otimizando a vida útil dos componentes.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral:**

Validar a funcionalidade da solução de monitoramento online de fluidos no sistema hidráulico da colhedora de cana-de-açúcar Case IH, utilizando o sensor Predic 6 em 1 e o controlador/painel Predic, permitindo a coleta dos dados e a análise da eficiência dos resultados em tempo real, visando o maior controle gerencial, a redução de custos com componentes de alta pressão e o aumento da disponibilidade do equipamento durante o período de safra.

### **1.2.2 Objetivos específicos:**

Analisar parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho do óleo hidráulico, visando tomada de decisões quanto a parada para manutenção, com intuito de reduzir os custos de manutenção, evitar o "break-down" e maximizar a disponibilidade do equipamento.

Os parâmetros a serem monitorados são:

- Temperatura do fluido (°C)
- Densidade ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
- Viscosidade Cinemática (cSt)
- Constante Dielétrica
- Atividade da água (Aw)
- Umidade (ppm)

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento deste estudo. Inicialmente, são abordados os conceitos e a evolução histórica da manutenção, com ênfase na manutenção preditiva e na manutenção baseada em condição. Em seguida, discute-se a análise de óleo como ferramenta estratégica para o diagnóstico da saúde de equipamentos. Posteriormente, são apresentados os princípios de funcionamento dos sistemas hidráulicos, seus principais componentes e fatores relacionados à confiabilidade e falhas. Por fim, é tratado o monitoramento online de fluidos, destacando sua aplicação no contexto da Indústria 4.0 e sua relevância para a detecção precoce de anomalias em sistemas hidráulicos de máquinas agrícolas de grande porte.

### 2.1 Manutenção

Conforme a Norma Brasileira 5462/1994, os termos disponibilidade e confiabilidade são fundamentais para a compreensão do conceito de manutenção:

Disponibilidade: Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. Confiabilidade: Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um dado intervalo de tempo (ABNT, 1994, p.2-3)

#### 2.1.1 História da Manutenção

De acordo com Monchy (1989, p. 3), o termo manutenção “tem sua origem no vocabulário militar, cujo sentido era manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material num nível constante”.

O conceito de manutenção começou a se consolidar no final do século XIX, quando as indústrias reconheceram a necessidade de estruturar atividades voltadas para a conservação dos equipamentos. Inicialmente, a manutenção era realizada de forma corretiva pela própria equipe de produção. Com as guerras mundiais, especialmente a partir da Primeira e da Segunda Guerra, surgiram metodologias mais organizadas e preventivas, com foco na redução de falhas e no aumento da

disponibilidade dos ativos. Com o avanço tecnológico e a introdução da aviação comercial, a partir da década de 1970, houve um impulso significativo no desenvolvimento da Engenharia de Manutenção, que passou a utilizar métodos estatísticos, análises preditivas e monitoramento de condições para garantir maior confiabilidade aos equipamentos (Monchy, 1989).

Segundo Kardec e Nascif (2009), a partir de 1930 a manutenção pode ser dividida em quatro gerações:

- Primeira Geração: Antes da Segunda Guerra Mundial. Equipamentos simples e pouca mecanização. A manutenção era apenas corretiva.
- Segunda Geração: Anos 1950–1970. Com a mecanização, surgem manutenções com intervalos fixos para aumentar a vida útil dos equipamentos.
- Terceira Geração: A partir dos anos 1970. A automação exige maior controle. Surge a manutenção preditiva, uso de softwares e o conceito de confiabilidade.
- Quarta Geração: Atual. Consolidação da engenharia de manutenção. Foco em disponibilidade, confiabilidade e uso intenso do monitoramento preditivo e integração com a operação.

No Quadro 1 podemos ver a evolução da manutenção ao longo dos anos:

Quadro 1 - Evolução da Manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano				
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Conserto após a falha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Disponibilidade crescente</li> <li>•Maior vida útil do equipamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Maior confiabilidade</li> <li>•Maior disponibilidade</li> <li>•Melhor relação custo-benefício</li> <li>•Preservação do meio ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Maior confiabilidade</li> <li>•Maior disponibilidade</li> <li>•Preservação do meio ambiente</li> <li>•Segurança</li> <li>•Influir nos resultados do negócio</li> <li>•Gerenciar os ativos</li> </ul>
Visão quanto à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan &amp; Heap e Moubray) Ver Capítulo 5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F. (Nowlan &amp; Heap e Moubray) Ver Capítulo 5</li> </ul>
Mudança nas técnicas de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Habilidades voltadas para o reparo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planejamento manual da manutenção</li> <li>• Computadores grandes e lentos</li> <li>• Manutenção Preventiva (por tempo)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoramento da condição</li> <li>• Manutenção Preditiva</li> <li>• Análise de risco</li> <li>• Computadores pequenos e rápidos</li> <li>• Softwares potentes</li> <li>• Grupos de trabalho multidisciplinares</li> <li>• Projetos voltados para a confiabilidade</li> <li>• Contratação por mão de obra e serviços</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição</li> <li>• Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada</li> <li>• Análise de Falhas</li> <li>• Técnicas de confiabilidade</li> <li>• Manutenibilidade</li> <li>• Engenharia de Manutenção</li> <li>• Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida.</li> <li>• Contratação por resultados</li> </ul>

Fonte: Kardec e Nascif (2009).

### 2.1.2 Tipos de Manutenção

Segundo Mobley (2002), as atividades de manutenção podem ser classificadas em três categorias principais: corretiva após falha, corretiva planejada e preventiva. A distinção entre elas está no momento em que as ações são executadas, variando desde intervenções reativas após a falha até práticas proativas para evitar que problemas ocorram.

A manutenção de máquinas na indústria evoluiu da manutenção corretiva para a manutenção preventiva. Atualmente, as filosofias de manutenção preditiva e proativa são as mais populares. [...] A manutenção preditiva, no sentido real, é uma filosofia — uma atitude que utiliza as condições reais de operação dos equipamentos e sistemas para otimizar a operação total da planta. Observa-se, de maneira geral, que os fabricantes que começam a adotar a manutenção preditiva se tornam mais conscientes dos problemas específicos dos equipamentos e, conseqüentemente, mais motivados a corrigir as causas desses problemas, melhorando a confiabilidade e a eficiência das operações (Scheffer; Girdhar, 2004, p. 6).

Em sua obra, Kardec e Nascif (2009) propõem uma classificação de manutenção que abrange seis modalidades, facilitando a categorização de qualquer ação: Manutenção Corretiva Não Planejada, Manutenção Corretiva Planejada, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva, Manutenção Detectiva e Engenharia de Manutenção.

Figura 1 - Tipos de Manutenção



Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009).

### 2.1.3 Manutenção Preditiva

Souza (2013) descreve a Manutenção Preditiva (ou condicionada) como um conceito que emergiu nos anos 70, aprimorando a manutenção preventiva sistemática. Em vez de substituições programadas, ela se baseia em inspeções periódicas para avaliar as condições operacionais dos equipamentos. Essa modalidade de manutenção fornece informações precisas sobre o desgaste ou

degradação, permitindo estimar a vida útil restante dos componentes e assegurar que esse período seja utilizado eficientemente.

Segundo Mobley (2002), a manutenção preditiva é definida como a aplicação de técnicas de monitoramento e diagnóstico que identificam falhas potenciais antes que se tornem falhas funcionais. Ela permite que ações corretivas sejam realizadas com base em dados reais de desempenho, o que melhora significativamente a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento.

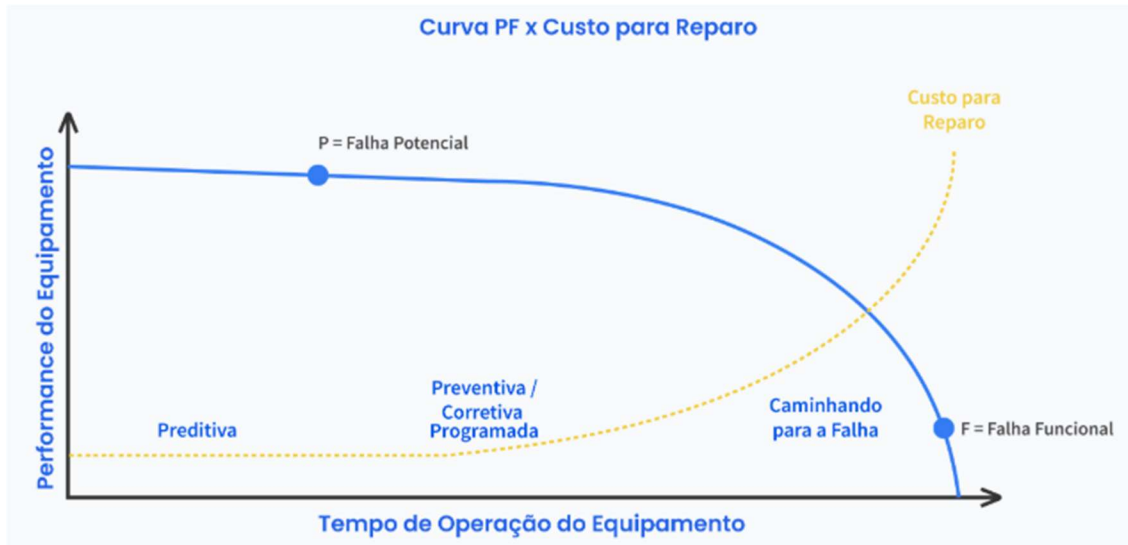
Jardine, Lin e Banjevic (2006) reforçam que a manutenção preditiva se insere no contexto da manutenção centrada na confiabilidade (Reliability-Centered Maintenance – RCM), onde decisões são baseadas na condição operacional, e não apenas no tempo de uso. As principais técnicas envolvidas incluem análise de vibrações, termografia infravermelha, ultrassom, análise de óleo, monitoramento elétrico e inspeção visual assistida por sensores inteligentes.

Gits (1994) salienta que o papel estratégico da manutenção preditiva vai além do diagnóstico técnico, contribuindo também para o planejamento da produção, redução de desperdícios e controle de qualidade. Essa abordagem se integra de forma natural aos pilares da manutenção produtiva total (TPM) e aos conceitos da Indústria 4.0.

Wireman (2004) enfatiza que a manutenção preditiva é, em essência, uma estratégia orientada por dados, na qual sensores, históricos de falhas, algoritmos preditivos e inteligência artificial desempenham um papel central. Em ambientes industriais modernos, os dados coletados são processados por sistemas integrados de manutenção computadorizada (CMMS) e plataformas de *machine learning*, permitindo análises preditivas avançadas e intervenções proativas.

A Figura 2 ilustra a Curva PF (Potencial de Falha → Falha Funcional), a qual evidencia o momento ideal para intervenção preditiva: no início do intervalo P-F, quando os sinais de falha ainda são discretos e o custo de reparo é reduzido (Revista Manutenção, 2023).

Figura 2 – Curva PF x Custo para Reparo



Fonte: Revista Manutenção (2023).

A Figura 3 reforça a importância da intervenção precoce com base em tecnologias diagnósticas. Observa-se que, quanto mais cedo a falha for detectada, menor o risco operacional e menor o impacto financeiro. (Evitech, 2023).

Figura 3 – Níveis de manutenção e evolução da falha



Fonte: Evitech (2023).

## 2.2 Análise de Óleo

A análise de óleo é uma ferramenta crucial em programas de manutenção preditiva, permitindo não apenas o monitoramento da condição dos equipamentos, mas também a identificação precoce de falhas e a verificação da integridade dos lubrificantes. Trata-se de uma técnica não destrutiva que permite avaliar tanto o estado do óleo quanto o desgaste de componentes internos, sem a necessidade de desmontagens (Fitch, 2010).

Segundo Neale (2001), o lubrificante exerce funções fundamentais como a redução do atrito e do desgaste, o resfriamento de componentes, a vedação contra contaminantes e a proteção contra corrosão. Com a evolução dos sistemas industriais, os requisitos de desempenho para os lubrificantes tornaram-se mais rigorosos, exigindo o monitoramento constante de suas propriedades físico-químicas.

De acordo com o módulo técnico da Barloworld Equipment (2002), as análises laboratoriais são divididas em quatro grandes grupos: análise de taxa de desgaste, condição do óleo, limpeza do fluido e identificação de contaminantes, como água, combustível e glicol. A técnica de espectrometria de emissão óptica, por exemplo, permite detectar e quantificar partículas metálicas (ferro, cobre, estanho, cromo, entre outras) com dimensões inferiores a 10  $\mu\text{m}$ , que indicam o desgaste de elementos internos dos sistemas lubrificados.

Entre os métodos utilizados para a análise da condição do óleo, destaca-se a espectroscopia por infravermelho (FTIR), que permite identificar compostos associados à oxidação, nitrificação, degradação térmica e contaminação por combustível ou refrigerante (Barloworld Equipment, 2002). Já a contagem de partículas, utilizada para avaliar a limpeza de óleos hidráulicos e de transmissão, permite identificar materiais metálicos e não metálicos entre 2 e 100  $\mu\text{m}$ , que não são visíveis a olho nu, mas que causam desgaste abrasivo acelerado (Managing Fluid Cleanliness, 2011).

A eficácia da análise depende diretamente da amostragem correta. Para tanto, recomenda-se o uso de válvulas de amostragem dedicadas ou bomba de vácuo, sempre descartando o tubo de amostragem após o uso em cada sistema. A ordem de coleta também deve ser respeitada: primeiro o sistema hidráulico, seguido da transmissão e, por fim, o motor. A negligência nesse processo compromete a

representatividade da amostra e pode gerar diagnósticos equivocados (Barloworld Equipment, 2002).

Figura 4 – Coleta de óleo



Fonte: Barloworld Equipment (2002).

A análise de lubrificantes, em sua forma mais elementar, visa melhorar a qualidade das decisões de manutenção e lubrificação de máquinas. Quando bem estruturado, um programa de análise de óleo é capaz de fornecer informações relevantes com baixo custo e complexidade operacional. Para isso, os testes são organizados em três categorias principais: a análise das propriedades do fluido, voltada à verificação físico-química do óleo e à estimativa de sua vida útil remanescente; a análise de contaminação, que identifica substâncias estranhas provenientes do ambiente ou formadas internamente, com potencial para comprometer a confiabilidade do sistema; e a análise de desgaste, cujo foco está na detecção de partículas metálicas geradas pelo atrito entre componentes, permitindo avaliar condições anormais e planejar intervenções de forma eficaz e oportuna (Fitch, 2010).

Com o objetivo de compreender os diferentes aspectos avaliados na análise de óleo lubrificante, o Quadro 2 apresenta as categorias de análise e os principais testes utilizados. As análises são classificadas de acordo com seu foco principal: propriedades do fluido, nível de contaminação e detritos de desgaste, permitindo identificar tanto o estado do óleo quanto as condições operacionais e de desgaste dos componentes da máquina.

Quadro 2 - Categorias de análise de óleo

O que está sendo analisado			
Testes Possíveis:	1. Propriedades do Fluido Propriedades físicas e químicas do óleo usado (processo de envelhecimento)	2. Contaminação Contaminantes destrutivos do fluido e da máquina	3. Detritos de Desgaste Presença e identificação de partículas de desgaste
Contagem de partículas	○	●	◐
Análise de umidade	○	●	○
Análise de viscosidade	●	◐	○
Densidade de detritos de	○	○	●
Ferrografia analítica	○	◐	●
AN/BN (Acidez/Basicidade)	●	◐	◐
FTIR (Espectroscopia)	●	◐	○
Teste de membrana (Patch)	○	●	◐
Ponto de fulgor	◐	●	○
Análise elementar	●	◐	●
	Proativo	Proativo	Preditivo
	● Benefício primário	◐ Benefício secundário	○ Benefício irrelevante

Fonte: Adaptado Fitch (2010).

Para Mobley (2002), a análise de óleo insere-se no contexto da Manutenção Centrada na Confiabilidade (Reliability-Centered Maintenance – RCM), auxiliando na tomada de decisões com base na condição real do equipamento. Além disso, a integração da análise de óleo com outras ferramentas preditivas, como análise de vibração, ultrassom e termografia, forma a base da Manutenção Baseada na Condição (Condition-Based Maintenance – CBM), ampliando a eficiência da gestão de ativos.

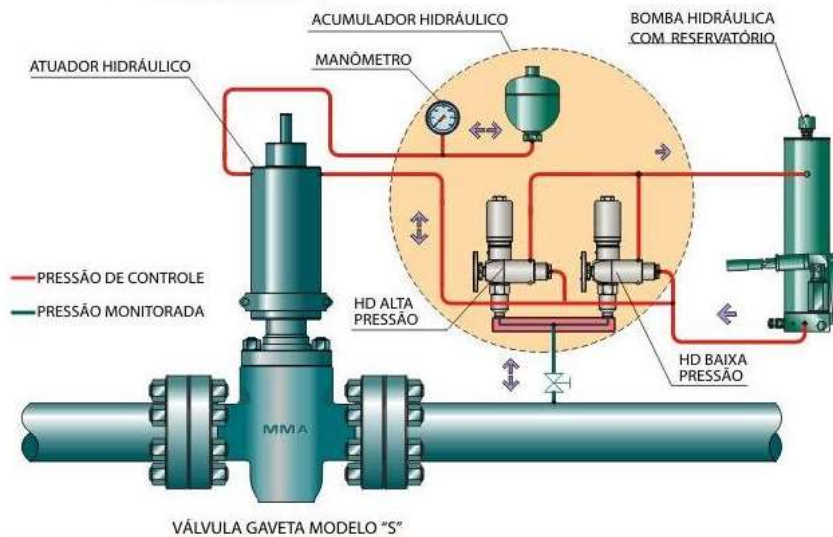
### 2.3 Sistema Hidráulico

Segundo Von Linsingen (2001), um sistema hidráulico é constituído por um conjunto de componentes físicos associados que utilizam um fluido como meio de transmissão de energia, permitindo a conversão da energia de entrada em energia mecânica útil, bem como o controle e a limitação de forças e movimentos no sistema.

De acordo com Zhang (2018), um sistema hidráulico opera como um método de transmissão de potência onde a energia mecânica é convertida em energia fluida por meio de uma bomba, sendo posteriormente transportada e controlada para realizar trabalhos úteis através de atuadores.

A Figura 5, representa um esquema hidráulico utilizado para ilustrar seu funcionamento básico.

Figura 5 – Esquema hidráulico



Fonte: Fusão Offshore (2025).

De acordo com Stephan (2020), a hidráulica possibilita a realização de grandes esforços mecânicos com um número reduzido de componentes estruturais, o que a torna particularmente adequada para máquinas móveis de grande porte, como colhedoras agrícolas, onde há restrições de espaço e necessidade de elevada robustez operacional.

Manring e Fales (2020) destacam que o fluido hidráulico não é apenas um meio de transmissão de força, mas também desempenha papéis cruciais na lubrificação de componentes internos, na vedação de folgas e na dissipação de calor gerado durante a operação do sistema.

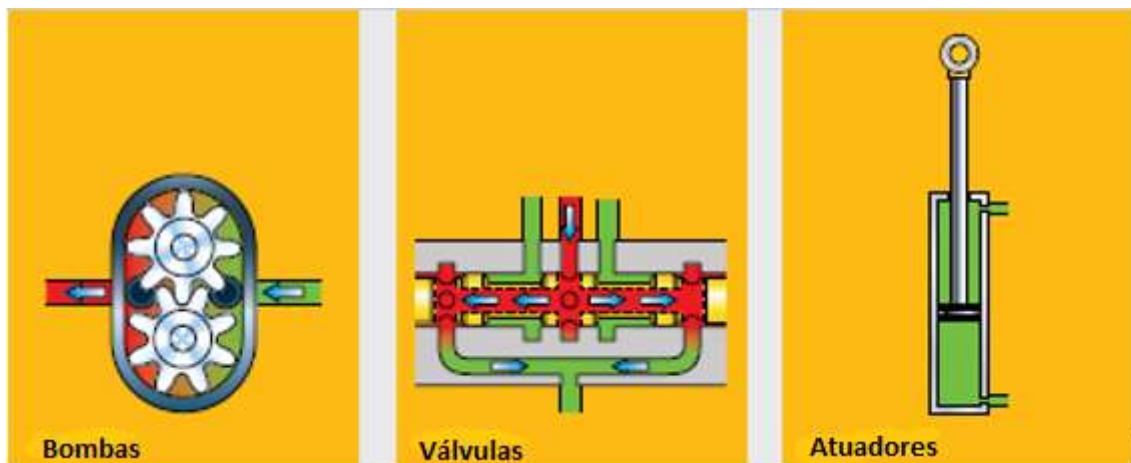
### 2.3.1 Componentes do Sistema Hidráulico

De acordo com a Caterpillar Inc. (2012), os sistemas hidráulicos são formados por componentes como bombas, válvulas de controle, cilindros, motores hidráulicos, mangueiras e tubulações. A compreensão do funcionamento desses elementos e das principais causas de desgaste prematuro ou falhas é fundamental para aumentar a vida útil e a confiabilidade do sistema hidráulico, reduzindo custos operacionais, minimizando paradas não planejadas e elevando a disponibilidade e o desempenho das máquinas.

As bombas hidráulicas convertem energia mecânica em energia hidráulica por meio da criação de um fluxo de fluido hidráulico. Existem três tipos básicos de bombas: bombas de engrenagem, bombas de palhetas e bombas de pistão. Os atuadores convertem a energia hidráulica novamente em trabalho mecânico, sendo classificados em cilindros hidráulicos e motores hidráulicos. As válvulas são responsáveis por controlar o comportamento do fluido hidráulico, podendo ser do tipo válvulas de pressão, válvulas de fluxo e válvulas direcionais (Caterpillar Inc., 2012).

A Figura 6 ilustra os principais componentes que compõem um sistema hidráulico.

Figura 6 - Componentes Sistema Hidráulico



Fonte: Adaptado de Caterpillar Inc. (2012).

### 2.3.2 Tipos de Óleos Hidráulicos

Os óleos hidráulicos podem ser classificados de acordo com sua composição e aplicação, destacando-se os óleos minerais, sintéticos e biodegradáveis. Os óleos minerais são amplamente utilizados em sistemas hidráulicos industriais e móveis devido ao seu bom desempenho e custo reduzido, enquanto os óleos sintéticos oferecem maior estabilidade térmica e resistência à oxidação, sendo indicados para condições operacionais severas. Já os óleos biodegradáveis são formulados para minimizar impactos ambientais, sendo recomendados para aplicações em áreas sensíveis. A correta escolha do óleo hidráulico deve considerar fatores como viscosidade, condições de operação, compatibilidade com o sistema e exigências ambientais (Totalenergies, 2023).

### **2.3.3 Confiabilidade e Falhas em Sistemas Hidráulicos**

Segundo Mobley (2002), falhas em sistemas hidráulicos estão entre as principais causas de paradas não planejadas em máquinas industriais e móveis, sendo majoritariamente associadas à contaminação do fluido, desgaste progressivo dos componentes e ausência de estratégias de manutenção baseadas em condição.

A presença de contaminantes no fluido hidráulico, aliada ao aumento de sua temperatura de operação, pode comprometer características essenciais do óleo, como a viscosidade e o nível de acidez. Essas alterações reduzem a eficiência da lubrificação, favorecendo o desgaste acelerado dos componentes, o surgimento de vazamentos, atrasos na resposta do sistema, funcionamento inadequado das sequências operacionais, danos às bobinas de solenoides e, conseqüentemente, a ocorrência de falhas prematuras nos componentes do sistema (Gomes et al., 2008).

De acordo com a Parker Hannifin (2019), o desempenho e a vida útil dos sistemas hidráulicos estão diretamente relacionados à limpeza do fluido e ao controle adequado das condições de operação. Falhas hidráulicas frequentemente resultam em paradas não planejadas e elevados custos de reparo, uma vez que os componentes hidráulicos apresentam alto valor agregado e exigem mão de obra especializada para manutenção.

De acordo com a CASE IH (2023), a eficiência e a confiabilidade dos sistemas hidráulicos dependem do correto controle da vazão e da pressão, da qualidade do fluido hidráulico e da aplicação de estratégias de manutenção baseadas no monitoramento contínuo das condições de operação. A integração entre sistemas hidráulicos e eletrônicos possibilita a detecção precoce de falhas, reduzindo paradas não planejadas e aumentando a disponibilidade e o desempenho das máquinas agrícolas.

## **2.4 Monitoramento Online de Fluidos**

O avanço das tecnologias embarcadas e da manutenção preditiva tem impulsionado a adoção de métodos mais tecnológicos para monitoramento de fluidos como uma estratégia eficaz para o controle da saúde operacional de equipamentos pesados. O monitoramento online consiste na coleta contínua e automatizada de

dados dos lubrificantes e fluidos operacionais, por meio de sensores instalados diretamente nos sistemas do equipamento (Kardec; Nascif, 2009).

Segundo Fitch (2010), enquanto a análise de óleo tradicional (off-line) exige a retirada de amostras e envio ao laboratório, o monitoramento online oferece a vantagem de capturar dados em tempo real, permitindo a detecção precoce de falhas, o acompanhamento de tendências de degradação e a tomada de decisão imediata, sem a necessidade de paradas prolongadas.

Conforme destacado por Mobley (2002), a adoção de tecnologias de monitoramento de condição, como o monitoramento online de fluidos, está diretamente ligada à confiabilidade operacional, à redução de custos com manutenção corretiva, e ao aumento do tempo médio entre falhas (MTBF).

O acompanhamento sistemático das propriedades físico-químicas do óleo hidráulico configura-se como uma ferramenta eficaz não apenas para verificar a sua aptidão ao uso prolongado, mas também para fornecer subsídios sobre o estado geral dos componentes internos do sistema hidráulico. Nesse contexto, a adoção de práticas de manutenção preditiva, especialmente aquelas baseadas no monitoramento contínuo da degradação do fluido, mostra-se fundamental para a diminuição da ocorrência de falhas e para a ampliação da vida útil dos equipamentos (Fioravanti et al., 2020).

Conforme descrito por Predic (2025), as variáveis temperatura, viscosidade, densidade, atividade de água (aw), umidade dissolvida e constante dielétrica são fundamentais para o monitoramento online de fluidos, uma vez que permitem a identificação precoce de processos de contaminação, degradação do óleo e o surgimento de falhas iminentes. A temperatura influencia diretamente o comportamento físico-químico do óleo, podendo acelerar reações de oxidação, degradar aditivos e alterar a viscosidade, comprometendo a formação do filme lubrificante. A viscosidade, por sua vez, está relacionada à resistência ao escoamento e é essencial para garantir a lubrificação adequada dos componentes, sendo que valores fora da faixa especificada podem resultar em desgaste acelerado e perda de eficiência hidráulica. A densidade reflete a composição química do fluido, e variações nesse parâmetro podem indicar contaminação por água, combustíveis ou subprodutos da oxidação. A atividade de água (aw) representa a fração de água livre disponível no óleo, capaz de participar ativamente de reações químicas, enquanto a umidade dissolvida, mesmo em baixas concentrações, pode intensificar processos de

oxidação, aumentar a acidez e reduzir a eficiência dos aditivos. Por fim, a constante dielétrica é sensível a alterações na composição química do óleo, sendo influenciada pela presença de água, contaminantes polares e produtos de degradação, constituindo um importante indicador do estado de saúde do fluido hidráulico

Desse modo, o monitoramento online de fluidos representa uma evolução natural da análise de óleo tradicional, promovendo um modelo de manutenção baseada em condição (CBM) mais preciso, automatizado e alinhado às exigências da indústria 4.0. Essa abordagem tem se mostrado eficaz na prevenção de falhas, redução de custos com manutenção corretiva e prolongamento da vida útil do equipamento (Moblely, 2002).

### **3 METODOLOGIA**

Este trabalho configura-se como uma pesquisa aplicada, com abordagens qualitativa e quantitativa, centrada no uso do monitoramento online de fluidos como ferramenta de manutenção preditiva. A pesquisa foi desenvolvida por meio da aplicação de um estudo de caso no sistema hidráulico da colhedora de cana-de-açúcar Case IH A9900, utilizada em operações de grande porte no setor sucroenergético.

Segundo Gil (2010), a pesquisa aplicada busca gerar conhecimentos para aplicação prática, voltados à solução de problemas específicos. No presente estudo, esse conhecimento será aplicado na área de manutenção de equipamentos agrícolas. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa descritiva, complementada por elementos explicativos. De acordo com Vergara (2016), a pesquisa descritiva visa relatar características de um fenômeno específico, enquanto a pesquisa explicativa busca identificar as causas que contribuem para a ocorrência desse fenômeno.

A metodologia utilizada será composta pelas seguintes etapas: coleta de dados técnicos e operacionais, análise dos dados obtidos e avaliação da eficácia do monitoramento online de fluidos.

Segundo Yin (2015), o estudo de caso é uma estratégia metodológica adequada para análises aprofundadas de fenômenos em seus contextos reais, especialmente quando há pouca separação entre o fenômeno e o ambiente em que ocorre.

Os dados coletados permitiram avaliar o comportamento do óleo em tempo real e sua correlação com potenciais falhas do sistema hidráulico. Foram utilizados softwares, sensores de monitoramento (sensor 6 em 1), painel/controlador, planilhas de análise, e as informações extraídas dos manuais técnicos do fabricante.

Por fim, o estudo se restringiu à análise do sistema hidráulico da colhedora Case IH A9900, não incluindo outros sistemas da máquina, como o motor diesel ou sistemas pneumáticos.

#### **3.1 Colhedora Case IH A9900**

A colhedora de cana-de-açúcar Case IH A9900, pertencente à Série Austoft 9000, foi projetada para atender às demandas de alta produtividade e baixo custo

operacional. De acordo com a Case IH (2023), este modelo apresenta um equilíbrio otimizado entre potência e eficiência hidráulica, graças ao sistema de processamento de cana e aos ventiladores de limpeza que utilizam tecnologia de fluxo variável. O fabricante enfatiza que a integração de sistemas inteligentes e a conectividade via AFS (Advanced Farming Systems) que consiste em um conjunto integrado de tecnologias voltadas à automação, monitoramento preciso do desempenho da máquina e controle das operações agrícolas, exigindo que o fluido hidráulico mantenha propriedades estáveis para garantir a resposta rápida dos componentes eletrônicos e mecânicos.

A Figura 7 ilustra a colhedora Case IH A9900, conforme apresentado no folheto técnico do fabricante.

Figura 7 - Colhedora Case IH A9900



Fonte: CASE IH (2023).

Segundo a Case IH (2023), a colhedora é equipada com o motor FPT Cursor 11, com potência de 420 cv (310 kW), o qual apresenta elevado desempenho aliado à economia de combustível, resultado de uma melhor atomização do combustível na câmara de combustão, promovida pelo movimento da névoa de combustível e pela eficiente mistura entre ar e combustível. O sistema hidráulico utiliza bombas de pistão inteligentes com controle eletrônico individual, permitindo o ajuste preciso da vazão para cada função hidráulica, o que reduz desperdícios de potência e melhora a eficiência energética do equipamento.

O sistema hidráulico das colhedoras de cana Austoft 9900 foi projetado com bombas de pistão dedicadas para as principais funções de colheita, permitindo uma utilização mais eficiente da potência do motor. Em função da maior eficiência do conjunto de bombeamento, ocorre menor geração de calor, possibilitando que o sistema opere com temperaturas mais baixas do óleo hidráulico, o que contribui para o aumento da vida útil dos componentes e a redução do consumo de combustível. Além disso, o redimensionamento do roteamento hidráulico reduz perdas de carga e eleva a eficiência global do sistema. (CASE IH, 2023).

A Figura 8 ilustra o sistema hidráulico da colhedora Case IH A9900, conforme apresentado no folheto técnico do fabricante, composto por um conjunto de componentes responsáveis pela geração, controle, distribuição e retorno da potência hidráulica aos diferentes subsistemas da máquina.

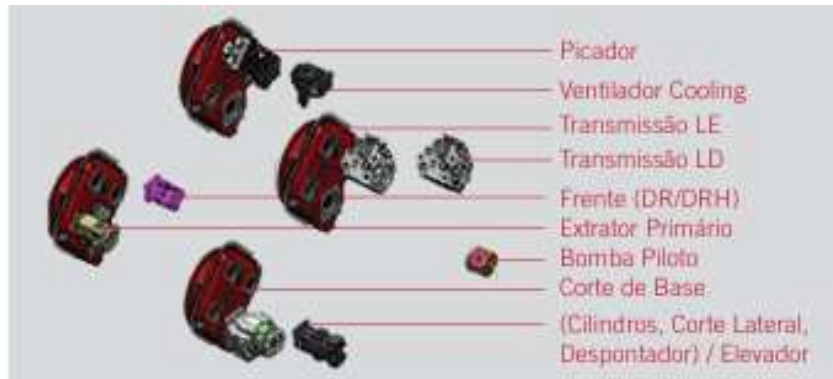
Figura 8 - Sistema hidráulico colhedora Case IH A9900



Fonte: CASE IH (2023).

A colhedora se destaca pela elevada complexidade de seus sistemas hidráulicos, os quais são responsáveis pelo acionamento de funções críticas durante o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Na Figura 9, destacam-se o sistema de corte de base, os rolos alimentadores, o picador, os extratores primário e secundário, bem como os sistemas de direção e transmissão hidrostática.

Figura 9 - Funções sistema hidráulico colhedora Case IH A9900



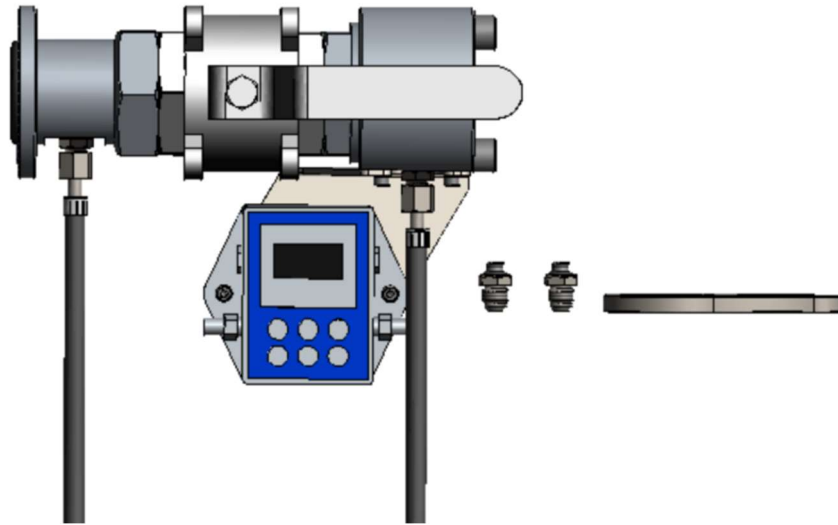
Fonte: CASE IH (2023).

A confiabilidade das operações citadas anteriormente está diretamente associada à condição do fluido hidráulico, que atua simultaneamente como meio de transmissão de potência, lubrificante e agente de dissipação térmica. Diferente de sistemas mecânicos puramente lubrificados, o sistema hidráulico da colhedora Case IH A9900 opera sob o princípio da transmissão de potência hidrostática. De acordo com Von Linsingen (2001), a eficiência global desses sistemas depende da incompressibilidade do óleo e da estabilidade de sua viscosidade cinemática.

### 3.2 Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada durante o período experimental compreendido entre 01/09/2025 e 31/10/2025, por meio da utilização do sensor Predic multiparamétrico 6 em 1, instalado no sistema hidráulico da colhedora de cana-de-açúcar Case IH A9900, com o objetivo de realizar o monitoramento online das condições do fluido hidráulico. O sensor Predic foi instalado em um conjunto que inclui flange, manifold e conexões hidráulicas, conforme ilustrado na Figura 10, garantindo maior confiabilidade na aquisição dos dados e facilidade de manutenção.

Figura 10 - Conjunto de instalação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O conjunto de instalação foi conectado ao sistema hidráulico da colhedora por meio de conectores hidráulicos e mangueiras de alta pressão, garantindo a circulação do fluido até os pontos de medição, sem interferir no funcionamento do equipamento. Durante a instalação, foram realizados registros fotográficos do conjunto completo montado, incluindo o manifold, sensores e o módulo de gerenciamento (controlador/painel). As Figuras 11, 12 e 13 apresentam, respectivamente, esses elementos, permitindo a visualização do arranjo físico adotado.

Figura 11 - Manifold



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 12 - Conjunto instalado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 13 - Módulo de gerenciamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O sensor Predic 6 em 1 representa uma solução tecnológica avançada para o monitoramento contínuo e online da condição de fluidos industriais, com aplicação destacada em óleos lubrificantes e isolantes. O dispositivo integra, em um único corpo compacto, a medição simultânea de seis variáveis físico-químicas fundamentais como viscosidade, temperatura, densidade, saturação, constante dielétrica e umidade, permitindo o acompanhamento contínuo de parâmetros diretamente associados ao desgaste de componentes, à contaminação do fluido e à degradação do óleo ao longo do tempo. Dessa forma, o sensor Predic possibilita uma avaliação abrangente da saúde do fluido e, conseqüentemente, do desempenho e da confiabilidade dos equipamentos monitorados.

De acordo com as especificações técnicas do fabricante, o sensor apresenta faixa de medição de temperatura de 0 a 120°C, densidade entre 0,6 e 1,25 kg/m<sup>3</sup>, viscosidade de até 1000 cSt, constante dielétrica na faixa de 1 a 6, atividade de água entre 0 e 1 aW e umidade de 0 a 5000 ppm, permitindo uma análise abrangente do estado do fluido hidráulico em tempo real.

A Figura 14 ilustra o sensor Predic 6 em 1 utilizado neste estudo de caso.

Figura 14 - Sensor Predic 6 em 1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Os dados coletados pelo sensor Predic 6 em 1 foram transmitidos a um controlador IoT, responsável pelo processamento inicial das informações e pela comunicação com o sistema de monitoramento. O controlador possibilita a integração de múltiplos sensores por meio de um gateway, permitindo o acompanhamento contínuo da condição do ativo, com tráfego de dados rápido e confiável. Essa arquitetura contribuiu para a identificação precoce de falhas potenciais, redução de danos aos componentes hidráulicos e otimização dos intervalos de troca de óleo.

### 3.3 Variáveis monitoradas

As variáveis monitoradas - Temperatura, Densidade, Viscosidade, Atividade de água (aw), Umidade em água dissolvida e Constante dielétrica — são fundamentais para identificar sinais precoces de contaminação, degradação e falhas iminentes em sistemas hidráulicos, motores, transmissões e outros ativos críticos. A medição simultânea e correlacionada dessas variáveis possibilita uma visão holística do estado do fluido, superando as limitações dos métodos tradicionais de análise pontual e manual.

### **3.3.1 Temperatura**

No monitoramento online, a temperatura é utilizada como indicador de sobrecarga térmica, falhas no sistema de resfriamento e condições operacionais inadequadas (Predic, 2025).

### **3.3.2 Viscosidade**

No monitoramento online, a viscosidade é utilizada para avaliar a condição do óleo e a adequação do fluido à aplicação (Predic, 2025).

### **3.3.3 Densidade**

No monitoramento online, a densidade auxilia na identificação de diluição, adulteração do óleo e degradação avançada do fluido (Predic, 2025).

### **3.3.4 Atividade de água (aw)**

No contexto do monitoramento online, essa variável é fundamental para detectar a presença de água livre e avaliar o potencial de degradação do fluido e dos componentes do sistema (Predic, 2025).

### **3.3.5 Umidade**

O monitoramento da umidade permite identificar infiltrações, condensação interna e falhas de vedação, contribuindo para a prevenção de corrosão e falhas prematuras (Predic, 2025).

### **3.3.6 Constante Dielétrica**

No monitoramento online, a constante dielétrica é utilizada como um indicador global da degradação do óleo e de contaminações químicas (Predic, 2025).

O Quadro 3 apresenta a descrição das principais variáveis monitoradas e suas inter-relações com a constante dielétrica do óleo hidráulico, evidenciando o caráter complementar desses parâmetros no diagnóstico da condição do fluido.

Quadro 3 – Inter-relações com a Constante Dielétrica

Variável	O que indica?	Relação com a constante dielétrica
Temperatura	Afeta propriedades físicas e químicas do óleo	A constante dielétrica diminui levemente com temperatura, mas pode aumentar se houver contaminação por água ou oxidação.
Densidade	Indica degradação, aditivação ou contaminação	Pequenas variações não afetam muito, mas mudanças abruptas (água, diesel) afetam ambas as variáveis.
Viscosidade	Relaciona-se ao desempenho lubrificante e envelhecimento	Geralmente, viscosidade e constante dielétrica aumentam com oxidação e contaminação.
Atividade de água	Mede a disponibilidade de água livre (0 a 1)	Quando $a_w > 0,5$ , constante dielétrica aumenta drasticamente devido à polaridade da água.
Umidade	Quantidade de água molecular dissolvida (ppm)	Mesmo pequenas quantidades aumentam a constante dielétrica, bom indicador precoce.
Constante dielétrica	Indicador sensível à contaminação por água, oxidação e produtos polares	Complementa o diagnóstico, detectando contaminações químicas mesmo quando outras variáveis estão estáveis.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

### 3.4 Monitoramento Online do fluido hidráulico

As medições foram coletadas em tempo real, com periodicidade de um minuto, ao longo de um período contínuo de dois meses de operação, permitindo a análise do comportamento das variáveis monitoradas sob condições reais de trabalho.

A Figura 15 ilustra a configuração do sistema de monitoramento online onde apresenta o comportamento das variáveis monitoradas pelo sensor Predic 6 em 1 da colhedora Case IH A9900.

Figura 15 - Sistema de Monitoramento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do monitoramento online do fluido hidráulico da colhedora de cana-de-açúcar Case IH A9900, realizado por meio do sensor Predic 6 em 1 instalado no sistema hidráulico do equipamento.

Os dados obtidos referem-se às variáveis de viscosidade, temperatura, densidade, constante dielétrica, saturação e umidade do óleo hidráulico, as quais foram analisadas ao longo do período de dois meses de monitoramento, visando identificar tendências, variações operacionais e possíveis indícios de degradação do fluido.

### **4.1 Análise dos Alertas Gerados pelo Monitoramento**

A partir das medições contínuas realizadas durante o período de monitoramento, foram identificados eventos de alerta associados a variações nos parâmetros do fluido hidráulico. Esses alertas foram analisados individualmente, com o objetivo de avaliar seu impacto potencial no desempenho do sistema hidráulico e sua contribuição para a manutenção preditiva do equipamento.

#### **4.1.1 Temperatura Elevada**

A Tabela 1 apresenta os eventos de alarme relacionados à temperatura elevada, com datas e valores registrados, evidenciando que a temperatura exerce influência direta e significativa no comportamento físico-químico do óleo lubrificante, impactando tanto suas propriedades quanto o desempenho do equipamento. Observou-se a ocorrência recorrente de alarmes de temperatura elevada, com valores variando entre aproximadamente 70 °C e 80,8 °C, ultrapassando de forma contínua o critério estabelecido pelo laboratório Predic de 70 °C, o que caracteriza uma condição de sobrecarga térmica prolongada do sistema.

Tabela 1 – Alarmes Temperatura Alta

<b>Alarme</b>	<b>Data do evento</b>	<b>Valor (°C)</b>	<b>Critério &gt;=</b>
Temperatura elevada	10/09/2025 09:40	79.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 10:57	80.4	70
Temperatura elevada	10/09/2025 10:58	79.7	70
Temperatura elevada	10/09/2025 11:36	80.0	70
Temperatura elevada	10/09/2025 11:46	79.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 12:44	80.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 12:45	79.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 12:51	80.8	70
Temperatura elevada	10/09/2025 12:56	80.0	70
Temperatura elevada	10/09/2025 12:59	80.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:03	78.7	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:07	80.3	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:11	79.5	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:12	80.3	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:17	79.5	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:22	80.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:28	79.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:30	80.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:42	78.7	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:52	80.3	70
Temperatura elevada	10/09/2025 13:58	79.7	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:00	80.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:07	79.8	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:26	80.3	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:27	79.7	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:38	80.4	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:40	78.0	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:52	80.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 14:56	78.5	70
Temperatura elevada	10/09/2025 15:00	80.5	70
Temperatura elevada	10/09/2025 15:11	79.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 15:12	80.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 15:34	72.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 16:00	80.0	70
Temperatura elevada	10/09/2025 16:07	78.5	70
Temperatura elevada	10/09/2025 16:10	80.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 16:13	78.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 17:18	80.4	70
Temperatura elevada	10/09/2025 17:23	77.3	70
Temperatura elevada	10/09/2025 18:46	70.2	70
Temperatura elevada	10/09/2025 19:24	71.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 19:34	72.3	70
Temperatura elevada	10/09/2025 20:55	71.0	70
Temperatura elevada	10/09/2025 22:26	70.5	70
Temperatura elevada	10/09/2025 22:30	71.3	70

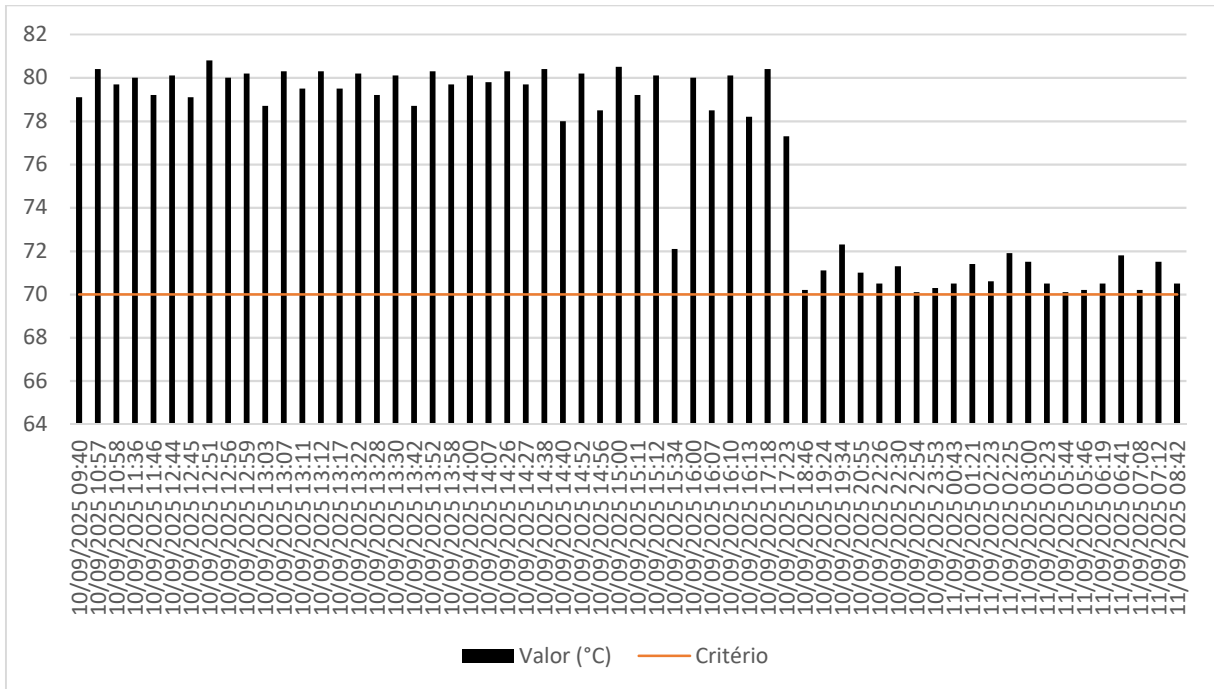
Temperatura elevada	10/09/2025 22:54	70.1	70
Temperatura elevada	10/09/2025 23:53	70.3	70
Temperatura elevada	11/09/2025 00:43	70.5	70
Temperatura elevada	11/09/2025 01:21	71.4	70
Temperatura elevada	11/09/2025 02:23	70.6	70
Temperatura elevada	11/09/2025 02:25	71.9	70
Temperatura elevada	11/09/2025 03:00	71.5	70
Temperatura elevada	11/09/2025 05:23	70.5	70
Temperatura elevada	11/09/2025 05:44	70.1	70
Temperatura elevada	11/09/2025 05:46	70.2	70
Temperatura elevada	11/09/2025 06:19	70.5	70
Temperatura elevada	11/09/2025 06:41	71.8	70
Temperatura elevada	11/09/2025 07:08	70.2	70
Temperatura elevada	11/09/2025 07:12	71.5	70
Temperatura elevada	11/09/2025 08:42	70.5	70

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O aumento da temperatura intensifica a cinética das reações químicas no óleo, conforme descrito pela regra de Arrheniu, segundo a qual incrementos térmicos nessa faixa promovem aceleração significativa dos processos de oxidação.

O Gráfico 1 ilustra a frequência dos alarmes de temperatura elevada, destacando a predominância de medições entre 70 °C e 80 °C, verifica-se um ambiente favorável à intensificação da degradação oxidativa do fluido lubrificante ao longo do tempo, mesmo não se tratando de temperaturas extremas.

Gráfico 1- Alarmes Temperatura Elevada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Em condições de temperatura elevada, ocorre também a quebra térmica (*cracking*) das moléculas constituintes do óleo, especialmente em óleos sintéticos e bases minerais de menor estabilidade térmica. Esse processo resulta na formação de subprodutos indesejáveis, como ácidos orgânicos, aldeídos e cetonas, que contribuem para a deterioração química do lubrificante. Paralelamente, a exposição prolongada a temperaturas superiores ao limite recomendado favorece a degradação dos aditivos antioxidantes, antiespumantes, dispersantes e antidesgaste, reduzindo sua eficiência funcional e contribuindo para a formação de verniz e borra (Predic, 2025).

A formação acelerada desses depósitos, especialmente em superfícies metálicas submetidas de forma contínua a condições térmicas elevadas, promove o aumento do atrito e intensifica o desgaste por c

ntato metal-metal, comprometendo a integridade dos componentes mecânicos do sistema hidráulico (Predic, 2025).

Do ponto de vista das propriedades físico-químicas, a elevação da temperatura do óleo resulta na redução da viscosidade dinâmica em função da dilatação térmica, afetando diretamente a espessura e a estabilidade do filme lubrificante. Além disso, o consumo acelerado dos aditivos antioxidantes está

associado ao aumento da oxidação do fluido. A presença de compostos insolúveis, como verniz e borra, contribui para o aumento do material particulado em suspensão, indicando alterações estruturais no óleo que reduzem sua capacidade de lubrificação e de dissipação térmica (Predic, 2025).

Com base nos resultados observados, as principais falhas indicadas estão associadas à sobrecarga térmica do sistema, possivelmente decorrente de falhas nos resfriadores, condições ambientais adversas ou aumento do atrito interno entre componentes. Adicionalmente, a utilização de lubrificantes inadequados ao regime térmico da aplicação e problemas de vedação que favorecem a retenção e o acúmulo de calor interno foram identificados como fatores contribuintes para a degradação acelerada do óleo e para o comprometimento do desempenho do sistema.

#### 4.1.2 Viscosidade Alta

Durante o período de monitoramento online do fluido hidráulico, foram identificados 19 eventos de alarme mostrados na Tabela 2, relacionados à viscosidade elevada, todos caracterizados por valores superiores ao limite estabelecido de 100 cSt.

Tabela 2 - Alarmes Viscosidade Alta

Alarme	Data do evento	Valor (cSt)	Critério >=
Viscosidade Alta	04/09/2025 13:55	110,6682	100,0000
Viscosidade Alta	09/09/2025 07:21	147,4989	100,0000
Viscosidade Alta	11/09/2025 05:00	113,4179	100,0000
Viscosidade Alta	12/09/2025 00:40	103,0078	100,0000
Viscosidade Alta	12/09/2025 09:12	108,6619	100,0000
Viscosidade Alta	15/09/2025 23:31	100,474	100,0000
Viscosidade Alta	17/09/2025 07:33	232,3015	100,0000
Viscosidade Alta	19/09/2025 02:38	114,2946	100,0000
Viscosidade Alta	19/09/2025 03:36	107,2181	100,0000
Viscosidade Alta	22/09/2025 10:14	104,5593	100,0000
Viscosidade Alta	22/09/2025 22:24	126,2343	100,0000
Viscosidade Alta	22/09/2025 23:02	106,6291	100,0000
Viscosidade Alta	23/09/2025 05:58	156,5175	100,0000
Viscosidade Alta	23/09/2025 19:35	105,1088	100,0000
Viscosidade Alta	23/09/2025 22:34	123,0057	100,0000
Viscosidade Alta	24/09/2025 01:11	136,2147	100,0000
Viscosidade Alta	25/09/2025 06:12	141,6712	100,0000

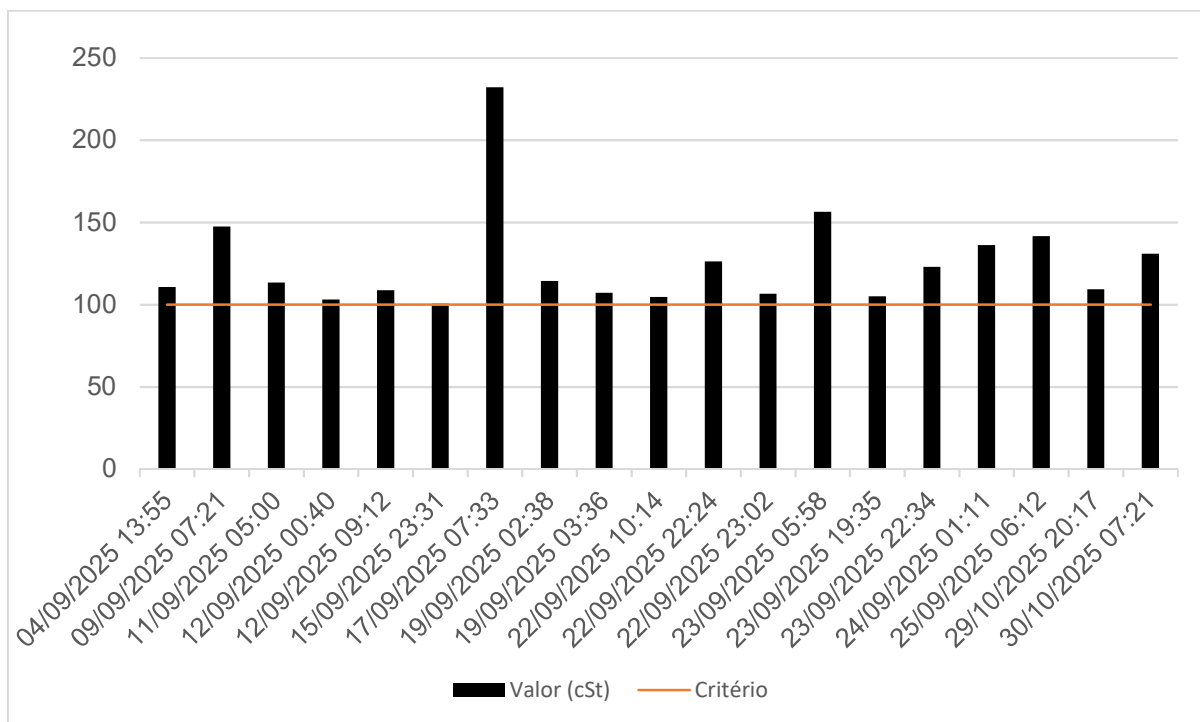
Viscosidade Alta	29/10/2025 20:17	109,2201	100,0000
Viscosidade Alta	30/10/2025 07:21	130,9987	100,0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Os valores de viscosidade observados variaram de 100,47 cSt a 232,30 cSt, sendo este último registrado em 17/09/2025 às 07:33, representando uma condição crítica de operação. A recorrência desses eventos ao longo do período analisado indica que o fluido hidráulico operou, em diversos momentos, fora da faixa ideal de viscosidade recomendada para sistemas hidráulicos móveis.

O Gráfico 2 apresenta a evolução temporal dos alarmes de viscosidade elevada, evidenciando a dispersão dos eventos ao longo do período analisado e a ocorrência de picos expressivos, que reforçam a condição de instabilidade das propriedades reológicas do fluido.

Gráfico 2 - Alarmes Viscosidade Alta



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Do ponto de vista físico, a elevação da viscosidade está diretamente associada ao aumento da resistência ao escoamento do fluido, o que compromete sua circulação adequada nos componentes hidráulicos. Essa condição resulta em

maiores perdas de carga, exigindo maior esforço das bombas e reduzindo a eficiência do sistema como um todo.

Adicionalmente, a viscosidade elevada prejudica a capacidade do fluido em dissipar calor, favorecendo a retenção térmica e o aumento da temperatura de operação. Esse cenário cria um ambiente propício à aceleração de processos de degradação do óleo, como oxidação térmica e formação de subprodutos indesejáveis.

Sob a ótica físico-química, o aumento da viscosidade pode estar relacionado à oxidação do óleo base, à degradação dos aditivos e à presença de contaminantes sólidos ou líquidos. Esses fatores contribuem para a formação de verniz, borra e depósitos polares, que se acumulam em superfícies internas, válvulas e filtros, intensificando o desgaste dos componentes.

Nesse contexto, os alarmes recorrentes de viscosidade elevada indicam uma condição crítica de operação, associada ao aumento do atrito interno, redução da eficiência hidráulica e potencial risco de falhas prematuras no sistema. Assim, os resultados reforçam a importância do monitoramento online da viscosidade como ferramenta essencial de manutenção preditiva, permitindo a identificação antecipada de anomalias e a tomada de decisões corretivas antes da ocorrência de danos severos ao equipamento.

#### 4.1.3 Viscosidade Baixa

Foram identificados 21 eventos de alarme de baixa viscosidade conforme apresentado na Tabela 3, um fator crítico para o desempenho do sistema hidráulico, com valores variando entre 13,10 cSt e 16,97 cSt, evidenciando desvios significativos em relação à condição ideal de operação do sistema hidráulico.

Tabela 3 - Alarmes Viscosidade Baixa

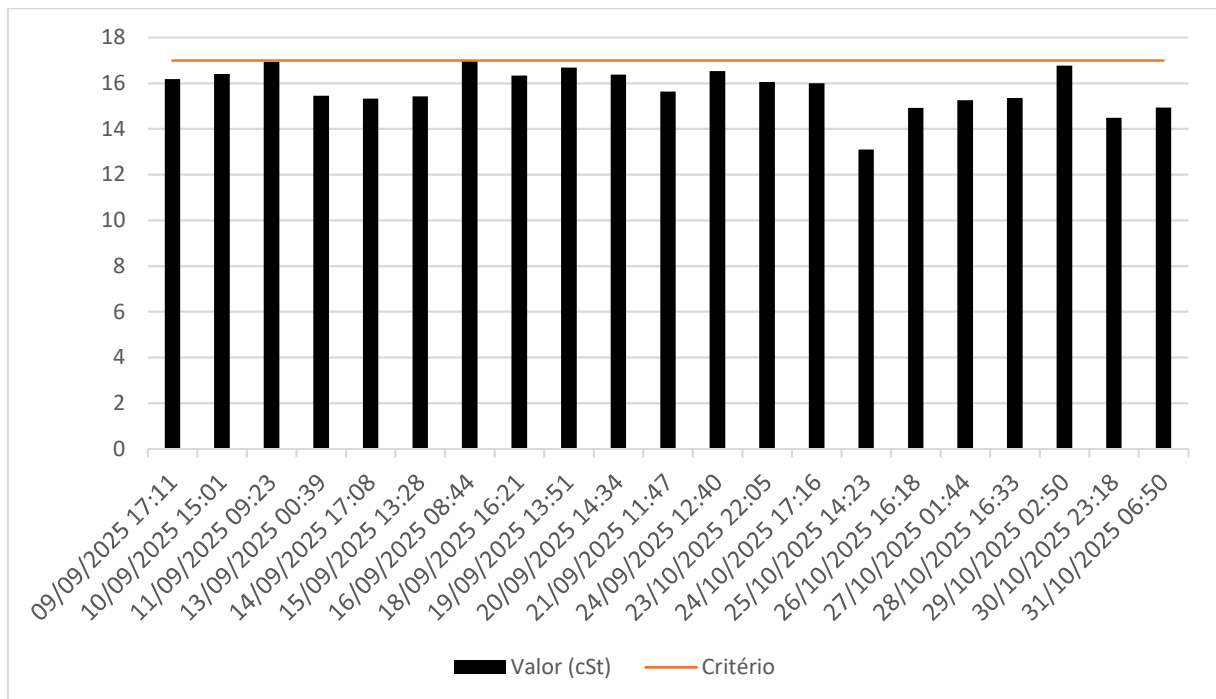
Alarme	Data do evento	Valor (cSt)	Critério >=
Viscosidade baixa	09/09/2025 17:11	16,1769	17,0000
Viscosidade baixa	10/09/2025 15:01	16,4043	17,0000
Viscosidade baixa	11/09/2025 09:23	16,9296	17,0000
Viscosidade baixa	13/09/2025 00:39	15,4546	17,0000
Viscosidade baixa	14/09/2025 17:08	15,3215	17,0000
Viscosidade baixa	15/09/2025 13:28	15,418	17,0000

Viscosidade baixa	16/09/2025 08:44	16,9731	17,0000
Viscosidade baixa	18/09/2025 16:21	16,3311	17,0000
Viscosidade baixa	19/09/2025 13:51	16,6856	17,0000
Viscosidade baixa	20/09/2025 14:34	16,3715	17,0000
Viscosidade baixa	21/09/2025 11:47	15,6335	17,0000
Viscosidade baixa	24/09/2025 12:40	16,5216	17,0000
Viscosidade baixa	23/10/2025 22:05	16,0557	17,0000
Viscosidade baixa	24/10/2025 17:16	15,9888	17,0000
Viscosidade baixa	25/10/2025 14:23	13,1	17,0000
Viscosidade baixa	26/10/2025 16:18	14,9159	17,0000
Viscosidade baixa	27/10/2025 01:44	15,2483	17,0000
Viscosidade baixa	28/10/2025 16:33	15,3468	17,0000
Viscosidade baixa	29/10/2025 02:50	16,7606	17,0000
Viscosidade baixa	30/10/2025 23:18	14,4811	17,0000
Viscosidade baixa	31/10/2025 06:50	14,9291	17,0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O Gráfico 3 ilustra a frequência dos alarmes de viscosidade baixa, mostrando uma tendência de redução dos valores ao longo do mês de setembro e um agravamento em outubro.

Gráfico 3 - Viscosidade Baixa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Do ponto de vista físico-químico, a redução da viscosidade do óleo compromete diretamente o regime de lubrificação, resultando na formação de um filme

lubrificante mais fino e mecanicamente menos resistente. Essa condição reduz a capacidade do fluido em manter a separação adequada entre superfícies metálicas em movimento relativo, favorecendo a transição do regime de lubrificação hidrodinâmico para regimes misto ou limite, nos quais o contato metal-metal se torna mais frequente (Predic, 2025).

A diminuição da espessura da película lubrificante intensifica os níveis de atrito e acelera os mecanismos de desgaste superficial, afetando negativamente o desempenho tribológico do sistema hidráulico. Além disso, a baixa viscosidade limita a capacidade do óleo em suportar cargas hidrodinâmicas elevadas, promovendo elevação localizada da temperatura devido ao atrito excessivo, o que cria condições favoráveis à degradação térmica e oxidativa do fluido (Predic, 2025).

Observou-se ainda a perda acelerada da eficácia dos aditivos, uma vez que o aumento da temperatura e a degradação do óleo comprometem a estabilidade do pacote aditivante, afetando diretamente as propriedades antioxidantes, antidesgaste e de proteção superficial. Essas alterações contribuem para a instabilidade do lubrificante e para a redução da vida útil do fluido.

As modificações nas propriedades do óleo refletiram-se de forma significativa no desempenho do equipamento. Foi identificado desgaste acelerado de mancais, engrenagens, pistões e rolamentos, associado à redução da espessura do filme lubrificante. O aumento de ruído e vibração foi observado como indicativo de condições severas de operação, decorrentes do contato metal-metal.

Além disso, a baixa viscosidade elevou a probabilidade de ocorrência de cavitação em bombas hidráulicas, uma vez que a redução da pressão hidrodinâmica favorece a formação de bolhas de vapor, comprometendo a eficiência volumétrica e a integridade dos componentes do sistema.

Com base nos resultados analisados, as principais falhas indicadas estão relacionadas à contaminação do óleo por combustível, solventes ou água, que promovem a diluição do fluido e a consequente redução da viscosidade. A degradação térmica e oxidativa do óleo, bem como a utilização de lubrificantes com viscosidade inferior à especificada pelo fabricante, também foram identificadas como fatores críticos para a perda de desempenho do sistema hidráulico e o aumento do desgaste dos componentes.

#### 4.1.4 Ausência de Outros Alarmes Monitorados

Ao longo de todo o período de monitoramento analisado, não foram registrados alarmes adicionais além daqueles associados à temperatura elevada, viscosidade alta e viscosidade baixa. Os parâmetros referentes à densidade do óleo, constante dielétrica, nível de saturação e umidade do fluido hidráulico permaneceram estáveis e dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo laboratório Predic, conforme os critérios do sistema de monitoramento e as recomendações do fabricante, não sendo observados desvios significativos ou condições anormais associadas a essas variáveis.

A ausência de alarmes nesses parâmetros indica que, apesar das variações térmicas e reológicas observadas, não houve evidências de contaminação significativa por água, tampouco alterações relevantes na polaridade do fluido hidráulico que pudessem indicar degradação química severa. A estabilidade da constante dielétrica reforça que o óleo não apresentou modificações abruptas em sua composição química ao longo do período analisado.

Esses resultados sugerem que os mecanismos predominantes de degradação do óleo estiveram majoritariamente associados às condições térmicas de operação e às variações de viscosidade, e não à contaminação externa ou à falha súbita do fluido. Dessa forma, o sistema de monitoramento online demonstrou-se eficaz tanto na identificação precoce de anomalias críticas quanto na confirmação da estabilidade dos demais parâmetros físico-químicos, reforçando sua aplicabilidade como ferramenta confiável de manutenção preditiva em sistemas hidráulicos de equipamentos pesados.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicação do monitoramento online de fluidos como ferramenta de manutenção preditiva no sistema hidráulico de um equipamento pesado, por meio da avaliação contínua de parâmetros físico-químicos do óleo hidráulico. A partir dos dados obtidos, foi possível identificar tendências operacionais, anomalias recorrentes e seus impactos potenciais sobre o desempenho e a confiabilidade do sistema.

Os resultados demonstraram a ocorrência frequente de alarmes de temperatura elevada, indicando uma condição de sobrecarga térmica prolongada. Essa condição exerceu influência direta sobre o comportamento do fluido hidráulico, favorecendo a aceleração dos processos de degradação térmica e oxidativa do óleo, bem como a redução da eficiência do pacote aditivante. A operação contínua em faixas de temperatura superiores ao recomendado mostrou-se um fator crítico para a perda de desempenho do sistema hidráulico e para o aumento do desgaste dos componentes.

Adicionalmente, foram identificados alarmes recorrentes de viscosidade alta e viscosidade baixa, evidenciando instabilidade das propriedades reológicas do fluido ao longo do período monitorado. A viscosidade elevada esteve associada ao aumento da resistência ao escoamento, maiores perdas de carga e redução da eficiência volumétrica, enquanto a viscosidade reduzida comprometeu a formação do filme lubrificante, favorecendo o contato metal-metal, o desgaste acelerado e o risco de cavitação em bombas hidráulicas. A ocorrência de ambas as condições reforça a forte correlação entre temperatura, degradação do óleo e variações da viscosidade.

Por outro lado, a ausência de alarmes relacionados à densidade do óleo, constante dielétrica, nível de saturação e umidade indica que não houve contaminação significativa por água ou alterações químicas abruptas detectáveis por esses parâmetros durante o período analisado. Esse resultado sugere que os mecanismos predominantes de degradação observados estiveram majoritariamente associados às condições térmicas de operação e às alterações reológicas do fluido, e não à contaminação externa severa.

Dessa forma, o sistema de monitoramento online demonstrou-se eficaz na identificação precoce de condições anormais de operação, permitindo a correlação entre parâmetros térmicos e reológicos e a antecipação de potenciais falhas

mecânicas e químicas do fluido. A utilização dessa tecnologia possibilita a adoção de ações corretivas planejadas, como ajustes no sistema de resfriamento, inspeção de componentes e substituição programada do lubrificante, contribuindo para a redução de falhas inesperadas, custos de manutenção e tempo de indisponibilidade do equipamento.

Conclui-se, portanto, que o monitoramento online de fluidos é uma ferramenta estratégica e confiável para a manutenção preditiva de sistemas hidráulicos em equipamentos pesados, promovendo maior confiabilidade operacional, aumento da vida útil dos componentes e suporte técnico qualificado à tomada de decisão na gestão da manutenção.

## REFERÊNCIAS

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

BARLOWORLD EQUIPMENT. **TFST – Taking fluid samples**. Johannesburg: Service Support Group, 2002.

CASE IH. **Manual de operação e manutenção: colhedora de cana-de-açúcar A9900**. Piracicaba: Case IH Agriculture, 2019.

CASE IH. **Série Austoft 9000: colhedoras de cana-de-açúcar A9900**. Piracicaba: CNH Industrial, 2023.

CATERPILLAR INC. **Hydraulic system operation and maintenance**. Peoria: Caterpillar Inc., 2012.

EVITECH. **Manutenção preditiva: o que é e quais são as principais técnicas**. Disponível em: <https://www.evitech.com.br/>. Acesso em: jul. 2025.

FIORAVANTI, A. *et al.* (Ti, Sn) solid solution-based gas sensors for new monitoring of hydraulic oil degradation. **Materials**, v. 14, n. 3, p. 605, 2020.

FITCH, J.; TROYER, D. **Oil analysis basics**. Tulsa: Noria Corporation, 2010.

FUSÃO OFFSHORE. **Falhas em sistemas hidráulicos: impactos e soluções preventivas**. Disponível em: <https://www.fusaooffshore.com.br/blog/falhas-em-sistemas-hidraulicos-impactos-e-solucoes-preventivas>. Acesso em: 6 jan. 2026.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GITS, C. W. **Design of maintenance systems**. Eindhoven: Centre for Industrial Production, 1994.

GOMES, M. R.; ANDRADE, M.; FERRAZ, F. **Apostila de hidráulica**. Santo Amaro: Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, 2008.

JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483–1510, 2006.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

MANAGING FLUID CLEANLINESS. **Managing fluid cleanliness**. Tulsa: Noria Corporation, 2011.

MANRING, N. D.; FALES, R. C. **Hydraulic control systems**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

MOBLEY, R. K. **Plant equipment & maintenance engineering handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.

MONCHY, F. **A função manutenção**. São Paulo: Durban, 1989.

NEALE, M. J. (ed.). **Lubrication and reliability handbook**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

PARKER HANNIFIN. **Hydraulic contamination management**. Cleveland: Parker Hannifin Corporation, 2019.

PREDIC – **Soluções em Gestão de Ativos Industriais**. Disponível em: <https://www.predic.com.br/>. Acesso em: 4 dez. 2025.

REVISTA MANUTENÇÃO. **Entenda o que é a curva PF**. Disponível em: <https://revistamanutencao.com.br>. Acesso em: jul. 2025.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004.

SOUZA, V. C. **Organização e gerência da manutenção**. 5. ed. São Paulo: All Print, 2013.

STEPHAN, J. R. (ed.). **Principles of hydraulic systems design**. Digital Library: Bibliotex, 2020.

TOTTEN, G. E. (ed.). **Handbook of hydraulic fluid technology**. New York: Marcel Dekker, 2003.

TOTALENERGIES. **Óleo hidráulico: tipos, aplicações e como escolher**. Brasil, 2023. Disponível em: <https://totalenergies.com.br/blog/oleo-hidraulico-tipos-aplicacoes-e-como-escolher>. Acesso em: 21 jan. 2026.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 17. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

VON LINSINGEN, I. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

WIREMAN, T. **Developing performance indicators for managing maintenance**. New York: Industrial Press, 2004.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZHANG, Q. **Basics of hydraulic systems**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.