

ARQUITETURAS
SENSORIAIS PARA
MANUTENÇÃO PREDITIVA
BASEADA EM IOT: UMA
REVISÃO DOS MÉTODOS DE
MONITORAMENTO DE
CONDIÇÃO EM SISTEMAS
HIDRÁULICOS INDUSTRIAIS

SENSORY ARCHITECTURES FOR IOT-BASED PREDICTIVE MAINTENANCE:
A REVIEW OF CONDITION MONITORING METHODS IN INDUSTRIAL
HYDRAULIC SYSTEMS

Engenharias • 12/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/778380239](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/778380239)

Daniel Magalhães Viegas Junior

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas industriais, especialmente aqueles baseados em circuitos hidráulicos, tem exigido abordagens mais precisas e orientadas por dados para a gestão da manutenção. Nesse contexto, a manutenção preditiva se destaca como alternativa aos modelos corretivo e preventivo, ao possibilitar intervenções baseadas na condição real dos equipamentos. O presente estudo tem como objetivo analisar os métodos e tecnologias de monitoramento de condição aplicados a sistemas hidráulicos industriais, com foco em sua contribuição para a eficácia da manutenção preditiva. Metodologicamente, trata-se de uma pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e analítica, fundamentada em Lakatos e Marconi (2021) e Gil (2019), a partir da análise de artigos científicos, livros e publicações técnicas relevantes ao tema. Os resultados indicam que a eficiência do monitoramento de condição depende da integração entre sensores, variáveis operacionais e estratégias analíticas, sendo o fluido hidráulico um dos principais indicadores do estado do sistema. Além disso, evidencia-se que a adoção de tecnologias como sensores inteligentes e sistemas baseados em Internet das Coisas amplia a capacidade de coleta e análise de dados, embora sua eficácia esteja condicionada à qualidade das informações e à interpretação técnica adequada. Conclui-se que a manutenção preditiva, quando bem estruturada, contribui para a redução de falhas, otimização de custos e aumento da confiabilidade dos sistemas hidráulicos, embora ainda enfrente desafios relacionados à implementação e análise dos dados.

Palavras-chave: Manutenção preditiva; Monitoramento de condição; Sistemas hidráulicos; Internet das Coisas; Sensores industriais.

ABSTRACT

The increasing complexity of industrial systems, especially those based on hydraulic circuits, has demanded more precise and data-driven approaches to maintenance management. In this context, predictive maintenance stands out as an alternative to corrective and preventive models, enabling interventions based on the actual condition of the equipment. This study aims to analyze the methods and technologies of condition monitoring applied to industrial hydraulic systems, focusing on their contribution to the effectiveness of predictive maintenance. Methodologically, this is a qualitative bibliographic research, with a descriptive and analytical approach, based on Lakatos and Marconi (2021) and Gil (2019), from the analysis of scientific articles, books and technical publications relevant to the topic. The results indicate that the efficiency of condition monitoring depends on the integration between sensors, operational variables and analytical strategies, with hydraulic fluid being one of the main indicators of the system's condition. Furthermore, it is evident that the adoption of technologies such as smart sensors and Internet of Things-based systems expands the capacity for data collection and analysis, although its effectiveness is conditioned by the quality of the information and the appropriate technical interpretation. It is concluded that predictive maintenance, when well structured, contributes to the reduction of failures, cost optimization, and increased reliability of hydraulic systems, although it still faces challenges related to the implementation and analysis of data.

Keywords: Predictive maintenance; Condition monitoring; Hydraulic systems; Internet of Things; Industrial sensors.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de sistemas automatizados e intensivos em energia no ambiente industrial tem aumentado a dependência de estruturas capazes de operar com estabilidade, precisão e disponibilidade contínua. Entre essas estruturas, os sistemas hidráulicos tem sua posição estratégica, não apenas por sua capacidade de transmissão de força, mas pela sua presença em processos críticos, nos quais falhas podem resultar em interrupções significativas, perdas econômicas e riscos operacionais. Nesse contexto, a manutenção deixa de ser uma atividade de suporte e passa a atuar diretamente na sustentação do desempenho produtivo, exigindo abordagens que ultrapassem modelos tradicionais baseados em correção ou periodicidade.

A limitação desses modelos torna-se evidente à medida que os sistemas industriais passam a operar sob condições variáveis e com maior grau de complexidade. Em sistemas hidráulicos, essa condição se intensifica, pois o comportamento do sistema é influenciado por múltiplas variáveis interdependentes, como pressão, temperatura, qualidade do fluido e desgaste interno de componentes. A incapacidade de capturar essas variações em tempo real compromete a eficácia das estratégias de manutenção, tornando necessário o desenvolvimento de métodos capazes de acompanhar o estado do sistema de forma contínua e orientada por dados.

Nesse cenário, o monitoramento de condição emerge como alternativa técnica para superar as limitações dos modelos convencionais, permitindo que decisões de manutenção sejam fundamentadas no comportamento real do sistema. A integração com arquiteturas sensoriais e tecnologias associadas à Internet das Coisas amplia essa capacidade ao possibilitar a coleta, transmissão e

análise de dados operacionais em tempo real. Contudo, a adoção dessas tecnologias não garante, por si só, resultados consistentes, sendo necessário compreender de forma crítica os métodos, variáveis e estratégias analíticas envolvidos no processo de monitoramento.

Diante disso, se justifica a realização deste estudo pela necessidade de aprofundar a compreensão sobre os métodos de monitoramento de condição aplicados a sistemas hidráulicos industriais, considerando suas potencialidades e limitações no contexto da manutenção preditiva. Apesar do avanço tecnológico observado nas últimas décadas, ainda persistem lacunas relacionadas à seleção de variáveis relevantes, à integração de dados e à interpretação dos sinais de degradação, o que impacta diretamente a eficácia das estratégias adotadas.

A partir dessa problemática, este trabalho tem como questão norteadora: de que forma os métodos e tecnologias de monitoramento de condição contribuem para a eficácia da manutenção preditiva em sistemas hidráulicos industriais? Tal questionamento orienta a investigação no sentido de compreender não apenas a aplicação das tecnologias disponíveis, mas sua real capacidade de produzir diagnósticos confiáveis e apoiar a tomada de decisão.

O estudo busca analisar os métodos e tecnologias de monitoramento de condição aplicados a sistemas hidráulicos industriais, com foco em sua contribuição para a manutenção preditiva. No que se refere aos procedimentos metodológicos, a pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e analítica. Conforme Lakatos

e Marconi (2021), a pesquisa bibliográfica fundamenta-se na análise de materiais já publicados, permitindo a sistematização e interpretação do conhecimento existente sobre determinado tema. Complementarmente, segundo Gil (2019), esse tipo de investigação possibilita não apenas descrever fenômenos, mas também estabelecer relações e interpretações a partir da literatura, o que se mostra adequado para a análise dos métodos de monitoramento de condição em sistemas hidráulicos.

Para a construção do estudo, foram utilizados artigos científicos, livros e publicações técnicas relevantes ao tema, com foco em tecnologias de monitoramento, manutenção preditiva e sistemas hidráulicos industriais. A seleção das fontes considerou a aderência temática, a relevância acadêmica e a atualidade das discussões, buscando garantir consistência teórica e rigor analítico ao trabalho.

Assim, a presente pesquisa se insere no campo da engenharia de manutenção, contribuindo para a compreensão crítica das tecnologias e estratégias utilizadas no monitoramento de condição, ao mesmo tempo em que busca evidenciar seus limites e potencialidades no contexto industrial contemporâneo.

2. ARQUITETURAS SENSORIAIS E FUNDAMENTOS DO MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO EM SISTEMAS HIDRÁULICOS INDUSTRIAIS

Hoje em dia, a leitura dos sistemas hidráulicos industriais não pode mais se apoiar em uma visão estática de funcionamento, baseada apenas em parâmetros nominais ou em respostas a falhas já instaladas, porque o que se impõe é uma compreensão dinâmica, na qual o desempenho do sistema é afetado por processos de

degradação progressiva que se manifestam em múltiplas escalas e variáveis operacionais. Nesse aspecto, o monitoramento de condição surge não como um auxílio, mas como um mecanismo de interpretação do estado técnico do sistema, permitindo que decisões de manutenção sejam fundamentadas em evidências e não apenas em intervalos predefinidos ou respostas reativas (Moubray, 2001).

Essa mudança de perspectiva tira o foco da manutenção de uma lógica temporal para uma lógica informacional, na qual a observação contínua das variáveis operacionais passa a orientar a intervenção técnica. Em sistemas hidráulicos, essa transição é relevante, uma vez que falhas raramente se apresentam como eventos abruptos, sendo, na maioria dos casos, resultado de processos cumulativos associados a contaminação do fluido, variações térmicas, desgaste mecânico e até mesmo instabilidades de pressão. Assim, compreender o sistema passa a exigir a capacidade de captar sinais sutis de degradação que antecedem a perda de desempenho, o que só se torna viável por meio de estruturas sistemáticas de aquisição e análise de dados (Ng et al., 2017).

É nesse ponto que as arquiteturas sensoriais assumem papel estruturante, pois permitem organizar a coleta de dados de forma distribuída e orientada à criticidade dos componentes. Diferentemente de abordagens baseadas em medições pontuais, essas arquiteturas operam como redes integradas de sensores capazes de acompanhar, em tempo real, o comportamento do sistema hidráulico. No entanto, sua eficácia não está na simples multiplicação de dispositivos, mas na forma como esses sensores são posicionados, correlacionados e interpretados, considerando as

interdependências entre variáveis físicas, químicas e mecânicas que caracterizam o funcionamento do sistema (Alenany et al., 2021).

A incorporação dessas arquiteturas ao ambiente industrial encontra sustentação no avanço da Internet das Coisas, que possibilita a integração entre sensores, dispositivos de comunicação e plataformas de processamento de dados. Como destacado por Ziegeldorf et al. (2014),

The Internet of Things (IoT) foresees the interconnection of billions to trillions of smart things around us - uniquely identifiable and addressable everyday things with the ability to collect, store, process, and communicate information about themselves and their physical environment. IoT systems will deliver advanced services of a whole new kind based on increasingly fine-grained data acquisition in an environment densely populated with smart things (Ziegeldorf et al., 2014, p. 2728).

A amplitude dessa definição permite compreender que a IoT não se está presa a conectividade entre dispositivos, mas estabelece um ambiente técnico no qual a coleta de dados ocorre de maneira contínua, granular e contextualizada. Em sistemas hidráulicos industriais, essa capacidade aumenta as possibilidades de monitoramento, uma vez que permite integrar informações provenientes de diferentes pontos do circuito e transformá-las em indicadores consistentes de condição operacional (Atzori et al., 2010; Gubbi et al., 2013).

A leitura desses dados, contudo, exige mais do que infraestrutura tecnológica; requer a definição criteriosa das variáveis que efetivamente traduzem o estado do sistema. Pressão e temperatura, por exemplo, constituem indicadores fundamentais, mas isoladamente não são suficientes para caracterizar processos de degradação. Sua interpretação precisa ser articulada a outros parâmetros, como vibração, vazão e, sobretudo, características do fluido hidráulico, cuja análise revela aspectos essenciais do desgaste interno e da contaminação do sistema (Jeon et al., 2022).

O fluido hidráulico, nesse ponto, assume uma função dupla, atuando como meio de transmissão de energia e também como portador de informações sobre a condição do sistema. Alterações em suas propriedades, como viscosidade, presença de partículas metálicas, teor de água e degradação química, indicam processos internos que muitas vezes não são detectáveis por outras variáveis. Por essa razão, o monitoramento do óleo hidráulico se firma como um dos eixos das arquiteturas sensoriais, permitindo antecipar falhas associadas ao desgaste de componentes críticos (Shi et al., 2020; Fioravanti et al., 2021).

A detecção de partículas metálicas, tem se apresentado uma estratégia eficaz para identificar processos de desgaste em estágio inicial, onde os sensores baseados em princípios eletromagnéticos e de impedância permitem monitorar a presença e a concentração dessas partículas em tempo real, estabelecendo uma relação direta entre o estado do fluido e o desgaste dos componentes internos. Essa abordagem eleva a capacidade diagnóstica do sistema, pois permite distinguir entre variações operacionais transitórias e sinais efetivos de deterioração estrutural (Zhang et al., 2021).

Além disso, a análise das propriedades físico-químicas do óleo hidráulico contribui para uma compreensão mais abrangente da degradação do sistema. Técnicas baseadas em sensores ópticos, infravermelhos e de constante dielétrica possibilitam identificar alterações relacionadas à oxidação, contaminação e envelhecimento do fluido. Essas informações são fundamentais para orientar decisões de manutenção que não se baseiem em intervalos fixos de substituição, mas na condição real do fluido, reduzindo tanto desperdícios quanto riscos operacionais (Agoston et al., 2004).

A complexidade desses sistemas impõe a necessidade de abordagens analíticas capazes de integrar múltiplas variáveis e identificar padrões de comportamento. Nesse sentido, métodos estatísticos multivariados e técnicas de aprendizado de máquina têm sido amplamente utilizados para classificar falhas e prever a vida útil remanescente dos componentes. Essas ferramentas permitem transformar dados brutos em conhecimento operacional, reduzindo a incerteza associada às decisões de manutenção e ampliando a capacidade de antecipação de falhas (Helwig et al., 2015; Tian, 2012).

Entretanto, a adoção dessas tecnologias não elimina a necessidade de interpretação técnica qualificada. Dados, por si só, não produzem decisões; é a relação entre dados, modelos e conhecimento do sistema que permite transformar informações em ações eficazes. Em sistemas hidráulicos industriais, essa articulação é essencial, pois a variabilidade operacional pode gerar sinais ambíguos que exigem análise contextualizada para evitar diagnósticos equivocados (Pacchini et al., 2020).

A integração entre arquiteturas sensoriais e estratégias de manutenção preditiva também redefine o papel da manutenção dentro da lógica produtiva. De atividade reativa, ela passa a atuar de forma estratégica, contribuindo para a redução de custos, aumento da disponibilidade dos ativos e melhoria da eficiência operacional. Essa transformação está diretamente relacionada à capacidade de antecipar falhas e planejar intervenções de forma alinhada ao funcionamento do sistema, evitando tanto paradas inesperadas quanto substituições desnecessárias (Almeida, 2019).

Dessa maneira, é importante relatar que o monitoramento de condição em sistemas hidráulicos industriais não pode ser reduzido a criação de sensores ou a adoção de plataformas digitais. É um processo que envolve a compreensão integrada do sistema, a seleção criteriosa de variáveis, a construção de arquiteturas sensoriais coerentes e a aplicação de métodos analíticos capazes de interpretar padrões de degradação. Nesse sentido, a IoT não substitui a engenharia da manutenção, mas amplia suas possibilidades, permitindo que a leitura do sistema se torne mais precisa, contínua e orientada por dados, o que representa um avanço significativo na gestão de ativos industriais (Gubbi et al., 2013; Yildirim; Franco-Pereira; Lillo, 2025).

2.1. Evolução dos Paradigmas de Manutenção e a Emergência do Monitoramento Baseado em Dados

O progresso da manutenção industrial não pode ser tratada como uma sucessão cronológica neutra de práticas, mas como resposta direta às limitações técnicas impostas pelo aumento dos desafios dos sistemas produtivos. A manutenção corretiva, predominante nos primeiros estágios da industrialização, operava sob uma lógica de

tolerância à falha, na qual a interrupção do sistema era aceitável dentro de determinados limites operacionais. No entanto, essa abordagem se torna inviável a medida que os sistemas industriais passam a apresentar maior interdependência funcional, especialmente em estruturas como circuitos hidráulicos, onde a falha de um único componente pode comprometer o desempenho global do sistema (Moubray, 2001).

Ainda que a manutenção possua raízes anteriores ligadas a industrialização, sua formalização como prática estruturada está associada à necessidade de sustentar a continuidade produtiva. Nesse sentido,

a prática da manutenção sempre existiu e consistia desde a preservação de objetos e ferramentas, até pequenos ajustes. Acrescenta ainda, que esta emergiu somente no século XVIII com a Revolução Industrial e o avanço tecnológico, visando permitir o progresso dos trabalhos industriais (Ventura; Plazzi, 2017).

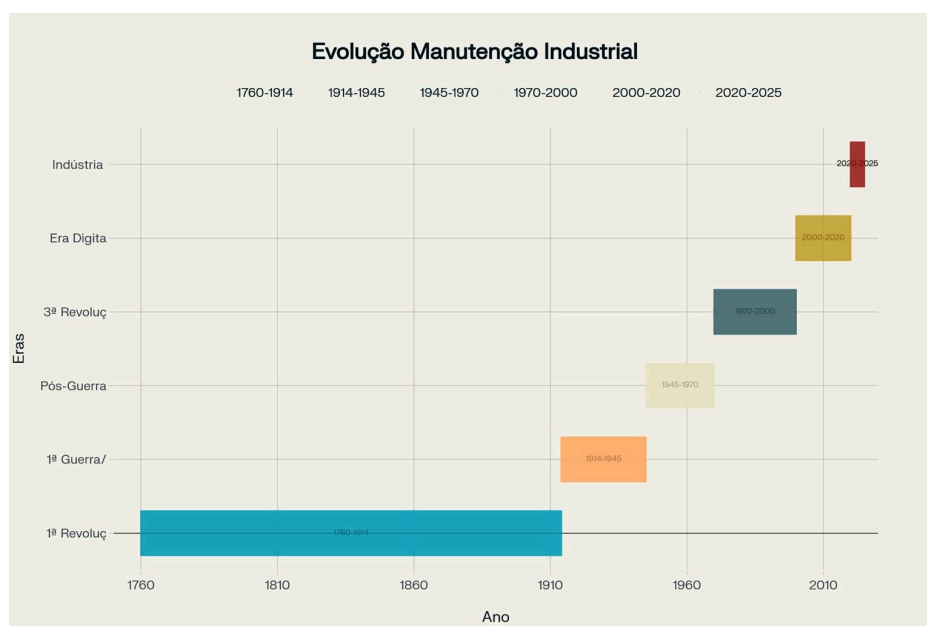
Essa passagem não representa apenas uma mudança histórica, mas a incorporação da manutenção como elemento integrante da lógica produtiva.

A introdução da manutenção preventiva, por sua vez, não resolve o problema central, apenas o desloca. Ao substituir a reação à falha por intervenções programadas, esse modelo assume implicitamente que o comportamento dos sistemas pode ser previsto por intervalos

médios de uso, desconsiderando a variabilidade real das condições operacionais. Em sistemas hidráulicos industriais, essa limitação é crítica, uma vez que fatores como contaminação do fluido, variações de carga e condições ambientais influenciam diretamente a taxa de degradação dos componentes, tornando inadequada a aplicação de cronogramas rígidos (Mobley, 2002).

A Figura 1 evidencia que a evolução da manutenção não ocorre por substituição linear de modelos, mas por incorporação de novos níveis de complexidade técnica.

Figura 1: Evolução da Manutenção Industrial



Fonte: ABECOM (2025)

A leitura da figura 1 permite identificar que a emergência da manutenção preditiva está diretamente associada ao avanço da automação e à necessidade de aumentar a confiabilidade dos sistemas. Não se trata apenas de uma inovação tecnológica, mas de uma resposta à incapacidade dos modelos anteriores em lidar com sistemas altamente sensíveis a variações operacionais, como os hidráulicos, nos quais a degradação é frequentemente silenciosa e cumulativa (Abecom, 2025).

A manutenção preditiva começa, nesse ponto, uma mudança estrutural: a falha deixa de ser um evento a ser evitado por antecipação temporal e passa a ser tratada como um processo observável por meio de variáveis mensuráveis. Essa mudança só se torna possível com o desenvolvimento de métodos de monitoramento capazes de capturar sinais de degradação em tempo real, permitindo que a intervenção ocorra no momento em que o sistema efetivamente apresenta risco, e não quando o calendário indica (Mobley, 2002; Shanbhag et al., 2021).

Esse deslocamento conceitual conduz diretamente à centralidade do monitoramento de condição, que passa a atuar como elemento mediador entre operação e manutenção. Em sistemas hidráulicos, essa mediação é relevante, pois a condição do sistema está associada ao estado do fluido e à integridade dos componentes internos, fatores que não são visíveis sem instrumentação adequada. Assim, o monitoramento deixa de ser uma ferramenta auxiliar e passa a constituir o próprio fundamento da tomada de decisão (Yang et al., 2022).

2.2. Métodos e Tecnologias de Monitoramento de Condição em Sistemas Hidráulicos

A definição dos métodos de monitoramento deve partir da compreensão dos modos de falha mais recorrentes nesses sistemas, que incluem desgaste abrasivo, contaminação do fluido, degradação térmica, cavitação e falhas em válvulas e atuadores. Cada um desses processos produz assinaturas específicas em diferentes variáveis, o que exige a utilização de sensores capazes de captar fenômenos físicos distintos. Sensores de pressão, por exemplo, são fundamentais para identificar instabilidades hidráulicas, enquanto

sensores de temperatura permitem avaliar condições de sobrecarga e degradação do fluido. Ademais, essas variáveis, quando analisadas isoladamente, possuem baixa capacidade diagnóstica, sendo necessário combiná-las com medições mais específicas, como vibração e análise do óleo (Shanbhag et al., 2021).

O monitoramento do fluido hidráulico representa um dos eixos mais robustos para a análise de condição, pois o óleo atua como meio de transporte de evidências do desgaste interno. A presença de partículas metálicas, por exemplo, está diretamente associada ao desgaste de componentes, enquanto alterações na viscosidade e na constante dielétrica indicam processos de oxidação e contaminação. Sensores de detecção de partículas, especialmente aqueles baseados em impedância ou campos magnéticos, permitem identificar em tempo real a concentração e o tamanho das partículas, estabelecendo uma relação direta entre o estado do fluido e a integridade do sistema (Shi et al., 2020; Zhang et al., 2021).

Além disso, técnicas baseadas em sensores ópticos e infravermelhos ampliam a capacidade de monitoramento ao permitir a identificação de alterações químicas no óleo, como degradação oxidativa e presença de contaminantes. Esses métodos apresentam vantagem significativa em relação às análises laboratoriais convencionais, pois possibilitam a coleta contínua de dados em operação, reduzindo o intervalo entre a ocorrência da degradação e sua detecção. No entanto, sua aplicação exige calibração rigorosa e interpretação cuidadosa, uma vez que fatores externos podem influenciar as medições (Agoston et al., 2004; Fioravanti et al., 2021).

A integração dessas diferentes fontes de dados exige o desenvolvimento de estratégias analíticas capazes de lidar com a

complexidade e a variabilidade dos sistemas hidráulicos. Métodos estatísticos multivariados permitem identificar correlações entre variáveis e reconhecer padrões de comportamento associados a diferentes modos de falha. No entanto, à medida que o volume de dados aumenta, essas abordagens passam a ser complementadas por técnicas de aprendizado de máquina, capazes de processar grandes conjuntos de dados e identificar relações não lineares (Helwig et al., 2015; Tian, 2012).

A aplicação de algoritmos de aprendizado profundo, por exemplo, tem permitido avanços significativos na previsão da vida útil remanescente de componentes, especialmente em sistemas complexos nos quais múltiplas variáveis influenciam o processo de degradação. No entanto, esses modelos apresentam limitações importantes, como a dependência de grandes volumes de dados históricos e a dificuldade de interpretação dos resultados, o que pode comprometer sua aplicação em contextos industriais reais (Yildirim et al., 2025).

A síntese desses métodos pode ser observada na Tabela 1, que organiza os principais sensores, variáveis monitoradas e estratégias analíticas utilizadas no monitoramento de condição em sistemas hidráulicos.

Tabela 1: Métodos de monitoramento de condição em sistemas hidráulicos industriais

Tipo de sensor	Variável monitorada	Fenômeno identificado	Método analítico associado	Aplicação prática
Sensor de pressão	Pressão hidráulica	Vazamentos, obstruções,	Análise de tendência e	Diagnóstico de falhas no

		cavitação	limites	circuito
Sensor de temperatura	Temperatura do fluido	Sobrecarga, degradação térmica	Modelos térmicos	Monitoramento de eficiência
Sensor de vibração	Frequência e amplitude	Desgaste mecânico, desalinhamento	FFT, análise espectral	Bombas e motores
Sensor de partículas	Concentração de detritos	Desgaste interno	Análise de distribuição	Monitoramento de óleo
Sensor dielétrico	Constante dielétrica	Contaminação e oxidação	Modelos empíricos	Qualidade do fluido
Sensor óptico/IR	Composição química	Degradação do óleo	Análise espectroscópica	Monitoramento contínuo
Sensor de umidade	Teor de água	Contaminação	Modelos de correlação	Prevenção de corrosão
Sensores IoT integrados	Multivariáveis	Padrões complexos de falha	Machine learning / IA	Manutenção preditiva

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A análise integrada desses métodos evidencia que a eficácia do monitoramento de condição não depende de um único tipo de sensor, mas da capacidade de combinar diferentes fontes de dados de forma coerente. No entanto, essa integração também introduz desafios significativos, como a necessidade de sincronização de dados, tratamento de ruídos e definição de critérios de decisão. Em muitos casos, sistemas com grande volume de dados falham em produzir diagnósticos confiáveis justamente por não possuírem

modelos analíticos adequados (Alenany et al., 2021; Pacchini et al., 2020).

Em ambientes industriais, esses dados nem sempre estão disponíveis ou apresentam qualidade suficiente, o que limita a aplicação de técnicas avançadas de análise. Além disso, a variabilidade operacional dos sistemas hidráulicos pode gerar padrões distintos de comportamento, dificultando a generalização dos modelos (Yildirim et al., 2025).

Diante dessas limitações, torna-se evidente que a adoção de tecnologias de monitoramento deve ser acompanhada por uma abordagem crítica e contextualizada, que considere não apenas a capacidade de coleta de dados, mas também sua interpretação e aplicação prática. A manutenção preditiva, nesse sentido, não pode ser vista como solução universal, mas como um modelo que exige adaptação às especificidades de cada sistema (Mobley, 2002; Moubray, 2001).

A problematização desses aspectos permite compreender que o avanço das arquiteturas sensoriais não elimina a necessidade de conhecimento técnico, mas a torna ainda mais relevante. A interpretação dos dados continua sendo um processo essencialmente humano, mediado por ferramentas analíticas, mas dependente da compreensão do comportamento do sistema. Em sistemas hidráulicos industriais, essa interação entre tecnologia e conhecimento técnico constitui o principal fator de sucesso das estratégias de manutenção preditiva (Ng et al., 2017).

Desta forma, a análise dos métodos e tecnologias de monitoramento de condição evidencia que a evolução da

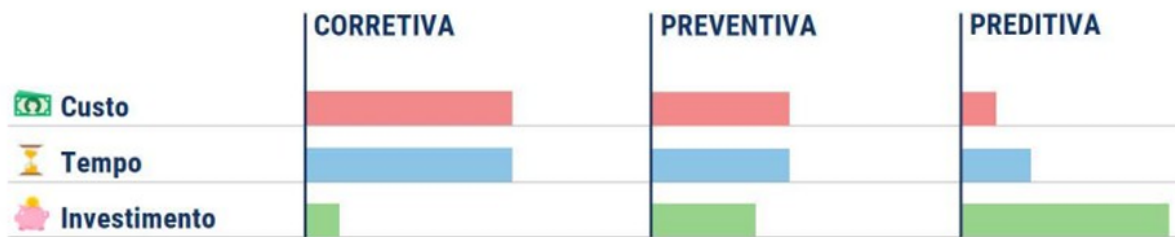
manutenção não se limita à incorporação de novos dispositivos, mas envolve uma transformação mais ampla na forma de compreender e gerir os sistemas industriais. O monitoramento baseado em dados representa, assim, não apenas uma inovação tecnológica, mas uma mudança paradigmática que redefine o papel da manutenção, consolidando-a como elemento estratégico na gestão de ativos e na otimização dos processos produtivos (Almeida, 2019; Khan; Turowski, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A leitura comparativa entre os modelos de manutenção, quando deslocada do plano conceitual para o plano operacional, revela uma contradição que não é imediatamente evidente: a eficiência da manutenção preditiva não está garantida pela sua superioridade teórica, mas condicionada à qualidade e à interpretabilidade dos dados que a sustentam. Em sistemas hidráulicos industriais, essa condição torna-se particularmente crítica, uma vez que a degradação não se apresenta como um evento isolado, mas como um conjunto de sinais distribuídos, muitas vezes ambíguos, cuja interpretação depende de modelos analíticos robustos (Helwig et al., 2015).

A Figura 2, resumindo a relação entre custo, tempo e investimento, tende a sugerir uma linearidade na evolução dos modelos de manutenção que, na prática, não se sustenta integralmente.

Figura 2: Comparação de custos entre os 3 tipos de manutenção



Fonte: Adaptada de tdn.totvs.com

O que a figura não explicita, mas que se torna notório na análise técnica, é que a redução de custos associada à manutenção preditiva não decorre automaticamente da adoção de sensores ou da digitalização do sistema. Em ambientes hidráulicos, a simples instrumentação pode produzir um efeito paradoxal: aumento da complexidade sem ganho proporcional de confiabilidade, sobretudo quando os dados coletados não são representativos dos modos reais de falha (Alenany et al., 2021).

Essa limitação expõe um ponto central frequentemente negligenciado: o monitoramento de condição não elimina a incerteza operacional, apenas a desloca. Se, na manutenção corretiva, a incerteza está associada ao momento da falha, na preditiva ela passa a residir na interpretação dos dados. Em outras palavras, o problema deixa de ser “quando o sistema irá falhar” e passa a ser “o que os dados realmente estão indicando”. Em sistemas hidráulicos, onde variáveis como pressão e temperatura podem oscilar sem indicar degradação, essa distinção é decisiva (Ng et al., 2017).

Além disso, a análise da Figura 2 sugere que o aumento do investimento inicial na manutenção preditiva é compensado pela redução de custos ao longo do tempo. No entanto, essa compensação depende de um pressuposto implícito: a estabilidade dos padrões operacionais. Em contextos industriais reais, especialmente em sistemas hidráulicos sujeitos a variações de carga,

contaminação e condições ambientais, essa estabilidade raramente se verifica, o que compromete a eficácia dos modelos preditivos baseados em histórico (Yildirim et al., 2025).

Mais um aspecto que tensiona a leitura otimista da manutenção preditiva refere-se à dependência de modelos analíticos capazes de lidar com não linearidade e multivariabilidade. Apesar de técnicas de aprendizado de máquina ampliarem a capacidade de identificação de padrões, sua aplicação em ambientes industriais enfrenta limitações, como escassez de dados rotulados, ruído nas medições e dificuldade de validação dos modelos. Isso significa que a promessa de antecipação de falhas pode ser, em muitos casos, mais potencial do que efetiva (Tian, 2012).

A análise dos resultados também evidencia que a distinção entre os modelos de manutenção não é absoluta, mas contextual. Em determinados cenários, a manutenção corretiva pode ser economicamente mais viável, especialmente quando os custos de falha são baixos ou quando a instrumentação necessária para monitoramento é desproporcional ao valor do ativo. Da mesma forma, a manutenção preventiva ainda se mantém relevante em sistemas com comportamento relativamente estável e previsível (Mobley, 2002).

Dessa forma, a superioridade da manutenção preditiva deve ser compreendida como contingente e não universal. Em sistemas hidráulicos industriais, sua eficácia depende da capacidade de capturar variáveis que realmente expressem o estado interno do sistema, como qualidade do fluido e presença de partículas, e de integrá-las em modelos que consigam diferenciar variações

operacionais normais de sinais de degradação (Shi et al., 2020; Yang et al., 2022).

A Figura 2, portanto, deve ser reinterpretada não como uma hierarquia fixa entre modelos, mas como representação de uma mudança de paradigma que desloca o foco da manutenção do evento para o processo. Esse deslocamento implica reconhecer que a falha não é um ponto isolado no tempo, mas o resultado de uma trajetória que pode, em tese, ser observada e interpretada, ainda que nunca eliminada (Moubray, 2001).

Essa leitura permite avançar para uma compreensão mais crítica do monitoramento de condição, no qual a coleta de dados não é um fim em si mesmo, mas parte de um processo interpretativo mais amplo. Em sistemas hidráulicos, essa interpretação exige não apenas ferramentas analíticas, mas conhecimento técnico sobre o comportamento do sistema, sob pena de transformar dados em ruído e decisões em suposições (Pacchini et al., 2020).

A manutenção baseada em dados não elimina a complexidade dos sistemas industriais, mas a torna mais visível, exigindo uma abordagem que combine instrumentação, modelagem e interpretação crítica. Nesse sentido, a Figura 2 não representa um ponto de chegada, mas um indicativo das tensões que caracterizam a transição para modelos de manutenção orientados por dados (Gubbi et al., 2013; Almeida, 2019).

4. CONCLUSÃO

A passagem da manutenção corretiva e preventiva para a preditiva não se sustenta apenas por avanço tecnológico, mas pela necessidade concreta de lidar com sistemas que não respondem

mais a regras fixas. Em sistemas hidráulicos, onde o desgaste é progressivo e pouco visível, trabalhar sem leitura contínua das variáveis significa operar no escuro. O monitoramento de condição, quando bem estruturado, permite sair da lógica de tentativa e erro e atuar com base no comportamento real do sistema.

Ainda assim, a adoção de sensores e modelos analíticos não garante resultado por si só. Sem seleção adequada de variáveis, sem qualidade de dados e sem interpretação técnica, a preditiva perde consistência e pode gerar decisões equivocadas. O ganho aparece quando há integração entre instrumentação, análise e conhecimento do processo. É nessa articulação que a manutenção deixa de ser reação e passa a operar como controle efetivo do desempenho dos sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alenany, A.; Helmi, A. M.; Nasef, B. M. Comprehensive analysis for sensor-based hydraulic system condition monitoring. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2021, 12, 133–140.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. *Indústria 4.0: princípios básicos, aplicabilidade e implantação na área industrial*. São Paulo: Editora Saraiva, 2019.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

FIORAVANTI, A.; MARANI, P.; MASSAROTTI, G. P.; LETTIERI, S.; MORANDI, S.; CAROTTA, M. C. (Ti, Sn) solid solution-based gas sensors for new monitoring of hydraulic oil degradation. *Materials*, v. 14, n. 3, p. 605, 2021.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

Helwig, N., Pignanelli, E., & Schütze, A. (2015). Condition monitoring of a complex hydraulic system using multivariate statistics. *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 210-215.

Jeon HG, Kim JK, Na SJ, Kim MS, Hong SH. Application of Condition Monitoring for Hydraulic Oil Using Tuning Fork Sensor: A Study Case on Hydraulic System of Earth Moving Machinery. *Materials (Basel)*. 2022 Oct 31;15(21):7657. doi: 10.3390/ma15217657.

KHAN, A.; TUROWSKI, K. A perspective on Industry 4.0: from challenges to opportunities in production systems. In: *Proceedings of the International Conference on Internet of Things and Big Data*, 2016. p. 441–448. DOI: <https://doi.org/10.5220/0005929704410448>.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MOUBRAY, John. *Reliability-Centered Maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press Inc., 2001.

MOBLEY, R. Keith. *An introduction to predictive maintenance*. USA: Butterworth-Heinemann – Elsevier, 2002.

NG, F.; HARDING, J. A.; GLASS, J. Improving hydraulic excavator performance through in-line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 83, p. 176–193, 2017.

SHI, H.; ZHANG, H.; MA, L.; ROGERS, F.; ZHAO, X.; ZENG, L. An impedance debris sensor based on a high-gradient magnetic field for high sensitivity and high throughput. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 68, n. 6, p. 5376–5384, 2020.

TIAN, Z. An artificial neural network method for remaining useful life prediction of equipment subject to condition monitoring. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 23, n. 2, p. 227–237, 2012.

VENTURA, K.M; PLAZZI, T.S. *Aplicação das Ferramentas*. Faculdades Integradas de Aracruz Departamento de Engenharia de Produção. 2017.

Yang, Y., Ding, L., Xiao, J., Fang, G., & Li, J. (2022). Current Status and Applications for Hydraulic Pump Fault Diagnosis: A Review. *Sensors*, 22(24), 9714. <https://doi.org/10.3390/s22249714>

YILDIRIM, C.; FRANCO-PEREIRA, A. M.; LILLO, R. E. Condition monitoring and multi-fault classification of hydraulic systems using multivariate functional data analysis. *Heliyon*, v. 11, n. 1, e41251, 2025.

ZHU, J.; YOON, J. M.; HE, D.; QU, Y.; BECHHOEFER, E. Lubrication oil condition monitoring and remaining useful life prediction with particle filtering. *International Journal of Prognostics and Health Management*, v. 4, p. 124–138, 2013.

ZIEGELDORF, J. H., MORCHON, O. G., & Wehrle, K. Privacy in the Internet of Things: Threats and challenges. *Security and Communication Networks*, 7(12), 2728- 2742. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sec.795>. Acesso em: 25 jun. 2023.