

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO  
AMBIENTAL E DA  
EFICIÊNCIA DE RECURSOS  
NA MANUTENÇÃO  
PREDITIVA DE SISTEMAS  
HIDRÁULICOS:  
ABORDAGEM ORIENTADA  
POR DADOS SENSORIAIS**

ENVIRONMENTAL IMPACT AND RESOURCE EFFICIENCY ASSESSMENT IN  
PREDICTIVE MAINTENANCE OF HYDRAULIC SYSTEMS: A SENSOR-DRIVEN  
DATA APPROACH

Engenharias • 12/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/778379511](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/778379511)

Daniel Magalhães Viegas Junior

## **RESUMO**

A manutenção preditiva tem se consolidado como uma abordagem estratégica para a gestão de sistemas industriais, especialmente em contextos onde a confiabilidade e a eficiência operacional são determinantes. Este estudo analisa o impacto da manutenção preditiva baseada em dados sensoriais na otimização de recursos e na redução de impactos em sistemas hidráulicos, considerando a utilização de técnicas de monitoramento de condição e análise de dados. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa de natureza bibliográfica, fundamentada em referências consolidadas sobre manutenção, sensores e aplicações industriais. Os resultados indicam que o uso de dados sensoriais permite antecipar falhas, reduzir intervenções desnecessárias e melhorar o aproveitamento de componentes e fluidos, contribuindo para a diminuição de custos e desperdícios. Além disso, observa-se que a integração entre monitoramento, análise e tomada de decisão melhora a eficiência operacional e favorece práticas mais sustentáveis. Conclui-se que a manutenção preditiva, quando estruturada de forma adequada, não apenas melhora o desempenho técnico dos sistemas hidráulicos, mas também redefine a forma como os recursos são utilizados, promovendo maior racionalidade e controle sobre o processo de manutenção.

**Palavras-chave:** Manutenção Preditiva; Sistemas Hidráulicos; Sensores; Eficiência de Recursos; Monitoramento de Condição.

## **ABSTRACT**

Predictive maintenance has become established as a strategic approach for the management of industrial systems, especially in contexts where reliability and operational efficiency are crucial. This study analyzes the impact of predictive maintenance based on sensory data on resource optimization and impact reduction in

hydraulic systems, considering the use of condition monitoring techniques and data analysis. The research adopts a qualitative approach of a bibliographic nature, based on consolidated references on maintenance, sensors, and industrial applications. The results indicate that the use of sensory data allows for anticipating failures, reducing unnecessary interventions, and improving the utilization of components and fluids, contributing to the reduction of costs and waste. Furthermore, it is observed that the integration between monitoring, analysis, and decision-making improves operational efficiency and favors more sustainable practices. It is concluded that predictive maintenance, when properly structured, not only improves the technical performance of hydraulic systems but also redefines how resources are used, promoting greater rationality and control over the maintenance process.

**Keywords:** Predictive Maintenance; Hydraulic Systems; Sensors; Resource Efficiency; Condition Monitoring.

## 1. INTRODUÇÃO

A forma como a manutenção é conduzida dentro dos sistemas industriais tem passado por mudanças significativas à medida que a complexidade dos equipamentos aumenta e a pressão por eficiência se intensifica. Em ambientes onde a continuidade operacional é determinante, como nos sistemas hidráulicos, a simples correção de falhas ou a substituição programada de componentes já não responde às exigências de desempenho, custo e confiabilidade. O que está em jogo não é apenas manter o sistema em funcionamento, mas compreender como ele se comporta ao longo do tempo e como suas condições internas evoluem sob diferentes regimes de operação.

Nesse cenário, a manutenção preditiva surge como uma abordagem que desloca o foco da intervenção para a análise contínua do estado do equipamento. Ao invés de depender exclusivamente de intervalos previamente definidos ou de falhas já consolidadas, essa estratégia passa a considerar sinais que indicam mudanças no comportamento do sistema antes que essas alterações se transformem em perda funcional. Essa mudança é relevante em sistemas hidráulicos, nos quais a degradação não se manifesta de forma evidente, mas se constrói gradualmente por meio de alterações no fluido, no desempenho dos componentes e nas condições de operação.

A incorporação de sensores e tecnologias de aquisição de dados amplia essa capacidade de leitura ao permitir o monitoramento contínuo de variáveis críticas como pressão, temperatura, vibração e condição do óleo. Com isso, a manutenção deixa de ser uma resposta a eventos isolados e passa a se apoiar em evidências acumuladas ao longo do tempo. Essa transição não representa apenas um avanço tecnológico, mas uma mudança na forma de interpretar o funcionamento dos sistemas, exigindo integração entre dados, análise e tomada de decisão (Civerchia et al., 2017).

Além da dimensão técnica, essa abordagem introduz implicações diretas na forma como os recursos são utilizados. Intervenções baseadas em estimativas tendem a gerar substituições antecipadas ou respostas tardias, ambas associadas a desperdícios e custos elevados. Ao alinhar a intervenção à condição real do equipamento, a manutenção preditiva permite reduzir o consumo desnecessário de materiais, prolongar a vida útil dos componentes e evitar falhas de maior impacto. Esse aspecto se torna ainda mais relevante quando se considera que sistemas hidráulicos envolvem o uso de

fluidos técnicos e componentes que demandam controle rigoroso de uso e descarte (Duchowski; Mannebach, 2006).

A relação entre manutenção e eficiência operacional também se amplia nesse contexto. A decisão sobre quando intervir deixa de ser apenas uma questão de confiabilidade e passa a envolver o equilíbrio entre desempenho, custo e impacto. Estudos indicam que a aplicação estruturada da manutenção preditiva contribui para a redução de falhas não planejadas, aumento da disponibilidade dos equipamentos e melhor utilização dos recursos disponíveis, o que reforça seu papel como elemento estratégico dentro da gestão industrial (Mobley, 2002; Kardec; Nascif, 2009).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da manutenção preditiva baseada em dados sensoriais na otimização de recursos e na redução de impactos em sistemas hidráulicos, considerando sua aplicação no contexto industrial. Busca-se compreender como o monitoramento contínuo e a interpretação de dados contribuem para decisões mais precisas, capazes de melhorar o desempenho dos equipamentos ao mesmo tempo em que reduzem desperdícios e ampliam a eficiência operacional.

Para alcançar esse objetivo, adotou-se uma abordagem de natureza qualitativa e bibliográfica, fundamentada na análise de estudos e referências consolidadas sobre manutenção preditiva, monitoramento de condição e uso de dados na indústria. Conforme destacam Lakatos e Marconi (2021) e Gil (2019), esse tipo de investigação permite reunir e interpretar contribuições teóricas relevantes, oferecendo uma visão consistente sobre o fenômeno estudado sem a necessidade de coleta direta de dados empíricos.

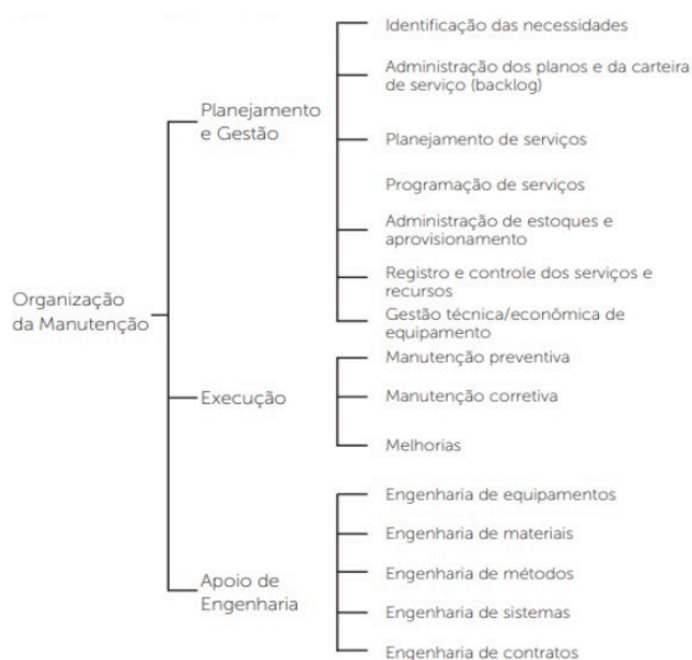
## **2. FUNDAMENTOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA BASEADA EM DADOS APLICADA A SISTEMAS HIDRÁULICOS**

O sentido mais relevante da manutenção preditiva está na mudança do modo como a organização interpreta o comportamento dos equipamentos, tirando a decisão de manutenção de uma lógica colocada no calendário para uma lógica sustentada pela condição. Em sistemas hidráulicos, essa mudança é ainda mais sensível, porque falhas em fluidos, bombas, válvulas, mangueiras, atuadores e componentes de vedação nem sempre se anunciam por sinais visíveis imediatos. Muitas vezes, o desgaste começa sem fazer barulho, por contaminação do óleo, variação de viscosidade, aquecimento anormal, perda de pressão, vibrações discretas ou presença de partículas metálicas em circulação. Por isso, a manutenção só ganha consistência quando deixa de ser uma prática isolada e passa a integrar planejamento, execução, engenharia e análise contínua de dados, conforme a própria concepção estratégica da manutenção defendida por Kardec e Nascif (2009).

Nesse ponto, a organização da manutenção precisa ser vista como uma estrutura decisória, e não como simples divisão administrativa de tarefas. A Figura 1 apresenta essa lógica ao demonstrar que a manutenção envolve planejamento e gestão, execução e apoio de engenharia. Essa representação é importante porque impede uma leitura empobrecida da manutenção preditiva como mera instalação de sensores ou aquisição de softwares. O sensor só produz valor quando está articulado a um plano de serviço, a critérios de inspeção, ao registro histórico das falhas, à gestão de estoques, ao controle dos recursos e à avaliação técnico-econômica dos equipamentos. Sem esse encadeamento, os dados se acumulam,

mas não orientam decisões. Com esse encadeamento, a informação sensorial passa a atuar como elemento de antecipação, permitindo que a organização intervenha antes que a degradação técnica se converta em parada, perda produtiva ou substituição prematura de componentes (Soeiro et al., 2017).

### Figura 1. Organização da manutenção



Fonte: Soeiro et al., (2017)

A passagem da manutenção preventiva para a manutenção preditiva nasce justamente da insuficiência de uma prática baseada apenas em intervalos fixos. A preventiva tem valor quando reduz a improvisação e organiza paradas, mas pode se tornar dispendiosa quando leva à substituição de peças ainda úteis ou à interrupção de sistemas que poderiam operar com segurança por mais tempo. Essa limitação aparece de forma clara na observação de Ruas (2019):

*Com a realização de paradas programadas e troca de peças que muitas vezes ainda não estavam apresentando defeitos, os custos com a manutenção preventiva acabaram se tornando bastante elevados. Com isso, as equipes das fábricas começaram a buscar formas para aumentar a vida útil das peças e diminuir estes custos altos de manutenção (Ruas, 2019, p. 15).*

Essa fala é relevante porque toca no centro do problema econômico e ambiental da manutenção, porque trocar antes da hora pode parecer prudente do ponto de vista operacional, mas também pode significar desperdício de material, descarte antecipado, aumento de consumo de peças, geração de resíduos e imobilização desnecessária de equipamentos. Em sistemas hidráulicos, esse problema se agrava pela presença de fluidos técnicos, filtros, vedações, mangueiras e componentes metálicos que demandam controle rigoroso de uso, descarte e reposição. A manutenção preditiva, portanto, não deve ser tratada apenas como estratégia para evitar falhas, mas como mecanismo de racionalização do ciclo de vida dos ativos. Seu objetivo não é adiar manutenção de forma irresponsável, mas determinar o momento tecnicamente adequado para intervir, com base em evidências operacionais, padrões de degradação e limites aceitáveis de risco (Mobley, 2002).

Em termos conceituais, a base da manutenção preditiva dialoga diretamente com as noções de confiabilidade e manutenibilidade. A confiabilidade remete à capacidade de um item desempenhar sua função sob condições especificadas durante determinado intervalo

de tempo, enquanto a manutenibilidade diz respeito à possibilidade de restaurar ou conservar esse item em condição operacional dentro de parâmetros definidos. Essa estrutura conceitual, presente na NBR 5462, permite compreender que a manutenção preditiva não é um improviso tecnológico, mas uma forma de gestão orientada à continuidade funcional dos sistemas. Em hidráulica, isso significa acompanhar variáveis que revelam a saúde do equipamento antes da falha funcional, como pressão, temperatura, vibração, vazão, contaminação, viscosidade e presença de partículas no fluido (ABNT, 1994).

A especificidade dos sistemas hidráulicos está no fato de que o fluido não é apenas meio de transmissão de energia, mas também indicador da condição interna do sistema. Alterações na composição do óleo, presença de água, partículas metálicas, degradação térmica ou perda de viscosidade podem revelar processos de desgaste que ainda não se expressaram como pane. Por isso, pesquisas sobre sensores aplicados ao monitoramento de fluidos hidráulicos são particularmente importantes para esse campo. Duchowski e Mannebach (2006), ao discutirem sensores MEMS para monitoramento on-line de condições de fluidos hidráulicos e lubrificantes, reforçam que a análise contínua do fluido permite identificar alterações relevantes sem depender exclusivamente de desmontagens, inspeções manuais ou falhas já consumadas.

Essa lógica se aproxima da manutenção baseada em condição, cuja maturidade técnica depende da capacidade de transformar sinais operacionais em diagnóstico e prognóstico. Williams et al. (1994) já destacavam que a manutenção baseada em condição depende da leitura sistemática do comportamento das máquinas, não apenas da observação pontual de defeitos. O dado isolado, nesse sentido,

raramente é suficiente. O que importa é a série histórica, a tendência, a comparação com padrões anteriores, a interpretação do desvio e a capacidade de relacionar diferentes variáveis. Um aumento de temperatura pode ser pouco conclusivo sozinho, mas se associado à queda de pressão, alteração de viscosidade e crescimento de partículas no óleo, passa a indicar um quadro técnico muito mais preciso.

A entrada da Internet Industrial das Coisas amplia essa capacidade de leitura ao permitir que sensores, controladores, redes industriais e plataformas analíticas operem de maneira integrada. Civerchia et al. (2017) mostram que soluções de IoT voltadas à manutenção preditiva permitem criar ambientes de monitoramento contínuo, nos quais dados coletados em campo alimentam sistemas capazes de apoiar decisões de manutenção. No caso dos sistemas hidráulicos, isso favorece uma passagem importante: a manutenção deixa de depender apenas da experiência acumulada dos técnicos e passa a combinar experiência humana, instrumentação sensorial e análise computacional.

A abordagem baseada em dados também altera a forma de avaliar eficiência. Em um modelo convencional, eficiência costuma ser medida apenas pela redução de paradas ou pelo menor custo imediato de manutenção. Em uma abordagem preditiva, a eficiência precisa incluir o prolongamento da vida útil dos componentes, a redução de substituições desnecessárias, o uso mais racional de fluidos, o menor volume de descarte e a preservação da capacidade operacional dos equipamentos. Zhang et al. (2017) contribuem para essa discussão ao relacionar big data, manutenção e processos produtivos mais limpos, indicando que a

análise de dados pode apoiar decisões industriais com reflexos não apenas econômicos, mas também ambientais.

Assim, a manutenção preditiva aplicada a sistemas hidráulicos deve ser entendida como uma prática que atravessa três dimensões inseparáveis. A primeira é técnica, pois envolve sensores, diagnóstico, prognóstico e interpretação de variáveis operacionais. A segunda é gerencial, porque depende de planejamento, registro, priorização, indicadores e integração entre manutenção e produção. A terceira é ambiental, pois a decisão correta sobre quando intervir pode reduzir desperdícios, evitar descarte prematuro de materiais e diminuir perdas associadas a falhas catastróficas. É justamente nessa convergência que o tema ganha densidade científica: os dados sensoriais não são apenas instrumentos de controle, mas mediadores entre desempenho, custo, confiabilidade e sustentabilidade.

## **2.1. Monitoramento de Condição por Sensores em Sistemas Hidráulicos**

Diferentemente da inspeção eventual, que depende de sintomas já perceptíveis ou de verificações programadas, o monitoramento sensorial permite acompanhar sinais que antecedem a falha e que, muitas vezes, não seriam percebidos por observação direta. Nesses sistemas hidráulicos, isso é decisivo porque a degradação costuma ocorrer de modo progressivo, iniciando-se por pequenas alterações no fluido, na pressão, na temperatura, na vazão, na vibração ou no comportamento de componentes submetidos a esforço repetitivo. A falha, raramente aparece como evento isolado; ela é resultado de uma sequência de alterações físicas e operacionais que podem ser

registradas, comparadas e interpretadas antes da perda funcional do sistema (Williams et al., 1994).

A pressão é uma das variáveis mais sensíveis nesse processo, pois revela tanto a capacidade do sistema de transmitir força quanto a estabilidade do circuito hidráulico. Oscilações fora do padrão podem indicar obstruções, vazamentos internos, desgaste de bombas, mau funcionamento de válvulas ou perda de eficiência em atuadores. A temperatura, por sua vez, funciona como indicador indireto de atrito, sobrecarga, degradação do fluido e deficiência de troca térmica. Quando essas medições são analisadas de forma combinada, deixam de ser números isolados e passam a compor uma espécie de assinatura operacional do equipamento. Essa assinatura permite reconhecer o que é normal, o que é transitório e o que já aponta para uma tendência de falha.

A análise do fluido hidráulico ocupa lugar central nesse tipo de monitoramento, pois o óleo não apenas circula pelo sistema, mas carrega informações sobre o estado dos componentes internos. A presença de partículas metálicas pode indicar desgaste de superfícies; a contaminação por água compromete propriedades lubrificantes; a alteração de viscosidade afeta a transmissão de energia; e a oxidação pode reduzir a vida útil do fluido e dos elementos mecânicos. Nesse sentido, sensores voltados à condição do óleo, como os discutidos por Duchowski e Mannebach (2006), tornam-se estratégicos porque permitem observar a degradação sem desmontagens frequentes, reduzindo intervenções desnecessárias e majorando a capacidade de decisão baseada em evidências técnicas.

O mesmo raciocínio vale para vibração e ruído operacional, especialmente em bombas, motores hidráulicos e conjuntos rotativos. Vibrações anormais podem indicar desalinhamento, cavitação, folgas, desgaste de rolamentos ou instabilidade no escoamento. O desafio não está apenas em medir a vibração, mas em interpretar sua evolução ao longo do tempo. Um pequeno desvio pode não exigir parada imediata, mas sua repetição ou aceleração pode indicar deterioração em curso. A manutenção preditiva ganha força justamente nessa leitura temporal, pois a decisão não é tomada apenas porque um valor ultrapassou determinado limite, mas porque a trajetória do dado aponta para perda de confiabilidade.

Esse ponto diferencia o monitoramento de condição de uma simples coleta de medições. O valor do sensor não está em produzir informação em excesso, mas em gerar dados capazes de orientar decisões. Um sistema repleto de sensores, mas sem critérios de análise, pode aumentar o volume de registros sem melhorar a manutenção. Por outro lado, um conjunto bem definido de variáveis, associado a parâmetros técnicos e histórico operacional, permite que a equipe identifique padrões de degradação com mais precisão. Por isso, a escolha dos sensores deve estar alinhada à criticidade do equipamento, ao tipo de falha esperada, ao custo da parada, à disponibilidade de peças e aos riscos ambientais associados ao mau funcionamento do sistema.

A aplicação de IoT na manutenção industrial amplia esse processo ao conectar sensores, máquinas e plataformas de análise. Quando os dados deixam de ser coletados apenas localmente e passam a circular por redes digitais, a manutenção ganha maior capacidade de acompanhamento remoto, registro histórico e comparação entre

ativos. A leitura do equipamento deixa de depender exclusivamente da ronda física e passa a incorporar painéis de acompanhamento, alarmes, tendências e relatórios. Ainda assim, a tecnologia não elimina o julgamento técnico. Ela oferece maior densidade de informação, mas continua exigindo interpretação qualificada para distinguir variações normais de sinais efetivos de falha (ABECOM, 2023).

Identificando degradação real, e não apenas suposta, se torna possível evitar trocas prematuras de óleo, filtros e componentes. Ao mesmo tempo, a detecção precoce de contaminação ou aquecimento excessivo impede que uma anomalia localizada comprometa todo o circuito. A manutenção preditiva, portanto, não se limita a reduzir paradas; ela melhora o uso dos materiais e diminui desperdícios associados à substituição precipitada, ao descarte de fluidos ainda utilizáveis e à propagação de danos. É nessa ligação entre leitura técnica e decisão econômica que o monitoramento sensorial se torna relevante para a sustentabilidade operacional.

Também é importante observar que o monitoramento de condição não funciona como promessa de eliminação total das falhas. Nenhum sistema sensorial é capaz de controlar todas as variáveis de uso, ambiente, carga, envelhecimento e operação humana. Seu papel é reduzir incertezas, antecipar tendências e oferecer bases mais consistentes para a intervenção. Essa distinção evita uma visão ingênua da tecnologia. Sensores não tornam a manutenção automática por si só; eles tornam a manutenção mais informada. A diferença é decisiva, porque a confiabilidade do processo depende da qualidade dos dados, da calibração dos instrumentos, da frequência de coleta, da integração com registros históricos e da capacidade analítica da equipe.

É a partir dessa base que se pode avançar para as estruturas de aquisição e processamento de dados sensoriais. Afinal, sensores instalados em equipamentos hidráulicos são apenas a primeira camada do sistema. Para que a manutenção preditiva se consolide, os sinais capturados precisam ser convertidos em dados utilizáveis, tratados, armazenados, comparados e analisados. A arquitetura que sustenta esse percurso determina se o monitoramento será apenas descritivo ou se realmente poderá apoiar diagnóstico, prognóstico e decisões de manutenção.

### **2.1.1. Estruturas de Aquisição e Processamento de Dados Sensoriais**

A aquisição de dados ocorre na interface direta com o equipamento, geralmente por meio de sensores analógicos ou digitais acoplados a pontos estratégicos do sistema hidráulico. Esses sensores captam variações físicas e as convertem em sinais elétricos, que precisam ser condicionados antes de qualquer uso. Esse condicionamento envolve filtragem de ruído, amplificação, normalização e conversão analógico-digital, etapas fundamentais para garantir que o dado represente de forma fiel o comportamento do sistema. Sem esse cuidado, pequenas interferências podem ser interpretadas como falhas, gerando alarmes falsos ou decisões equivocadas.

Uma vez convertidos, os dados seguem para unidades de aquisição, como controladores lógicos programáveis, microcontroladores ou sistemas embarcados. É nesse ponto que começa a organização da informação. A frequência de coleta, por exemplo, não pode ser arbitrária. Coletas muito espaçadas podem perder eventos relevantes, enquanto coletas excessivamente rápidas geram volume de dados difícil de processar e armazenar. Em sistemas hidráulicos,

essa escolha deve considerar o tipo de fenômeno monitorado. Variações de pressão podem exigir leitura mais frequente, enquanto propriedades do fluido podem ser monitoradas em intervalos maiores, desde que não se perca a capacidade de identificar tendências de degradação.

A transmissão desses dados também define o alcance do sistema. Em arquiteturas mais simples, a informação permanece local, sendo analisada diretamente no equipamento ou em estações próximas. Com as estruturas mais avançadas, os dados são enviados por redes industriais ou plataformas conectadas, permitindo monitoramento remoto, comparação entre ativos e integração com sistemas de gestão. É nesse ponto que a Internet Industrial das Coisas aumenta a manutenção preditiva, pois transforma dados locais em fluxos contínuos de informação acessíveis a diferentes níveis da organização (Civerchia et al., 2017). A decisão deixa de ser baseada apenas na percepção do operador e passa a incorporar registros históricos e análises mais amplas.

O armazenamento, por sua vez, não pode ser tratado como simples acumulação de dados. O valor está na organização e na rastreabilidade. Dados sensoriais precisam ser associados a tempo, equipamento, condição de operação e eventos registrados. Sem essa estrutura, perde-se a possibilidade de construir histórico confiável, comparar desempenhos ou identificar padrões de falha. Em sistemas hidráulicos, essa dimensão histórica é essencial, pois muitas falhas são progressivas e só se tornam evidentes quando analisadas em sequência temporal. A análise pontual, isolada do contexto, tende a ser insuficiente.

O processamento desses dados representa o momento em que a informação deixa de ser descritiva e passa a ter valor analítico. Inicialmente, esse processamento pode ser baseado em limites operacionais previamente definidos, nos quais determinados valores acionam alertas. No entanto, essa abordagem, embora útil, é limitada.

Nesse sentido, o uso de técnicas analíticas mais avançadas permite elevar a qualidade da decisão. A integração de grandes volumes de dados com métodos de análise estatística e modelos preditivos amplia a capacidade de antecipar falhas e otimizar intervenções. Zhang et al. (2017) destacam que arquiteturas baseadas em análise de dados contribuem não apenas para a manutenção, mas também para processos produtivos mais eficientes, ao reduzir desperdícios e melhorar o uso de recursos. Em sistemas hidráulicos, isso significa intervir no momento adequado, evitando tanto a falha quanto a substituição prematura de componentes.

Um sistema de aquisição e processamento eficiente não deve apenas gerar relatórios técnicos, mas apoiar a tomada de decisão operacional. Isso envolve transformar dados complexos em indicadores compreensíveis, como tendências, índices de saúde do equipamento e níveis de criticidade. A informação precisa chegar ao gestor e à equipe de manutenção de forma clara, sem perder consistência técnica. Caso contrário, o sistema pode gerar dados sofisticados, mas pouco úteis na prática.

Para tanto, é importante reconhecer que a estrutura de dados não elimina a necessidade de estratégia de manutenção. Pelo contrário, ela a reforça. A coleta e o processamento de dados precisam estar alinhados aos objetivos da organização, aos critérios de

confiabilidade e aos limites de risco aceitáveis. Como ressaltam Kardec e Nascif (2009), a manutenção só se torna efetivamente estratégica quando suas decisões estão integradas à lógica produtiva da empresa. No contexto da manutenção preditiva baseada em dados, isso significa que a tecnologia deve servir à decisão, e não substituí-la.

## **2.2. Otimização de Recursos e Redução de Impactos na Manutenção Preditiva**

A leitura dessa dinâmica fica mais clara quando se observa a relação entre o avanço da degradação e o custo de intervenção. O equipamento não “quebra” de uma vez, ele atravessa um intervalo no qual seu funcionamento se afasta progressivamente das condições ideais. Esse intervalo representa a diferença entre uma ação simples e uma intervenção desafiadora.

Quanto mais distante do ponto inicial de desvio, maior a quantidade de componentes envolvidos, maior o tempo de parada e maior o impacto sobre o processo produtivo. A curva PF expressa exatamente essa relação ao evidenciar que o custo cresce à medida que o sistema se aproxima do limite operacional, tornando a antecipação da decisão um fator central na gestão da manutenção (Mobley, 2002; Engeman, 2024).

**Figura 2:** Curva PF x Custo para reparo



A limitação da manutenção preventiva aparece justamente por não considerar essa variação de estado. Ao operar por cronograma, ela assume que todos os componentes seguem o mesmo ritmo de desgaste, o que não corresponde à realidade de sistemas hidráulicos sujeitos a variações de carga, temperatura e contaminação.

Em vez de assumir quando intervir, passa-se a identificar quando o sistema começa a sair do seu padrão de funcionamento. Essa diferença se torna evidente no tratamento do fluido hidráulico, que deixa de ser trocado por tempo de uso e passa a ser avaliado quanto à sua condição. A presença de contaminantes, alterações na viscosidade e sinais de degradação passam a orientar a decisão, permitindo prolongar o uso quando possível e intervir apenas quando necessário. Esse tipo de abordagem reduz o descarte de materiais ainda funcionais e evita a introdução prematura de novos insumos no sistema (Duchowski; Mannebach, 2006).

A leitura dessas condições depende de métodos capazes de tornar visíveis alterações que não seriam percebidas no uso cotidiano. A combinação entre análise térmica, vibração e estado do fluido amplia a compreensão do funcionamento interno do equipamento e permite reconhecer padrões de desgaste antes que se tornem críticos. Esse conjunto de práticas não apenas melhora a precisão da intervenção, mas também reduz a dependência de decisões baseadas em estimativas, como descrito por Fontes (2018):

*Visualização e captura de imagens em equipamentos, para identificação de falhas, e medição de temperaturas, através de infravermelho, sem nenhum contato. Alinhamento, balanceamento e inspeção de vibrações. A análise de óleo é essencial para o bom funcionamento da máquina. É necessário verificar o óleo nos sistemas hidráulicos e sistemas de lubrificação, além de examinar o nível do reservatório. Utilizando termovácuo, é possível retirar água e gases dos fluidos lubrificantes, realizando a filtragem (Fontes, 2018, p. 22 apud Machado, 2021, p. 18).*

Esse tipo de monitoramento permite que a manutenção seja ajustada à realidade do sistema, evitando tanto a antecipação desnecessária quanto a intervenção tardia. A consequência direta é a redução do consumo de peças, a diminuição do volume de resíduos gerados e a melhor utilização dos recursos disponíveis. Em operações onde o custo de parada é elevado, essa capacidade de ajuste representa não apenas economia, mas estabilidade operacional, uma vez que o sistema deixa de ser interrompido por decisões baseadas em suposição.

A adoção dessa abordagem, no entanto, exige uma estrutura capaz de sustentar o fluxo de informações e sua interpretação. A coleta de dados por si só não garante melhoria se não estiver integrada a critérios de análise e tomada de decisão. A manutenção preditiva demanda organização, capacitação técnica e alinhamento entre as áreas envolvidas, o que implica investimento inicial. Esse aspecto é reconhecido por Ferreira ao destacar que:

*A manutenção preditiva, em geral, requer um grande investimento em tempo, tecnologia avançada, profissionais de manutenção bem treinados, e demanda um comprometimento com a gestão. O retorno de um investimento em um programa de manutenção preditiva é significativo e tem impactos diretos em termos de elevação da produtividade, melhoria da qualidade, efetividade global dos equipamentos, melhor atendimento ao cliente e um melhor ambiente de trabalho (Ferreira, 2008, p. 12).*

Ao consolidar esse modelo, a manutenção deixa de operar como resposta a eventos isolados e passa a atuar como parte integrada da gestão de recursos. A decisão técnica ganha consistência, o uso de materiais se torna mais racional e os impactos associados à operação são reduzidos de forma contínua. Em sistemas hidráulicos, onde a interação entre fluido e componente define o desempenho do conjunto, essa mudança representa uma forma mais precisa de preservar o equipamento e utilizar seus recursos sem excesso nem negligência.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise dos estudos e aplicações voltadas à manutenção preditiva em sistemas hidráulicos permite identificar um padrão consistente de ganhos operacionais quando a decisão deixa de ser baseada em tempo e passa a ser orientada por condição. Em termos práticos, isso se reflete na redução de intervenções desnecessárias, no aumento da disponibilidade dos equipamentos e na diminuição de

falhas críticas associadas à degradação não monitorada. Trabalhos como o de Mobley (2002) indicam que programas estruturados de manutenção preditiva podem reduzir custos de manutenção entre 25% e 30%, além de diminuir paradas não planejadas, o que impacta a produtividade industrial.

No contexto específico de sistemas hidráulicos, os resultados se tornam ainda mais evidentes quando se observa o comportamento do fluido ao longo do tempo. Estudos sobre monitoramento de óleo, como os discutidos por Duchowski e Mannebach (2006), demonstram que a identificação precoce de contaminação e degradação permite prolongar o tempo de uso do fluido sem comprometer o desempenho do sistema. Isso significa que, ao invés de seguir um ciclo fixo de troca, a manutenção passa a responder ao estado real do óleo, reduzindo descarte e consumo de insumos. Em aplicações industriais, essa prática pode representar economia significativa, considerando que fluidos hidráulicos de alto desempenho possuem custo elevado e exigem descarte controlado.

A integração de sensores e sistemas de aquisição de dados amplia essa capacidade de análise ao permitir monitoramento contínuo de variáveis críticas. Civerchia et al. (2017) mostram que soluções baseadas em Internet Industrial das Coisas possibilitam acompanhar em tempo real parâmetros como pressão, temperatura e vibração, criando uma base de dados que sustenta decisões mais precisas. Esse tipo de abordagem reduz a dependência de inspeções pontuais e aumenta a confiabilidade das intervenções, uma vez que a decisão passa a considerar tendências e não apenas valores isolados. Na prática, isso se traduz em maior previsibilidade operacional e menor exposição a falhas inesperadas.

Algo que também precisa ser abordado está na relação entre o momento da intervenção e o custo associado, onde a aplicação do conceito da curva PF, discutida por Engeman (2024), evidencia que intervenções realizadas ainda no estágio inicial da degradação apresentam custo significativamente inferior quando comparadas às ações realizadas após a falha funcional. Esse comportamento não é apenas teórico, mas observado em diferentes contextos industriais, onde a manutenção preditiva atua diretamente na redução de custos indiretos, como perda de produção, mobilização emergencial de equipes e substituição de múltiplos componentes em cascata.

A análise também evidencia que a manutenção preditiva contribui para a eficiência no uso de recursos ao evitar substituições prematuras. Conforme apontado por Ruas (2019), a prática de trocas programadas sem considerar a condição real dos componentes gera custos elevados e reduz a vida útil efetiva dos materiais. Ao substituir esse modelo por uma abordagem baseada em monitoramento, torna-se possível alinhar a intervenção ao desgaste real, o que reduz desperdícios e melhora o aproveitamento dos insumos. Esse efeito é relevante em sistemas hidráulicos, onde a substituição de componentes envolve não apenas custo material, mas também impacto operacional e também ambiental.

Do ponto de vista ambiental, os resultados indicam que a manutenção preditiva atua de forma indireta, mas consistente, na redução de impactos. A diminuição do descarte de fluidos, a redução no consumo de peças e a menor ocorrência de falhas graves contribuem para um uso mais sustentável dos recursos industriais. Zhang et al. (2017) destacam que a análise de dados aplicada à manutenção permite otimizar processos produtivos ao reduzir desperdícios e melhorar a eficiência global dos sistemas. Em

sistemas hidráulicos, isso se reflete na preservação do fluido, na redução de vazamentos não detectados e na menor necessidade de intervenções corretivas de grande porte.

Por outro lado, os resultados também evidenciam limitações importantes. A implementação da manutenção preditiva exige investimento em tecnologia, capacitação e estrutura organizacional, o que pode representar uma barreira inicial para sua adoção. Ferreira (2008) destaca que o retorno desse investimento está diretamente ligado à forma como o sistema é estruturado e à capacidade da organização de interpretar e utilizar os dados gerados. Sem essa base, a coleta de informações pode não se converter em melhoria efetiva, limitando o potencial da abordagem.

De forma geral, a discussão aponta que a manutenção preditiva, quando aplicada de maneira estruturada em sistemas hidráulicos, não apenas melhora o desempenho técnico dos equipamentos, mas também redefine a relação entre operação e uso de recursos. Os ganhos observados não se restringem à redução de falhas, mas envolvem uma utilização mais racional dos materiais, maior controle sobre o processo e uma redução de desperdícios. Esses resultados reforçam que a manutenção preditiva não deve ser tratada apenas como uma ferramenta tecnológica, mas como uma estratégia de gestão orientada por dados e evidências operacionais.

#### **4. CONCLUSÃO**

A análise desenvolvida evidencia que a manutenção preditiva, quando aplicada a sistemas hidráulicos com suporte em dados sensoriais, não se limita à antecipação de falhas, mas redefine a lógica de uso dos recursos ao alinhar a intervenção ao estado real do

equipamento. Esse deslocamento permite reduzir substituições desnecessárias, evitar falhas de maior impacto e otimizar o ciclo de vida de componentes e fluidos, resultando em ganhos operacionais e diminuição de desperdícios. Ao mesmo tempo, sua efetividade depende da capacidade de integrar monitoramento, análise e decisão dentro de uma estrutura organizacional consistente, na qual os dados não apenas sejam coletados, mas interpretados com rigor técnico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABECOM.** IoT na manutenção industrial. Abecom, 09 jun. 2023. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/iot-na-manutencao-industrial/>. Acesso em: 20 abr. 2026.

ALMEIDA, Marcio Tadeu. Manutenção preditiva: benefícios e lucratividade, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-5462: confiabilidade e mantenedibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994

CIVERCHIA, F. et al. (2017). Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications. Journal of Industrial Information Integration, 7, pp. 4–12.

DUCHOWSKI, J. K.; MANNEBACH, H. (2006). A novel approach to predictive maintenance: a portable, multi-component MEMS sensor for on-line monitoring of fluid condition in hydraulic and lubricating systems. Tribology Transactions, 49(4), pp. 545–553.

ENGEMAN. Curva PF. Blog Engeman, 2024. Disponível em: <https://blog.engeman.com.br/curva-pf/>. Acesso em: 20 abr. 2026

FERREIRA, Rodrigo José Pires. Modelagem em manutenção preditiva: um modelo estatístico para diagnóstico e um modelo de decisão multicritério para inspeção. 2008. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco/UFPE, Recife-PE, 2008.

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

**KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio de Aquino.** Manutenção – Função estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

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

MACHADO, Tiago. Manutenção preditiva na indústria. 2021. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNIC, Rondonópolis, 2021.

MOBLEY, R. Keith. An Introduction to Predictive Maintenance. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.

MOUBRAY, John. Reliability-Centered Maintenance II. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.

RUAS, Samarone. A evolução da manutenção preditiva. Campinas. IMachine Techplus, 2019.

SOEIRO, Marcus Vinícius de Abreu; OLIVIO, Amauri; LUCATO, André Vicente Ricco. Gestão da manutenção. Londrina: Educacional, 2017.

VILLAFANHA, Rafael Buosi; TIAGO, Yuri Felipe Mendes; DAMY-BENEDETTI, Patricia de Carvalho. Procedimento de manutenção preventiva. 2025.

**WILLIAMS, J. H. et al.** Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics. Londres: Chapman & Hall, 1994.

ZHANG, Y. et al. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 626–641.