

MONITORAMENTO DO ÓLEO LUBRIFICANTE DE SISTEMAS HIDRÁULICOS COMO PARTE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

MONITORING OF LUBRICANT OIL OF HYDRAULIC SYSTEMS AS PART OF PREDICTIVE MAINTENANCE

Daniel Magalhães Viegas Junior¹

Resumo: Sistemas hidráulicos são amplamente utilizados em diferentes indústrias, como construção civil, aeroespacial, automobilística, petrolífera, dentre outras. O fluido hidráulico ou óleo lubrificante desses sistemas é uma importante fonte de informação a respeito do estado das máquinas. Dessa maneira, a análise do óleo lubrificante se mostra como uma ferramenta importante e eficaz para monitorar a condição dos componentes dos sistemas hidráulicos. Desde o surgimento da manutenção preditiva, pesquisadores têm se dedicado em desenvolver métodos de monitoramento online de fluidos hidráulicos a fim de impedir a ocorrência de falhas, aumentar a segurança e diminuir custos com manutenção. Diante disso, o presente trabalho buscou realizar uma discussão sobre a importância do monitoramento do fluido hidráulico, trazendo os principais métodos de análise e os avanços mais recentes.

Palavras-chave: monitoramento, óleo, lubrificante, sistemas hidráulicos

Abstract: Hydraulic systems are widely used in different industries, such as civil construction, aerospace, automotive, oil, among others. The hydraulic fluid or lubricating oil of these systems is an important source of information regarding the state of the machines. In this way, the analysis of lu-

¹ Engenharia Mecânica, Pós graduado em Engenharia de Manutenção, Pós graduado em Engenharia de Segurança do trabalho, Mestre em Ciências Empresariais, Doutorando em Engenharia Mecânica.



lubricating oil proves to be an important and effective tool to monitor the condition of components of hydraulic systems. Since the emergence of predictive maintenance, researchers have been dedicated to developing methods of online monitoring of hydraulic fluids in order to prevent failures, increase safety and reduce maintenance costs. Therefore, the present work sought to carry out a discussion on the importance of monitoring the hydraulic fluid, bringing the main methods of analysis and the most recent advances.

Keywords: monitoring, oil, lubricant, hydraulic systems

Introdução

Sistemas hidráulicos envolvem a transmissão de energia através da pressurização de um fluido confinado. Eles são formados basicamente por um reservatório, uma bomba, válvulas e atuadores ou cilindros hidráulicos. Trata-se de um sistema amplamente utilizado na construção civil, agricultura, indústria automobilística, indústria aeronáutica, mineração, extração petrolífera, dentre outras aplicações (Lopes, 2016). Estima-se que o mercado global de atuadores cresça à uma taxa anual composta de 5,4%, atingindo 19,4 bilhões de dólares até 2024 (Shanbhag et al., 2021).

Todavia, esses sistemas, assim como quaisquer outras máquinas, estão sujeitos à eventuais falhas internas e externas, sendo as internas mais difíceis de serem detectadas, como contaminação do óleo ou fluido hidráulico, aquecimento, desgaste e vazamentos. A contaminação do óleo, bem como a sua elevação da temperatura podem alterar suas propriedades, como viscosidade e acidez, levando a perdas de sua capacidade de lubrificação, o que conseqüentemente acarreta em desgaste excessivo, vazamentos, resposta lenta, operações não-sequenciadas, queima da bobina do solenoide e falha prematura do componente (Gomes et al., 2008). Cerca de 65-90% das falhas em sistemas hidráulicos ocorrem devido à contaminação do fluido hidráulico (Aggressive Hydraulics, 2022). Segundo estatísticas da Rússia [9], 20 em cada 100 acidentes aéreos são causados por contaminação do fluido



hidráulico.

Dessa forma, acompanhar parâmetros físico-químicos do óleo hidráulico é uma excelente estratégia para avaliar não somente a adequação do óleo lubrificante para uso contínuo, mas também informações sobre a condição do sistema hidráulico interno como um todo. Em razão disso, a manutenção preditiva e, particularmente, o monitoramento em tempo real da degradação do óleo são cruciais para reduzir a taxa de falhas e maximizar a vida útil do equipamento (Fioravanti et al., 2020).

De acordo com Mobley (2002), a manutenção preditiva pode ser entendida como um monitoramento regular do estado atual das condições mecânicas, eficiência operacional e outros indicadores que fornecem dados para determinar o intervalo máximo entre intervenções a fim de minimizar custos e o número de paradas não programadas. Em outras palavras, a manutenção preditiva compara a tendência de medição de alguns parâmetros (vibração, temperatura, pressão, viscosidade, entre outros) com os limites estabelecidos para analisar, prever e corrigir problemas antes da falha (Brown, 2003). Essa previsão é possível através da coleta e processamento de dados de monitoramento de condições (Tian, 2012). Nesse contexto, a análise de óleo se mostra como uma fonte de dados de monitoramento de condição.

Diante dos benefícios fornecidos pela manutenção preditiva, ela vem ganhando cada vez mais destaque e se tornando imprescindível juntamente com as técnicas tradicionais de manutenção corretiva e preventiva (Ma et al., 2018). Estimativa de falha antes de sua ocorrência é obrigatória para alguns sistemas, como elevadores, sistemas elétricos, termostatos a gás e aeronaves para evitar acidentes catastróficos (Khan et al., 2021). Como resultado, os métodos de acompanhamento e coleta de dados estão sendo aprimorados. Em especial, alguns pesquisadores têm se dedicado em desenvolver sensores para monitoramento de óleo lubrificante, como sensores que medem a concentração de água e óxidos metálicos (Zebing et al., 2017; Fioravanti et al., 2020). Essa evolução fica clara ao observar a Fig. 1, que apresenta o número de trabalhos publicados envolvendo as palavras-chave “manutenção preditiva” e “análise de óleo” nos últimos 20 anos de acordo com a busca realizada na Web of Science.

Contudo, a literatura carece de uma publicação que faça um apanhado dos métodos e ins-

trumentos recentemente desenvolvidos especificamente para monitoramento do fluido de sistemas hidráulicos. Nesse sentido, nessa revisão, buscamos discutir a importância da análise do óleo de sistemas hidráulicos dentro do contexto da manutenção preditiva, bem como a evolução dos métodos de análise, englobando suas vantagens e desvantagens.

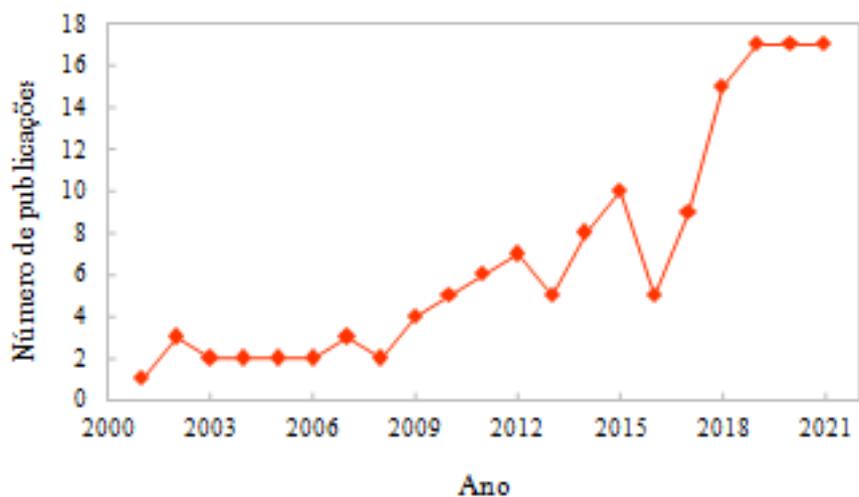


Fig. 1. Trabalhos publicados envolvendo “manutenção preditiva” e “análise de óleo” no decorrer dos últimos 20 anos (Web of Science, 2022).

Principais contaminantes de fluidos hidráulicos

Em um sistema hidráulico o fluido é pressurizado através de uma bomba para transferir energias aos atuadores. Outras funções do fluido hidráulico são reduzir o atrito e o desgaste, fornecendo uma camada de filme contínuo entre as superfícies em movimento, proteger os componentes contra a corrosão, dissipar o calor para manter a temperatura correta das peças de trabalho e lavar contaminantes (Sharma e Gandhi, 2008). O fluido deve apresentar proteção contra ferrugem e corrosão, não formar sedimentos, possuir estabilidade química e inércia química com materiais que entrará em contato (Linsingen, 2013). Os principais fluidos hidráulicos podem ser resumidos em: óleos minerais tratados, solução aquosa com aditivos e óleos sintéticos. Os óleos minerais tratados são fabricados

através de um processo de hidrocraqueamento, garantindo alta resistência à oxidação e envelhecimento, dentre os aditivos, destacam-se os antiespumantes e inibidores de corrosão. Os fluidos à base de solução aquosa normalmente contêm antiespumante, anticongelante, inibidores de corrosão e ferrugem, dentre outros aditivos. Trata-se de um fluido atóxico e biodegradável, no entanto, a faixa de temperatura de trabalho é estreita (0 – 49°C). Os óleos sintéticos consistem geralmente de ésteres de fosfato, hidrocarbonetos clorados, ou uma mistura dos dois com frações de petróleo. Devido ao óleo mineral proveniente do petróleo ser inflamável, também foram desenvolvidos fluidos hidráulicos não inflamáveis, como emulsões óleo-água e água-óleo (Gomes et al., 2008).

Conforme já mencionado, a contaminação do fluido normalmente é o principal motivo das falhas em sistemas hidráulicos e é um indicador importante do estado do sistema. Os principais contaminantes do fluido hidráulico relatados pela literatura são a água, partículas sólidas e gases (Zhang et al., 2018; Shanbhag et al., 2021).

A presença de água em determinadas concentrações pode diminuir a viscosidade do fluido hidráulico, degradando assim a película de óleo/peça e causando desgaste mecânico grave. Outras consequências são a eventual ferrugem dos componentes, congelamento do fluido em baixas temperaturas e aumento da acidez (Ji et al., 2013). Todas essas falhas levam à diminuição da vida útil do sistema. Normalmente, a água como contaminante é proveniente do ar que entra no sistema para compensar o desnível de óleo do reservatório.

A presença de partículas sólidas em fluidos hidráulicos também é comum. Falhas do sistema hidráulico causadas por contaminantes de partículas sólidas correspondem a cerca de 70% do total de falhas devido à contaminação por óleo (Smith, 1985). Partículas metálicas, por exemplo, podem indicar o desgaste dos componentes e resultar em falhas e superaquecimento. Já partículas não metálicas podem ser um indicativo de problemas de vedação contra o ambiente externo (Zhu et al., 2013). Esses contaminantes podem causar danos no filme de óleo, arranhões nas superfícies das peças, redução da lubrificação, aumentar a geração de calor, raspar e descolar vedações. Segundo Casey (2011), a velocidade na qual os danos dos componentes ocorrem devido a partículas sólidas depende do tama-

nho e quantidade das partículas. Partículas maiores do que a folga interna dos componentes dentro do sistema, não resultam em degradação severa, caso contrário, se o tamanho das partículas é quase igual ou menor ao tamanho da folga interna dos componentes, podem ocorrer danos graves devido ao atrito gerado.

Contaminantes gasosos geralmente são de difícil quantificação e são provenientes do ar durante os processos de reabastecimento, limpeza e substituição de componentes. A presença do gás no fluido hidráulico pode ocasionar cavitação e oxidar o fluido, resultando no aumento da viscosidade e acidez. A oxidação ainda pode ser acelerada com o aumento da temperatura, presença de água e catalisadores, como cobre. Todos esses eventos podem diminuir a vida útil do sistema (Ng et al., 2017).

Zhang et al. (2018) avaliaram os três contaminantes (água, partículas sólidas e gases) em três diferentes experimentos utilizando o mesmo óleo hidráulico. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente de 20°C. Para avaliar a influência da água, foi estudada vida útil de um rolamento de um sistema hidráulico em função do teor de água no fluido hidráulico. Os autores variaram a concentração de água de 25 a 5000 ppm para uso em nove rolamentos SKF-6203. A influência das partículas sólidas foi estudada variando o teor de partículas de 8000/100 mL até 2100000/100 mL em nove bombas hidráulicas ZB-34M. A mesma bomba foi utilizada para avaliar a influência de contaminantes gasosos. Neste caso, os autores variaram a vazão da bomba, cujos valores foram 10, 20 e 30 L/min, tanto na ausência quanto na presença de ar. Através de modelagem matemática os autores estimaram a vida útil do sistema em cada situação.

Os resultados de Zhang et al. (2018) indicaram que com um teor de água de 25 ppm a vida útil do rolamento seria de 212 anos, enquanto que a 2500 ppm seria de apenas 19 anos. Além disso, percebeu-se que a queda mais rápida na vida útil de 25 para 250 ppm, concentrações maiores apresentaram menores taxas de queda, mostrando que um aumento para 250 já seria preocupante. Com respeito à bomba, as estimativas indicaram que quando o teor de partículas sólidas do óleo aumentou de 8201/100 mL para 2096990/100 mL, a vida útil dos componentes diminuiria de 160 anos para 7,25 meses.



Observou-se também que a eficiência média seria de 44 e 61% e a potência máxima seria de 48 e 79% na presença e ausência de ar, respectivamente.

Monitoramento de fluidos em sistemas hidráulicos

Atualmente, a detecção de contaminantes em fluidos hidráulicos pode ser dividida em detecção offline e monitoramento online. A detecção offline é baseada principalmente em análises de ferrografia e espectroscopia em laboratório, que pode obter informações detalhadas sobre o material, tamanho, forma e concentração de contaminantes. Esse processo envolve amostragem, inspeção, análise laboratorial e tratamento de dados, o que envolve muitas vezes é um processo de alto custo, longo e não reflete o status em tempo real de óleo hidráulico. Já o monitoramento online é um método de detecção em tempo real, ou seja, é uma ferramenta da manutenção preditiva.

Dessa forma, ao longo dos anos houve um avanço significativo nas técnicas de monitoramento da condição de óleos hidráulicos, especificamente nas técnicas de monitoramento online, com o intuito de antecipar falhas antes que elas aconteçam e prever a vida útil restante das máquinas.

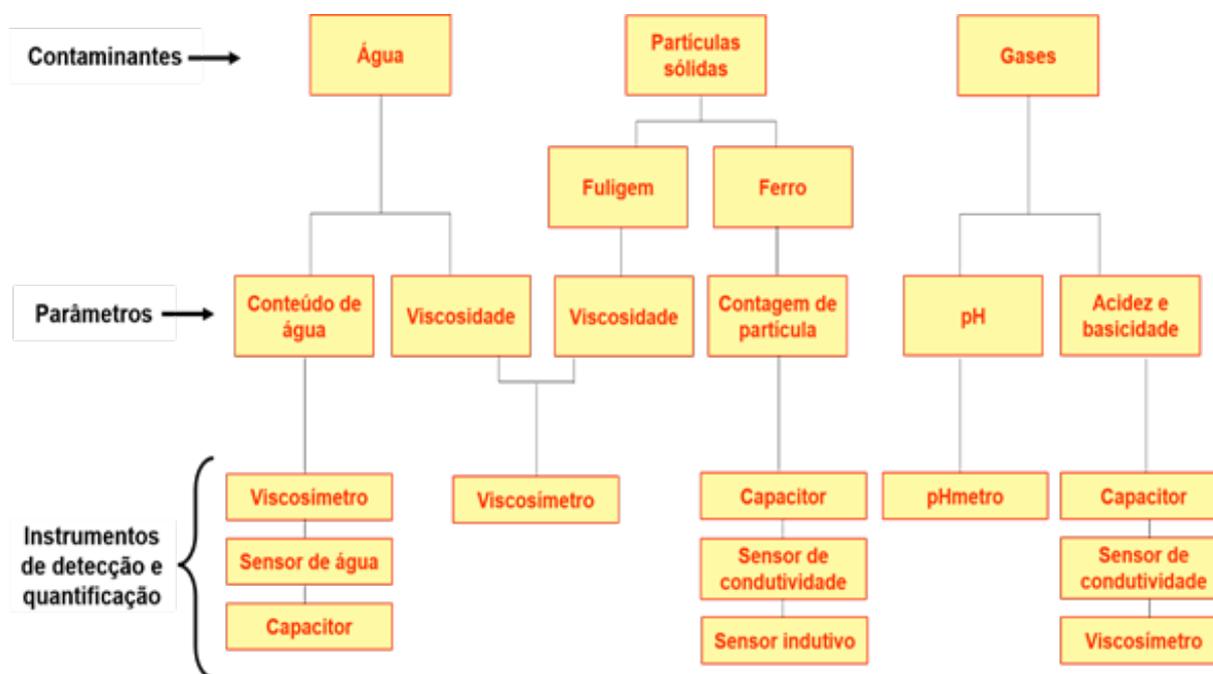
O agendamento de tarefas de manutenção com base no monitoramento da condição dos equipamentos através de curvas de degradação de desempenho está se tornando cada vez mais comum, uma vez que a manutenção preditiva aumenta a segurança do sistema, minimiza o tempo de inatividade e auxilia a maximizar a vida útil dos componentes (Xi et al., 2020).

De acordo com Poley (2012), o monitoramento do óleo de lubrificação alerta sobre o mau funcionamento de uma máquina com uma antecedência de aproximadamente 10 vezes maior em relação às técnicas de monitoramento de vibração. Barber e Golbeck (2006) usaram um exemplo de caso para demonstrar a economia que a implantação da condição online de monitoramento causaria em uma caixa de velocidade e relataram que poderiam ser economizados até 319000 dólares.

As técnicas desenvolvidas até o momento para analisar e monitorar óleos hidráulicos podem ser classificadas em quatro categorias: físicas, químicas, elétricas e ópticas. Os parâmetros normal-

mente analisados são o conteúdo de água, quantidade de partículas sólidas, acidez e basicidade, pH e viscosidade (Zhu et al., 2013).

Conforme mencionado, as técnicas de monitoramento e análise estão evoluindo ao longo dos anos, mas na Fig. 2 é mostrada a relação entre os três principais contaminantes de óleo hidráulico, parâmetros analisados e técnicas tradicionais de análise. Observa-se que as técnicas de detecção podem ser diretas ou indiretas. A capacitância, por exemplo, é uma medida indireta da qualidade do óleo hidráulico, sendo capaz de indicar a presença dos três principais contaminantes. Por outro lado, a viscosidade, por exemplo, é uma medida direta da viscosidade do fluido e também pode indicar a presença dos três principais contaminantes. Em geral, técnicas físicas e químicas são métodos diretos e técnicas elétricas e ópticas são indiretas.



Fonte: Adaptado de (Zhu et al., 2013).

Fig. 2. Relação entre os principais contaminantes de óleo hidráulico, parâmetros e técnicas de análise.

Métodos de análise

Os métodos diretos são tradicionais, eles são bem explorados na literatura e conhecidos. Em vista disso, essa revisão fará um apanhado dos métodos indiretos, uma vez que esses são os métodos que estão sendo constantemente investigados e aprimorados. Na busca realizada, constatou-se que a maioria das pesquisas se concentrou em desenvolver sensores baseados em métodos capacitivos, indutivos e ópticos. Os métodos ultrassônicos foram muito pouco explorados até o momento, de modo que ainda existem apenas alguns protótipos. Dessa maneira, serão abordados somente os métodos eletromagnéticos e ópticos.

Eletromagnéticos

Nos métodos eletromagnéticos, os parâmetros que podem ser medidos para acompanhar o estado do fluido hidráulico são: constante dielétrica, condutividade e indutância. Diversos trabalhos na literatura reportam o uso de capacitores projetados para medir a variação da constante dielétrica do fluido hidráulico como indicativo do grau de degradação do mesmo (Shanbhag et al., 2021). A constante dielétrica pode ser entendida como uma medida da capacidade do material para armazenar energia elétrica (Turner e Austin, 2003). Uma mudança na constante dielétrica pode indicar a presença de água, ar e partículas sólidas ou uma mudança na composição química, temperatura e densidade (Carey e Hayzen, 2001).

Islam et al. (2020) propuseram um sensor capacitivo cruzado altamente preciso para detecção de partículas metálicas em óleo lubrificante. O dispositivo consiste em quatro eletrodos cilíndricos com lacunas infinitesimais envolvidas em torno de um tubo oco de teflon. O sensor foi modelado com software de simulação de elementos finitos e depois fabricado para verificar a teoria experimentalmente. Os resultados mostraram que a resposta capacitiva do sensor é altamente precisa ($\pm 0,82\%$) e exata.



A combinação de sensores também tem sido explorada. Shi et al. (2019), avaliaram um sensor de detecção de detritos de desgaste integrado, que incluiu um sensor de pulso capacitivo, que pode contar e distinguir partículas metálicas e bolhas de ar no óleo hidráulico e um sensor de pulso indutivo com chapa de aço silício, que pode distinguir entre partículas metálicas ferromagnéticas e não ferromagnéticas. Com a comparação de ambos os sensores, foi possível detectar partículas metálicas não ferromagnéticas de menor tamanho. O sensor integrado pôde detectar e distinguir partículas de ferro de 30 μm , partículas de cobre de 45 μm e bolhas de ar de 80 μm .

Industrialmente, existem muitos dispositivos de monitoramento de óleo lubrificante de sistema hidráulico baseados em sensor dielétrico, como o sensor da Parker Kittiwake (2022) que detecta a mudança nos níveis de água e ácido e o da HYDAC (2022) que mede o envelhecimento e mistura de fluidos monitorando mudanças relativas à constante dielétrica, viscosidade do fluido, temperatura e teor de umidade.

Mudanças na condutividade também podem indicar a presença de partículas sólidas e gases. Em geral, o aumento da concentração de íons e mobilidade causa um aumento na condutividade (Mauntz et al., 2011). Moon, et al. (2006) relataram que, ao medir a condutividade do óleo com um sensor de nanotubo de carbono, foi possível monitorar a taxa de oxidação do óleo lubrificante. Os autores correlacionaram os dados de condutividade do nanotubo com a acidez do óleo de teste. Os resultados mostram que o sensor foi eficaz em relação à deterioração da oxidação do óleo, uma vez que o comportamento da condutividade medida mostrou alta covariância com a acidez total. Este foi um resultado extremamente importante, uma vez que sensores com base em técnicas químicas têm problemas de vida útil relativamente curta e não são capazes de diagnósticos online.

Há uma série de instrumentos disponíveis no mercado para medir as propriedades condutoras de um fluido, como o sensor da Parker (2022), que mede características como condutividade, permissividade, temperatura, pressão e teor de umidade para determinar o envelhecimento, tipo, mistura e vida útil restante do fluido.

Sensores de monitoramento de fluido hidráulico baseados na medida da indutância também

têm sido bastante explorados, especialmente porque eles podem detectar e distinguir partículas metálicas ferromagnéticas e não ferromagnéticas. Shi et al. (2020) propuseram um sensor de partículas sólidas capaz de medir simultaneamente indutância e resistência. O dispositivo consiste principalmente em duas bobinas planares em paralelo, duas tiras de aço silício de excitação inseridas no orifício interno das bobinas e uma tira aço silício embutido localizada no centro do canal. O sensor foi capaz de distinguir e detectar partículas de ferro de 25 μ m e partículas de cobre 85 μ m.

Zhang et al. (2021) avaliaram um sensor de impedância e resistência parecido, o dispositivo também foi construído bobinas planas, tiras de aço silício inserido nos orifícios internos da bobina e canais retangulares duplos. Ao analisar a direção e a presença ou ausência de pulsos de sinal, o sensor de detritos de impedância pode detectar e distinguir partículas de ferro de 46 μ m e partículas de cobre de 110 μ m.

Um sensor capaz de detectar partículas sólidas, viscosidade e umidade também á foi explorado por Zhu et al. (2013). O sensor integrado consistia em elementos de detecção multiplexados em miniatura para detecção de detritos de desgaste, medição de viscosidade e umidade, para isso o dispositivo possuía oito canais de detecção. Os resultados dos testes mostraram que o sensor integrado é capaz de medir partículas sólidas (>50 μ m), umidade (>50 ppm) e viscosidade (>12,4 cSt) com alto rendimento (200 mL/min), apresentando potencial para ser usado para monitoramento online da condição de óleos hidráulicos.

Ópticos

Sensores baseados em métodos ópticos permitem medições de fluidos hidráulicos novos e envelhecidos. Esses sensores são baseados em espectroscopia de absorção, que correlaciona os dados obtidos com o estágio de degradação do fluido (Villar et al., 2012). Uma das técnicas ópticas, por exemplo, utiliza a cor do fluido como parâmetro de detecção. Kumar et al. (2005) desenvolveram um sensor óptico de cores que verifica a passagem ou absorção de luz pelo fluido. Conforme o fluido



envelhece, ele tende a ficar mais opaco, ou seja, a degradação do fluido resulta em uma mudança da intensidade de absorção de luz. A intensidade de absorção de luz é então convertida em resistência elétrica. Seguindo o mesmo princípio, Ossia et al. (2010) desenvolveu um sensor óptico para fluidos sintéticos baseado na mudança de cor do fluido utilizando a técnica de absorção óptica.

Hamilton et al. (2014) desenvolveram um sistema de imagem de partículas de desgaste para detectar o tamanho e forma dos detritos. O sistema consiste de uma fonte de luz para iluminar o canal de fluxo e uma câmera. Essas imagens seriam processadas pelo software MATLAB para identificar falhas mecânicas e componentes desgastados. Este método possui muitas desvantagens quando usado para aplicativos online, visto que o óleo lubrificante pode rapidamente tornar-se não transparente após a operação, causando dificuldades em tirar fotos nítidas e na contagem das partículas. Outro problema relacionado é a necessidade de um hardware de alto desempenho e processamento de imagem eficiente.

Outra classe de sensores ópticos é composta por sensores que se baseiam na absorção da radiação infravermelha. Quando o fluido se degrada, pode ser gerado o um composto de nitrato, o qual absorve a radiação infravermelha de comprimento de onda de 6,13 μm . Este princípio foi usado por alguns pesquisadores para desenvolver sensores, de forma que contaminantes como água de glicol podem ser detectados (Zhu et al., 2013).

Agoston et al. (2004) desenvolveu um sensor de radiação infravermelha que poderia ser usado no monitoramento de fluidos hidráulicos. O dispositivo continha um detector e filtros de radiação infravermelha de banda estreita. Os resultados foram comparados com a oxidação do óleo determinada por FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) e uma boa correlação foi observada.

Comercialmente, existem diversos sensores ópticos disponíveis para sistemas hidráulicos, como os da HYDAC (2022) que podem ser instalados de maneira permanente nos equipamentos e medem o número e o tamanho das partículas em tempo real.

Conclusão

Neste trabalho foi realizada uma discussão sobre a importância do monitoramento de óleos lubrificantes em sistemas hidráulicos e uma revisão sobre os principais métodos de análise. De acordo com a busca realizada existe um esforço crescente de pesquisadores para aprimorar os métodos de monitoramento online, tornando a análise de óleo lubrificante uma ferramenta cada vez mais acessível da manutenção preditiva. Para o monitoramento de contaminantes, sensores baseados na medida da constante dielétrica, absorção de radiação infravermelha e impedância auxiliam na detecção de quase todos os defeitos comumente observados, como presença de água, partículas sólidas e gases. Um destaque deve ser dado aos sensores integrados, que mesclam sensores capacitivos e indutivos, por exemplo, uma vez que, normalmente, esses tipos de sensores são capazes de detectar uma maior quantidade de contaminantes, bem como possuem uma maior precisão.

Referências

“Hydraulic cylinder market,” Acessado em janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrauliccylinders-market-252743122.html>

“Minimizing the risk of hydraulic cylinder contamination,” Aggressive Hydraulics, 2020. Acessado em janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.aggressivehydraulics.com/minimizing-the-risk-of-hydraulic-system-contamination/>

A. A. Carey and A. J. Hayzen, “The dielectric constant and oil analysis,” *Pract. Oil Anal. Mag.*, vol. 9, pp. 1–5, 2001.

A. Agoston, C. Ötsch, J. Zhuravleva, and B. Jakoby, “An IR-absorption sensor system for the determination of engine oil deterioration,” in *Proc. IEEE SENSORS*, 2004, pp. 463–466.

A. Villar, A. Gorritxategi, E. Alarcón, and J. Arnaiz, “Low cost on-line sensors for condition monitoring of lubricating oil,” *Maintworld*, 2012.



B. C. Sharma and O. P. Gandhi, “Performance evaluation and analysis of lubricating oil using parameter profile approach,” *Ind. Lubrication Tribol.*, vol. 60, pp. 131–137, 2008, doi: 10.1108/00368790810871057.

B. Casey, “Defining and maintaining fluid cleanliness for maximum hydraulic component life,” 2011. Acessado em janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: http://total-productive-maintenance.com/articles/hydraulic_fluid_cleanliness.pdf

Brown M. *Applying the predictive approach*. New Standard Institute; 2003.

C. V. Ossia, K. Hosung, and L. V. Markova, “Utilization of color change in the condition monitoring of synthetic hydraulic oils,” *Ind. Lubrication Tribol.*, vol. 62, pp. 349–355, 2010, doi: 10.1108/00368791011076245.

F. Ng, J. A. Harding, and J. Glass, “Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 83, pp. 176–193, 2017, doi: 10.1016/j.ymsp.2016.06.006.

Fioravanti, A., Marani, P., Massarotti, G. P., Lettieri, S., Morandi, S., & Carotta, M. C. (2021). (Ti, Sn) Solid solution-based gas sensors for new monitoring of hydraulic oil degradation. *Materials*, 14(3), 605.

Frith RH, Scott W (1993) Control of solids contamination in hydraulic systems—an overview. *Wear* 165(1):69–74. doi:10.1016/0043-1648(93)90374-U

Gomes, M. R.; Andrade, M.; Ferraz, F. *Apostila de Hidráulica*. Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia Unidade de ensino de Santo Amaro, 2008.

Hamilton A, Cleary A, Quail F. Development of a novel wear detection system for wind turbine gearboxes. *IEEE Sens J* 2014;14:465–73.

HYDAC, “Oil condition sensors,” Acessado em janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.hydac.com/de-en/products/sensors/oilcondition-sensors.html>

Islam, T., Yousuf, M., & Nauman, M. (2020). A highly precise cross-capacitive sensor for metal debris

detection in insulating oil. *Review of Scientific Instruments*, 91(2), 025005.

Ji H, Nie SL, Sun HM, Cheng Y, Li YP (2013) Effects of key structural parameters on solid-liquid separation behavior of hydrocyclone separator applied to hydraulic oil purification. *P I Mech Eng E-J Pro* 227(4):273 – 286. doi: 10.1177/ 0954408912464931

Khan, K., Sohaib, M., Rashid, A., Ali, S., Akbar, H., Basit, A., & Ahmad, T. (2021). Recent trends and challenges in predictive maintenance of aircraft's engine and hydraulic system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(8), 1-17.

LINSINGEN, I. *Fundamentos de Sistemas Hidráulicos*. 4. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2013.

Lopes, P. M. L. *Manutenção Preditiva em Sistemas Hidráulicos - Sistemas online de monitoramento e controle*, Brazilian Technology Symposium, v. 1, 2016.

M. Mauntz, U. Kuipers, and J. Gegner, “New electric online oil condition monitoring sensor—An innovation in early failure detection of industrial gears,” in *Proc. Int. Multi- Conf. Eng. Technol. Innov.*, 2011, pp. 238–242.

Ma J, Su H, Zhao W-l, Liu B (2018) Predicting the remaining useful life of an aircraft engine using a stacked sparse autoencoder with multilayer self-learning. *Complexity* 2018

Mobley RK. *An introduction to predictive maintenance*. USA: ButterworthHeinemann – Elsevier; 2002. ISBN 0-7506-7531-4

Parker, “Oil condition sensor,” Acessado em janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: [https://www.parker.com/literature/ Hydraulic Filter Division Europe/Websphere Literature/OIL_ CONDITION_ SENSOR.pdf](https://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Filter%20Division%20Europe/Websphere%20Literature/OIL_CONDITION_SENSOR.pdf)

Poley,J., 2012, “The metamorphosis of oil analysis”, *Machinery Failure Prevention Technology (MFPT) Conference, Condition Based Maintenance Section 1, Conference Proceedings*, Dayton, Ohio, April 24 – 26, 2012.

S. Barber and P. Golbeck, “Wind turbine maintenance & condition monitoring,” *World Wind Energy Assoc.*, Bonn, Germany, 2006.

S. Kumar, P. S. Mukherjee, and N. M. Mishra, “Online condition monitoring of engine oil,” *Ind. Lubrication Tribol.*, vol. 57, pp. 260–267, 2005, doi: 10.1108/00368790510622362.

S. Moon, K. K. Paek, Y. H. Lee, J. K. Kim, S. W. Kim and B. K. Ju, 2006, —Multiwall carbon nanotube sensor for monitoring engine oil degradation, *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 9, No. 8, pp. H78 - H80.

Shanbhag, V. V., Meyer, T. J., Caspers, L. W., & Schlanbusch, R. (2021). Failure Monitoring and Predictive Maintenance of Hydraulic Cylinder-State-of-the-Art Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.

Shi, H., Zhang, H., Ma, L., Rogers, F., Zhao, X., & Zeng, L. (2020). An impedance debris sensor based on a high-gradient magnetic field for high sensitivity and high throughput. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(6), 5376-5384.

Shi, H., Zhang, H., Wang, W., Zeng, L., Sun, G., & Chen, H. (2019). c. *IEEE Sensors Journal*, 19(23), 11583-11590.

Smith DS (1985) Contamination control in hydraulic systems. *Tribol Int* 18(1):55–56. doi:10.1108/eb053058

STEWART, H. L. *Pneumática & Hidráulica*. 3. ed. Curitiba: Hemus, 1994.

T. Xi, S. Kehne, T. Fujita, A. Epple, and C. Brecher, “Condition monitoring of ball-screw drives based on frequency shift,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pp. 1211–1219, Jun. 2020.

Turner, J. D., & Austin, L. (2003). Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil. *Measurement science and technology*, 14(10), 1794.

Z. Tian, “An artificial neural network method for remaining useful life prediction of equipment subject to condition monitoring,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, no. 2, pp. 227–237, 2012.

Zebing, M.; Zhao, J.; Xuan, W.; Wang, W.; Luo, J.; Xie, J. Distilling determination of water content in

hydraulic oil with a ZnO/glass surface acoustic wave device. *Microsyst. Technol.* 2017, 23, 1841–1845.

Zhang, H., Shi, H., Li, W., Ma, L., Zhao, X., Xu, Z., ... & Zhang, Y. (2021). A Novel Impedance Micro-Sensor for Metal Debris Monitoring of Hydraulic Oil. *Micromachines*, 12(2), 150.

Zhang, R. C., Yu, X., Hu, Y. L., Zang, H. J., & Shu, W. (2018). Active control of hydraulic oil contamination to extend the service life of aviation hydraulic system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5), 1693-1704.

Zhu, J., Yoon, J. M., He, D., Qu, Y., & Bechhoefer, E. (2013). Lubrication oil condition monitoring and remaining useful life prediction with particle filtering. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 4, 124-138.