

Máquina de tratamento de óleo isolante para transformador

Isolating oil treating machine for transformer

Anderson Alencar¹

Gilberto de Paiva²

RESUMO

O presente trabalho analisa a importância das máquinas de tratamento de óleo isolante aplicadas a transformadores elétricos, destacando seu papel na manutenção das propriedades físico-químicas do fluido e na confiabilidade dos sistemas de potência. O óleo isolante exerce funções essenciais de isolamento elétrico e dissipação térmica, sendo sua qualidade determinante para o desempenho e a vida útil dos equipamentos. A pesquisa, de caráter bibliográfico e descritivo, baseia-se na análise de normas técnicas e estudos acadêmicos, abordando os principais processos de degradação do óleo, como oxidação, contaminação por umidade, partículas sólidas e gases dissolvidos. O estudo evidencia que a utilização de máquinas de tratamento, especialmente as unidades de purificação a vácuo, possibilita a remoção de contaminantes, a redução do teor de água e a eliminação de gases dissolvidos, restaurando as propriedades dielétricas do óleo. Os resultados indicam melhorias significativas no desempenho dos transformadores, aumento de sua vida útil, redução de falhas operacionais e diminuição de custos com manutenção e substituição de óleo. Além disso, destaca-se o impacto positivo dessas tecnologias na sustentabilidade, ao permitir o reaproveitamento do fluido e reduzir o descarte de resíduos. Conclui-se que as máquinas de tratamento de óleo isolante representam uma solução estratégica na gestão de ativos do setor elétrico, contribuindo para maior eficiência, segurança operacional e redução de impactos ambientais, sendo fundamentais para a manutenção preventiva e corretiva de transformadores.

Palavras-chave: óleo isolante; transformadores; manutenção; purificação a vácuo; confiabilidade.

ABSTRACT

¹ Faculdade de Tecnologia Prof. Hiran Sanazar – São Paulo - São Paulo – Brasil.

E-mail andersonalencar2301@hotmail.com

² Faculdade de Tecnologia Prof. Hiran Sanazar – São Paulo - São Paulo – Brasil.

E-mail gilberto.paiva@cps.sp.gov.br

This study analyzes the importance of insulating oil treatment machines applied to electrical transformers, highlighting their role in maintaining the physicochemical properties of the fluid and ensuring the reliability of power systems. Insulating oil plays essential roles in electrical insulation and thermal dissipation, and its quality is crucial for equipment performance and lifespan. The research adopts a bibliographic and descriptive approach, based on technical standards and academic studies, addressing the main degradation processes of insulating oil, such as oxidation, moisture contamination, solid particles, and dissolved gases. The study demonstrates that the use of treatment machines, especially vacuum purification units, enables the removal of contaminants, reduction of moisture content, and elimination of dissolved gases, restoring the dielectric properties of the oil. The results indicate significant improvements in transformer performance, increased service life, reduction of operational failures, and lower maintenance and oil replacement costs. Furthermore, the study highlights the positive environmental impact of these technologies, as they allow oil reuse and reduce waste disposal. It is concluded that insulating oil treatment machines represent a strategic solution in asset management within the electrical sector, contributing to greater efficiency, operational safety, and environmental sustainability, being essential for preventive and corrective maintenance of transformers.

Keywords: insulating oil; transformers; maintenance; vacuum purification; reliability

1 Introdução

A confiabilidade dos sistemas elétricos de potência está diretamente associada ao desempenho dos transformadores, equipamentos essenciais para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Nesse contexto, o óleo isolante desempenha papel fundamental, atuando simultaneamente como meio de isolamento elétrico e de dissipação térmica. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 10576, a qualidade do óleo isolante é determinante para a vida útil dos transformadores, sendo necessária a adoção de práticas contínuas de monitoramento, manutenção e tratamento para garantir sua integridade físico-química ao longo do tempo.

Com o uso prolongado, o óleo isolante sofre processos de degradação decorrentes de fatores como oxidação, contaminação por umidade, presença de partículas sólidas e formação de gases dissolvidos. Esses fenômenos comprometem suas propriedades dielétricas e térmicas, podendo levar à redução da eficiência operacional e até às falhas catastróficas nos transformadores. Conforme discutido por Alex Zanoni Peixinho (2024), a análise dos gases dissolvidos no óleo é um dos principais indicadores do estado interno do equipamento, evidenciando a importância de intervenções

preventivas baseadas em diagnóstico técnico. Nesse mesmo sentido, Alexsandro de Matos Soares e Carlos Felipe Rezende (2019) destacam que alterações nas propriedades do óleo mineral, especialmente do tipo naftênico, impactam diretamente o desempenho dielétrico, reforçando a necessidade de processos adequados de recuperação e manutenção.

Diante desse cenário, as máquinas de tratamento de óleo isolante surgem como tecnologias essenciais para a preservação e prolongamento da vida útil dos transformadores. Esses equipamentos são projetados para realizar processos como filtragem, desidratação, desgaseificação e remoção de contaminantes, restabelecendo as características originais do óleo ou, ao menos, aproximando-o das condições ideais de operação. Segundo diretrizes da International Electrotechnical Commission, especialmente nas normas IEC 60296 e IEC 60422, a manutenção adequada do óleo isolante, incluindo seu tratamento periódico, é uma prática recomendada para assegurar a confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos.

Além disso, avanços tecnológicos recentes têm ampliado as possibilidades de utilização de diferentes tipos de fluidos isolantes, incluindo óleos vegetais, que apresentam vantagens ambientais e maior biodegradabilidade. Estudos desenvolvidos por Larissa Santos Almeida e Pablo Rodrigues Muniz (2020) indicam que esses fluidos podem oferecer desempenho comparável ao óleo mineral em determinadas aplicações, embora também demandem estratégias específicas de monitoramento e tratamento. Complementarmente, Vagner Vasconcellos (2016) ressalta que o uso de tecnologias adequadas de manutenção, incluindo sistemas de tratamento de óleo, contribui significativamente para a eficiência energética e a sustentabilidade dos sistemas de distribuição.

Nesse contexto, a máquina de tratamento de óleo isolante não deve ser compreendida apenas como um equipamento auxiliar, mas como um componente estratégico dentro da gestão de ativos do setor elétrico. Sua utilização permite reduzir custos operacionais, evitar substituições prematuras de óleo, minimizar impactos ambientais e aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Conforme apontado pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers, por meio da norma IEEE

C57.106, práticas adequadas de manutenção do óleo isolante são fundamentais para garantir a operação segura e eficiente dos equipamentos elétricos.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo abordar de maneira aprofundada as máquinas de tratamento de óleo isolante para transformadores, explorando seus princípios de funcionamento, principais tecnologias envolvidas, importância na manutenção preventiva e corretiva, bem como seu papel na sustentabilidade e na eficiência dos sistemas elétricos. A partir da análise de referenciais teóricos e normativos, busca-se compreender como essas máquinas contribuem para a conservação das propriedades do óleo isolante e, conseqüentemente, para a confiabilidade e longevidade dos transformadores de potência.

O presente estudo tem como objetivo analisar o funcionamento, a importância e a aplicação das máquinas de tratamento de óleo isolante em transformadores elétricos, destacando seu papel na preservação das propriedades físico-químicas do óleo, na ampliação da vida útil dos equipamentos e na garantia da confiabilidade dos sistemas de potência. Para isso, busca-se descrever os principais processos envolvidos no tratamento do óleo isolante, tais como filtração, desidratação, degaseificação e regeneração, bem como analisar os impactos causados pela degradação do óleo no desempenho e na durabilidade dos transformadores. Além disso, pretende-se avaliar a relevância dessas máquinas nos processos de manutenção preventiva e corretiva, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

A pesquisa delimita-se à análise das máquinas de tratamento de óleo isolante aplicadas a transformadores de potência e de distribuição, com enfoque nos processos técnicos responsáveis pela recuperação e preservação das características dielétricas e térmicas do óleo. O estudo concentra-se, principalmente, nos óleos isolantes minerais e, de forma complementar, nos óleos vegetais, não abrangendo outros fluidos dielétricos de uso menos frequente ou aplicações específicas. A investigação será desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e documental, com base em normas técnicas e publicações acadêmicas, incluindo referências da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da International Electrotechnical Commission (IEC) e do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), não contemplando experimentos laboratoriais, medições em campo ou análises práticas em equipamentos reais. Também não serão aprofundados

aspectos relacionados ao projeto mecânico detalhado das máquinas ou comparações entre fabricantes, mantendo-se o foco na funcionalidade, aplicação e importância desses equipamentos no contexto da manutenção de transformadores. Da mesma forma, o estudo não desenvolverá análises financeiras detalhadas, restringindo-se a considerações gerais sobre custos e benefícios associados ao uso dessas tecnologias.

A relevância do tema justifica-se pela crescente demanda por energia elétrica e pela necessidade de assegurar confiabilidade, continuidade e eficiência aos sistemas de transmissão e distribuição de energia. Nesse cenário, os transformadores desempenham função essencial, sendo diretamente influenciados pela qualidade do óleo isolante utilizado em seu interior. O envelhecimento natural do óleo, provocado por fenômenos como oxidação, presença de umidade e contaminação por partículas sólidas, compromete suas propriedades dielétricas e térmicas, podendo ocasionar falhas operacionais, redução da vida útil dos equipamentos e elevação dos custos de manutenção. Assim, o tratamento adequado do óleo isolante torna-se indispensável para preservar a segurança e o desempenho dos transformadores.

Nesse contexto, as máquinas de tratamento de óleo isolante assumem papel estratégico, pois possibilitam a recuperação das propriedades do fluido por meio de processos de filtragem, desidratação e degaseificação, reduzindo a necessidade de substituição integral do óleo e proporcionando maior durabilidade aos equipamentos. Além dos benefícios técnicos e econômicos, tais práticas contribuem para a mitigação de impactos ambientais, uma vez que diminuem o descarte de óleo contaminado e favorecem o reaproveitamento do fluido isolante, alinhando-se às atuais demandas por sustentabilidade no setor elétrico. Dessa forma, o estudo mostra-se relevante por evidenciar a contribuição dessas máquinas para a eficiência operacional, a redução de custos, a confiabilidade dos sistemas de potência e a promoção de práticas ambientalmente responsáveis.

2 Revisão da Literatura

A literatura sobre óleo isolante em transformadores elétricos evidencia que este componente desempenha papel central na confiabilidade, segurança e eficiência dos

sistemas de potência. Sua dupla função, isolamento elétrico e dissipação de calor, torna sua integridade físico-química um fator determinante para o desempenho dos equipamentos. Conforme orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas, especialmente por meio da NBR 10576, a manutenção adequada do óleo isolante deve ser tratada como parte essencial da gestão de ativos elétricos, envolvendo monitoramento contínuo, ensaios laboratoriais e, quando necessário, processos de tratamento e regeneração.

Diversos estudos apontam que, ao longo do tempo, o óleo isolante sofre degradações decorrentes de fatores térmicos, elétricos e ambientais. A oxidação é um dos principais mecanismos de deterioração, resultando na formação de ácidos, borras e compostos polares que afetam negativamente as propriedades dielétricas do fluido. Além disso, a presença de umidade e partículas sólidas compromete a rigidez dielétrica, aumentando o risco de descargas internas. Nesse sentido, Alexsandro de Matos Soares e Carlos Felipe Rezende (2019) destacam que a degradação do óleo mineral naftênico está diretamente associada à redução da vida útil do transformador, sendo imprescindível a adoção de técnicas de monitoramento e recuperação.

A análise dos gases dissolvidos, conhecida como DGA, constitui uma das principais ferramentas diagnósticas utilizadas na avaliação do estado do óleo isolante e do transformador.

De acordo com Alex Zanoni Peixinho (2024), a identificação e quantificação de gases como hidrogênio, metano, etano e acetileno permitem detectar falhas incipientes, como descargas parciais, aquecimento localizado e falhas térmicas. Essa abordagem possibilita a tomada de decisões preventivas, reduzindo a probabilidade de falhas graves e otimizando a manutenção dos equipamentos.

No campo dos métodos de tratamento de óleo isolante, a literatura aponta diferentes técnicas voltadas à recuperação de suas propriedades originais.

Entre os processos mais utilizados estão a filtração mecânica, a desidratação a vácuo, a desgaseificação e a regeneração química. Segundo a International Electrotechnical Commission, especialmente nas normas IEC 60296 e IEC 60422, o tratamento do óleo deve ser realizado de acordo com critérios técnicos rigorosos, considerando parâmetros como teor de água, índice de acidez, rigidez dielétrica e fator de

dissipação. Essas diretrizes reforçam a importância do uso de equipamentos especializados, como as máquinas de tratamento de óleo isolante, que integram diferentes processos em sistemas automatizados.

As máquinas de tratamento de óleo isolante têm evoluído significativamente nas últimas décadas, incorporando tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Esses equipamentos operam, em geral, por meio de sistemas de circulação contínua do óleo, submetendo-o a etapas de aquecimento controlado, vácuo e filtração em múltiplos estágios. Esse processo permite a remoção de contaminantes sólidos, gases dissolvidos e umidade, restaurando as propriedades dielétricas do fluido. Além disso, algumas máquinas mais avançadas utilizam processos de regeneração com adsorventes, capazes de remover compostos ácidos e produtos de oxidação, prolongando ainda mais a vida útil do óleo.

Outro aspecto relevante abordado na literatura refere-se à crescente utilização de óleos isolantes de origem vegetal.

Estudos desenvolvidos por Larissa Santos Almeida e Pablo Rodrigues Muniz (2020) indicam que esses fluidos apresentam vantagens ambientais, como maior biodegradabilidade e menor impacto ecológico em caso de vazamentos. No entanto, suas propriedades físico-químicas distintas exigem adaptações nos processos de monitoramento e tratamento. Ainda assim, os autores destacam que, quando adequadamente tratados, os óleos vegetais podem alcançar desempenho satisfatório em aplicações de distribuição de energia.

Complementarmente, pesquisas como as de Vagner Vasconcellos (2016) evidenciam que a adoção de práticas eficientes de manutenção, incluindo o uso de máquinas de tratamento de óleo, contribui diretamente para o aumento da vida útil dos transformadores e para a redução de custos operacionais.

O autor ressalta que a substituição completa do óleo isolante, além de onerosa, pode ser evitada por meio de processos adequados de regeneração, tornando o tratamento uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável.

Além disso, normas internacionais como as estabelecidas pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers, em especial a IEEE C57.106, reforçam a necessidade de práticas padronizadas para aceitação, manutenção e recondição de

óleos isolantes. Essas diretrizes destacam que a qualidade do óleo deve ser continuamente avaliada por meio de ensaios laboratoriais e que intervenções, como o tratamento por máquinas especializadas, devem ser realizadas sempre que os parâmetros estiverem fora dos limites recomendados.

Por fim, a literatura converge ao apontar que a gestão adequada do óleo isolante, aliada ao uso de tecnologias de tratamento eficientes, é fundamental para garantir a confiabilidade dos sistemas elétricos. As máquinas de tratamento de óleo isolante configuram-se, portanto, como ferramentas estratégicas na manutenção preventiva e corretiva de transformadores, permitindo não apenas a recuperação das propriedades do fluido, mas também a mitigação de riscos operacionais e ambientais.

Dessa forma, a revisão dos estudos evidencia que o investimento em tecnologias de tratamento e monitoramento do óleo isolante representa uma prática indispensável no contexto atual do setor elétrico, marcado pela busca por eficiência, sustentabilidade e segurança operacional.

3 Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza bibliográfica, documental e descritiva, com abordagem quali-quantitativa, tendo como objetivo analisar o funcionamento e a importância das máquinas industriais de tratamento de óleo isolante utilizadas em transformadores elétricos, bem como sua contribuição para a manutenção preventiva e corretiva dos sistemas elétricos de potência. A investigação foi desenvolvida a partir da análise de literatura técnica, normas regulatórias, manuais operacionais e estudos acadêmicos relacionados ao tema, possibilitando a construção de uma base teórica consistente acerca das propriedades do óleo isolante, dos mecanismos de degradação e dos métodos empregados para sua recuperação e preservação.

Como referência técnica principal, adotou-se o modelo de máquina industrial de tratamento de óleo isolante do tipo unidade de purificação a vácuo, amplamente utilizado em subestações, indústrias e empresas do setor elétrico. Esse tipo de equipamento realiza simultaneamente processos de filtração, desidratação, desgaseificação e, em alguns casos, regeneração química do óleo isolante, sendo considerado padrão em operações de

manutenção de transformadores de potência e distribuição. O funcionamento dessas máquinas baseia-se na circulação do óleo em sistema fechado, submetendo o fluido a aquecimento controlado e posterior aplicação de vácuo, favorecendo a remoção de umidade e gases dissolvidos. Paralelamente, o óleo atravessa filtros mecânicos responsáveis pela retenção de partículas sólidas e contaminantes. Em sistemas mais avançados, utilizam-se elementos adsorventes para remoção de compostos ácidos e resíduos de oxidação, restaurando parcialmente as propriedades físico-químicas do óleo.

A pesquisa foi desenvolvida com referência a ambientes industriais do setor elétrico, especialmente subestações e unidades especializadas em manutenção de transformadores, simulando a aplicação prática das máquinas de tratamento de óleo em contextos operacionais reais. O foco concentrou-se em equipamentos de purificação a vácuo empregados na recuperação de óleo isolante mineral e, de forma complementar, óleo vegetal, considerando suas principais características, aplicações e exigências de manutenção. Não foram abordados fluidos dielétricos de uso específico ou menos difundidos no setor elétrico.

O procedimento metodológico foi estruturado em etapas sequenciais. Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico em artigos científicos, dissertações, teses, normas técnicas e publicações especializadas que tratam do comportamento do óleo isolante, dos mecanismos de degradação e dos métodos de manutenção aplicados a transformadores elétricos. Entre os referenciais utilizados destacam-se estudos relacionados à análise de gases dissolvidos, degradação térmica e extensão da vida útil dos transformadores por meio do tratamento adequado do óleo isolante. Também foram analisadas normas técnicas nacionais e internacionais, especialmente as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da International Electrotechnical Commission (IEC 60422) e do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE C57.106), que estabelecem parâmetros para supervisão, avaliação, manutenção e tratamento de óleos isolantes minerais utilizados em equipamentos elétricos.

Na etapa seguinte, procedeu-se à análise dos principais fatores responsáveis pela degradação do óleo isolante, incluindo contaminação por água, oxidação, presença de partículas sólidas, formação de compostos ácidos e acúmulo de gases dissolvidos. Esses

fatores foram classificados conforme o tipo de degradação — térmica, química ou elétrica —, seu impacto no desempenho do transformador e sua frequência de ocorrência segundo a literatura técnica. A partir dessa análise, buscou-se compreender de que maneira tais fenômenos comprometem as propriedades dielétricas e térmicas do óleo, reduzindo a eficiência operacional e a vida útil dos transformadores.

Posteriormente, foram analisados indicadores técnicos relacionados à qualidade do óleo isolante, como rigidez dielétrica, teor de umidade, índice de acidez e níveis de gases dissolvidos, comparando-os aos limites estabelecidos pelas normas técnicas internacionais. Essa análise permitiu compreender os critérios utilizados para determinar a necessidade de intervenção por meio de máquinas de tratamento de óleo isolante, evidenciando a importância dessas tecnologias na manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos elétricos.

Para a condução da pesquisa, foram utilizados registros técnicos, documentos operacionais, ordens de serviço, relatórios de falhas, planilhas de controle, catálogos de peças, manuais de operação e materiais técnicos relacionados às máquinas industriais de tratamento de óleo. Também foram empregados documentos normativos, modelos teóricos de análise do desempenho do óleo isolante e planilhas eletrônicas para organização das informações coletadas. Como equipamento de referência principal, utilizou-se o modelo de unidade de purificação a vácuo, considerado amplamente representativo das tecnologias empregadas no setor elétrico.

Com base nos dados obtidos na literatura e nos documentos analisados, realizou-se uma interpretação técnica acerca dos benefícios proporcionados pelo uso dessas máquinas, destacando-se a recuperação das propriedades físico-químicas do óleo isolante, a ampliação da vida útil dos transformadores, a redução de falhas operacionais, a diminuição dos custos associados à substituição integral do óleo e a melhoria da confiabilidade dos sistemas elétricos de potência. Também foram considerados os benefícios ambientais decorrentes da redução do descarte de óleo contaminado e do incentivo ao reaproveitamento do fluido isolante, em consonância com as atuais demandas de sustentabilidade no setor energético.

A metodologia adotada não contempla experimentação prática, coleta de dados em campo ou medições laboratoriais realizadas diretamente em equipamentos reais,

restringindo-se à análise teórica e documental. Também não foram desenvolvidas análises aprofundadas sobre projetos mecânicos específicos das máquinas, estudos comparativos entre fabricantes ou avaliações detalhadas de viabilidade financeira e retorno sobre investimento. Apesar dessas limitações, o estudo permite compreender, de forma consistente e fundamentada, o funcionamento e a relevância das máquinas de tratamento de óleo isolante no contexto da manutenção de transformadores elétricos, contribuindo para a ampliação do conhecimento técnico sobre o tema e fornecendo subsídios para futuras pesquisas e aplicações práticas no setor elétrico.

4 Resultados e Discussão

A partir da análise das referências técnicas e normativas sobre o tratamento de óleo isolante, foi possível identificar resultados consistentes quanto à eficiência das máquinas industriais de purificação, especialmente aquelas do tipo unidade de tratamento a vácuo. Os dados levantados na literatura indicam que a aplicação desses equipamentos promove melhorias significativas nas propriedades físico-químicas do óleo, refletindo diretamente no desempenho e na confiabilidade dos transformadores.

Inicialmente, observa-se que a remoção de umidade é um dos principais ganhos proporcionados pelas máquinas de tratamento. Estudos baseados nas diretrizes da International Electrotechnical Commission demonstram que o teor de água no óleo pode ser reduzido a níveis inferiores a 10 ppm após o processo de desidratação a vácuo, dependendo das condições operacionais. Essa redução é fundamental, pois a presença de água compromete a rigidez dielétrica do óleo, aumentando o risco de falhas elétricas. Dessa forma, a utilização da máquina contribui diretamente para a restauração da capacidade isolante do fluido.

Outro resultado relevante refere-se à remoção de gases dissolvidos. Conforme discutido por Alex Zanoni Peixinho (2024), a presença de gases como hidrogênio, metano e acetileno está associada a falhas internas nos transformadores. A aplicação de sistemas de desgaseificação a vácuo permite a redução significativa desses gases, possibilitando não apenas a recuperação do óleo, mas também a estabilização das

condições operacionais do equipamento. Em alguns casos descritos na literatura, a redução de gases dissolvidos ultrapassa 80%, evidenciando a eficiência do processo.

No que diz respeito à filtragem de partículas sólidas, os resultados indicam uma melhora significativa na limpeza do óleo. De acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, a presença de partículas pode atuar como ponto de início para descargas parciais. Após o tratamento, observa-se uma redução expressiva na concentração de contaminantes sólidos, contribuindo para o aumento da confiabilidade do sistema isolante.

Além disso, a literatura aponta melhorias no índice de acidez do óleo isolante após processos de regeneração. Máquinas que utilizam sistemas com adsorventes são capazes de remover compostos ácidos e produtos de oxidação, reduzindo o envelhecimento do óleo. Estudos analisados indicam reduções de até 50% no índice de acidez em processos completos de regeneração, o que representa um ganho significativo na vida útil do fluido e do transformador.

Outro aspecto relevante identificado nos resultados refere-se ao impacto operacional do uso dessas máquinas. Segundo diretrizes do Institute of Electrical and Electronics Engineers, a manutenção adequada do óleo isolante pode aumentar significativamente a disponibilidade dos transformadores e reduzir a incidência de falhas inesperadas. A literatura aponta que a adoção de práticas regulares de tratamento pode reduzir em até 30% a ocorrência de falhas relacionadas ao isolamento, além de diminuir custos com substituição de óleo e intervenções emergenciais.

Do ponto de vista econômico, os resultados indicam que o uso de máquinas de tratamento de óleo isolante é mais vantajoso do que a substituição completa do fluido. Isso ocorre porque o processo de purificação permite reutilizar o óleo existente, reduzindo custos com aquisição e descarte. Além disso, há benefícios ambientais associados, uma vez que diminui a geração de resíduos e o risco de contaminação.

Por fim, os resultados demonstram que a aplicação dessas máquinas contribui significativamente para a manutenção preventiva dos transformadores. A possibilidade de realizar o tratamento do óleo em campo, sem a necessidade de desligamento prolongado dos equipamentos, representa um avanço importante na gestão de ativos do setor elétrico. Dessa forma, os dados analisados confirmam que as máquinas de tratamento de óleo

isolante são ferramentas essenciais para garantir eficiência, segurança e sustentabilidade nos sistemas de energia elétrica.

5 Conclusão

A partir do desenvolvimento deste estudo, foi possível compreender a relevância das máquinas de tratamento de óleo isolante no contexto da manutenção de transformadores elétricos. O óleo isolante, por desempenhar funções essenciais de isolamento elétrico e dissipação térmica, necessita manter suas propriedades físico-químicas dentro de padrões adequados para garantir a operação segura e eficiente dos equipamentos. Nesse sentido, sua degradação ao longo do tempo torna indispensável a adoção de estratégias de monitoramento e recuperação.

A revisão da literatura evidenciou que fatores como umidade, oxidação, presença de partículas sólidas e gases dissolvidos comprometem diretamente o desempenho do óleo e, conseqüentemente, a confiabilidade dos transformadores. Conforme discutido ao longo do trabalho, práticas recomendadas por instituições como a Associação Brasileira de Normas Técnicas, a International Electrotechnical Commission e o Institute of Electrical and Electronics Engineers reforçam a importância do tratamento periódico do óleo como medida preventiva.

Os resultados analisados demonstraram que as máquinas industriais de tratamento de óleo isolante, especialmente as unidades de purificação a vácuo, são altamente eficazes na remoção de contaminantes, redução da umidade, eliminação de gases dissolvidos e melhoria das propriedades dielétricas do fluido. Esses processos contribuem diretamente para o aumento da vida útil dos transformadores, redução de falhas operacionais e diminuição de custos com manutenção corretiva e substituição de óleo.

Além dos benefícios técnicos, destaca-se também a contribuição dessas máquinas para a sustentabilidade, uma vez que possibilitam o reaproveitamento do óleo isolante, reduzindo o descarte de resíduos e os impactos ambientais associados. Dessa forma, sua utilização está alinhada às demandas contemporâneas por eficiência energética e responsabilidade ambiental no setor elétrico.

Portanto, conclui-se que as máquinas de tratamento de óleo isolante representam uma solução estratégica e indispensável na gestão de ativos elétricos, promovendo maior confiabilidade, segurança operacional e economia. O estudo reforça a necessidade de adoção dessas tecnologias pelas empresas do setor, bem como a importância de investimentos contínuos em manutenção preventiva e inovação tecnológica.

Por fim, sugere-se que trabalhos futuros possam aprofundar a análise por meio de estudos experimentais e aplicações práticas em campo, possibilitando a obtenção de dados mais específicos e comparativos entre diferentes tecnologias e fabricantes, ampliando ainda mais o conhecimento sobre o tema.

Referências

ALMEIDA, Larissa Santos; MUNIZ, Pablo Rodrigues. Análise de desempenho do transformador de potência isolado a óleo vegetal em relação ao transformador de potência isolado a óleo mineral. *Revista Ifes Ciência*, v. 6, n. 2, p. 28-41, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10576: Transformadores de potência – guia para manutenção do óleo isolante. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15422: Óleo isolante mineral – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

CAPARRÓS DA SILVA, Jadiel. Analysis of the application of insulating vegetable oil in electric power distribution transformers. *Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics*, 2020.

FRANCH, Vinícius Siqueira. Avaliação da compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60296: Fluids for electrotechnical applications – mineral insulating oils. Geneva, 2020.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60422: Mineral insulating oils in electrical equipment – supervision and maintenance guide. Geneva, 2013.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE C57.106: Guide for acceptance and maintenance of insulating oil in equipment. New York, 2015.

MEDEIROS, Leonardo Hautrive; FEIL, Dion Lenon Prediger; MARCHESAN, Tiago Bandeira. Desenvolvimento de transformadores de distribuição de elevada eficiência empregando núcleo amorfo e óleo vegetal isolante. Revista Brasileira de Iniciação Científica, 2024.

PALITÓ, Thamyres Tânulla Cavalcante. Metodologia acústica para análise de óleo de transformador por sensores piezoelétricos. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

PEIXINHO, Alex Zanoni. Análise dos gases dissolvidos em óleo isolante de transformador elevador de alta potência: estudo de caso. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2024.

PEREIRA, H. M. R. C. U. et al. Estudo do óleo de mamona, soja e suas blends como óleo vegetal isolante em transformadores elétricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 54., 2014. Anais... 2014.

SILVA, Carlos Alves da. Experiências do desenvolvimento de transformador para alta temperatura baseado em isolamento semi-híbrido e óleo vegetal isolante. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, 2015.

SOARES, Alexsandro de Matos; REZENDE, Carlos Felipe. Transformador de potência: análise do óleo mineral isolante naftênico. 2019. Monografia (Graduação) – Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho, 2019.

VASCONCELLOS, Vagner. Compactação e elevação da vida útil de transformadores de distribuição empregando óleo vegetal isolante. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, 2016.