Apoio:
CLAMPER®
D'LIGHT Distribuidora de Materiais Elétricos
NOVEMP PAINÉIS ELÉTRICOS E BARRAMENTOS BLINDADOS

*Por Rafael Morgado**

Capítulo XII

Óleos isolantes – Ensaios de perdas dielétricas

Este artigo discute brevemente a importância dos óleos isolantes em aplicações de alta tensão e detalha um dos principais ensaios físico-químicos realizados em sua manutenção, o de perdas dielétricas.

Óleos isolantes e aplicações

Os primeiros transformadores de alta tensão surgiram no final do século XIX, nos Estados Unidos. A tecnologia empregada fazia uso do próprio ar como meio dielétrico, isolando os enrolamentos primário e secundário. A necessidade de refrigeração, redução de custos e diminuição dos espaços entre componentes levou ao surgimento dos projetos de transformadores com isolamento à óleo. O primeiro transformador com a aplicação de óleos isolantes foi construído pela General Electric, em 1892, cerca de apenas uma década após a construção dos primeiros transformadores à seco (ver figura 1).

Os óleos isolantes são materiais que apresentam características dielétricas muito superiores ao ar, com rigidez dielétrica cerca de cinco vezes maior, pelo menos. Tais características permitiram a redução dos espaços vazios nos transformadores e possibilitaram o desenvolvimento de novas tecnologias a custos mais acessíveis, como os equipamentos portáteis de alta tensão. Outras aplicações incluem também elementos, como chaves e comutadores, imersos em óleo. Óleos isolantes são, atualmente, fundamentais para a tecnologia dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

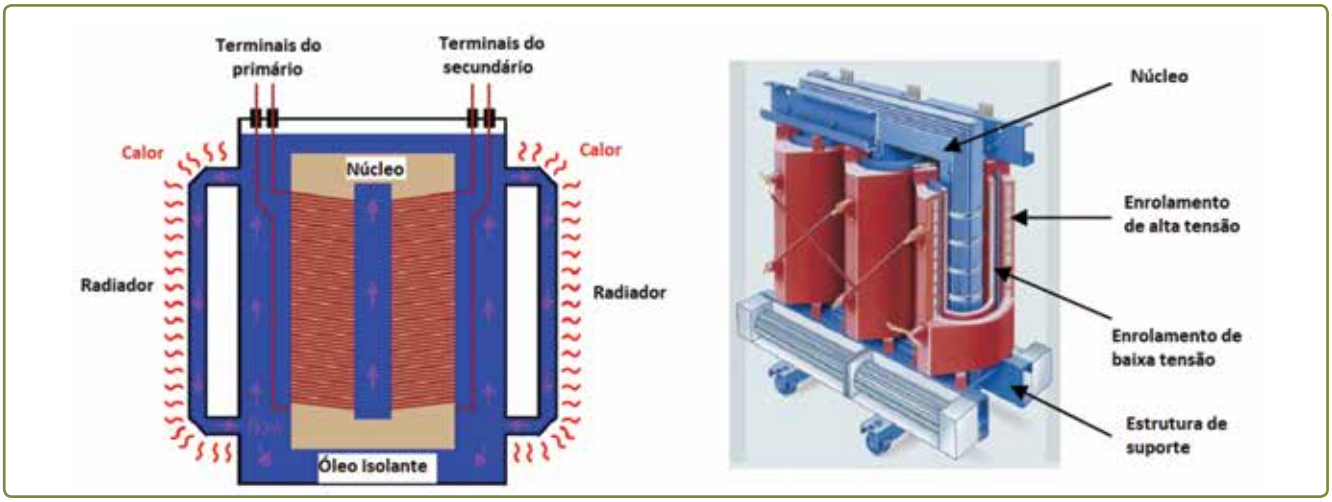

Figura 1 – Exemplos de transformadores à óleo e à seco e suas diferenças construtivas.

Manutenção de óleos isolantes

Embora a utilização dos óleos isolantes apresente uma série de vantagens para os dispositivos de alta tensão, algumas precauções devem ser tomadas. Pelo fato de que não são substituídos continuamente como o ar durante a operação, os óleos estão sujeitos a ação do tempo, sendo necessárias proteções físicas para evitar contaminações, como entrada de umidade do ar, oxigênio, materiais particulados, entre outros. As contaminações podem comprometer as características dielétricas do óleo e podem inviabilizar a sua aplicação, permitindo o arqueamento elétrico ou a atividade de descargas parciais nos transformadores. Quando irregularidades não são identificadas em tempo, acidentes graves podem ocorrer, como explosões, inclusive.

Para evitar que tais eventos trágicos ocorram a manutenção preditiva dos óleos é indicada, determinando as características presentes e prevendo as futuras. A manutenção preditiva consiste na avaliação em laboratório, de amostras retiradas periodicamente do tanque de armazenamento. As amostras são geralmente analisadas conforme normas específicas, tais quais a ABNT NBR 10576 ou ABNT NBR 16518, onde a escolha dos critérios de avaliação depende do tipo de óleo isolante, aplicação, ou objetivo da análise. Os ensaios Físico-Químicos e a Cromatografia de Gases constituem os principais pilares de avaliação, pois seus resultados são diretamente correlacionados às propriedades elétricas do óleo.

Tabela 1 – Principais técnicas utilizadas na manutenção de rotina de óleos isolantes de transformadores, instrumentos e outros elementos.

Ensaio	*Norma de referência*
Cor	NBR 14483
Rigidez Dielétrica	NBR 60156
Fator de Perdas Dielétricas	NBR 12133
Índice de Neutralização	NBR 14248
Tensão Interfacial	NBR 6234
Teor de água	NBR 10710
Ponto de fulgor	NBR 11341
Contagem de partículas	NBR 14275
Cromatografia de gases	NBR 7070 e NBR 7274

Ensaios de perdas dielétricas

Dentre os ensaios e técnicas de rotina o de perdas dielétricas é considerado um dos mais importantes, pois apresenta alta sensibilidade e confiabilidade na avaliação das características dielétricas do óleo. Embora muito frequente no Brasil, ainda são notáveis as dúvidas sobre os seus fundamentos.

Quando um óleo é aplicado dentro de um transformador, este isola duas partes vivas, sob alta tensão, constituindo um sistema capacitivo. O óleo isolante, idealmente, deveria bloquear totalmente a corrente elétrica que o atravessa, mas isso não ocorre. Qualquer

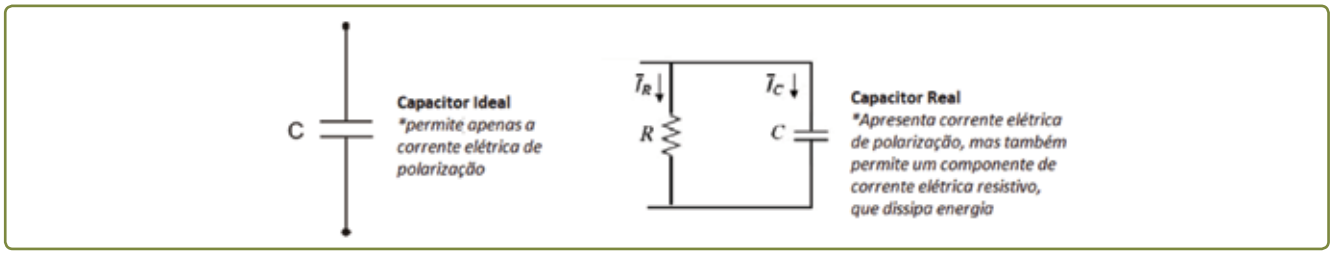

Figura 2 – Capacitor ideal e real. Note que o capacitor real é representado por um capacitor ideal em paralelo com um resistor, pois quando submetido a uma tensão contínua, permite a passagem de uma pequena corrente elétrica.

dielétrico, na prática, sempre permite uma pequena passagem de corrente através de si, de modo que pode ser representado pelo circuito equivalente acima.

Dielétricos de boa qualidade irão apresentar circuitos equivalentes com resistência R muito elevada, tendendo ao infinito. Quanto melhor a qualidade do isolamento, ou seja, do óleo, mais próximo ele se comportará de um capacitor ideal, ou seja, bloqueando totalmente a corrente elétrica que o atravessa. Já os óleos contaminados e com propriedades dielétricas ruins permitirão a passagem de corrente elétrica significativa através do óleo, apresentando uma resistência R menor.

Os óleos com menor resistência (má qualidade) apresentam maiores perdas de energia via efeito Joule, pois quanto maior a corrente elétrica nos resistores maior será a dissipação de energia, principalmente na forma de calor. Por isso os ensaios são denominados de perdas dielétricas ou de dissipação, pois avalia-se a dissipação de energia pelos óleos, correlacionando os resultados a sua qualidade como isolamento elétrico. A avaliação quantitativa nos ensaios é feita pela medição do fator de perdas, também chamado tangente delta, e definido como:

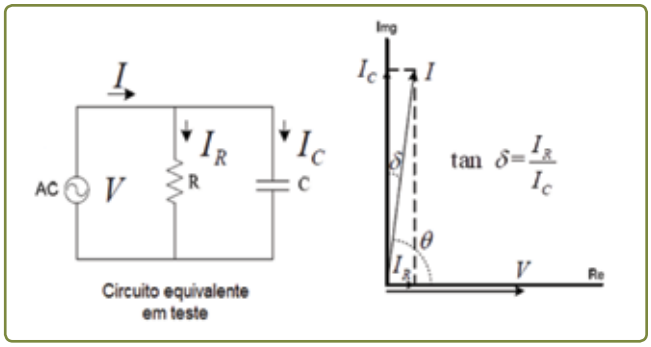

Figura 3 – Definição do fator de perdas (Tangente delta) em acordo com o circuito equivalente de um óleo isolante e com o diagrama fasorial para os componentes da corrente elétrica.

O tangente delta é definido como a razão dos componentes da corrente elétrica, resistivo e capacitivo. Como discutido, para um óleo de boa qualidade, o valor da corrente elétrica I_R, no circuito equivalente, é muito baixa e para um óleo de má qualidade o valor de I_R é significativo. Por meio do diagrama fasorial define-se o ângulo delta, conforme mostrado na figura acima, em relação ao eixo vertical. O tangente delta é, desse modo, exatamente a definição do fator de perdas. Quanto maior o valor do tangente delta, maior é a corrente elétrica que atravessa o resistor e piores são as características dielétricas do material, dissipando mais energia.

Assim, o procedimento de manutenção consiste em avaliar o óleo isolante periodicamente, verificando como seu tangente delta cresce ao longo do tempo, verificando possíveis variações abruptas, decorrentes de contaminações, ou mesmo somente para acompanhar o grau de envelhecimento do óleo. O mesmo tipo de procedimento é indicado na avaliação do isolamento de cabos isolados, com seus respectivos critérios de avaliação.

Equipamentos

A realização de ensaios de perdas dielétricas em óleos isolantes geralmente é realizada utilizando equipamentos baseados em sistemas de ponte de medição, que permitem a aferição direta do fator de perdas em altas tensões, com excelente precisão. Para que

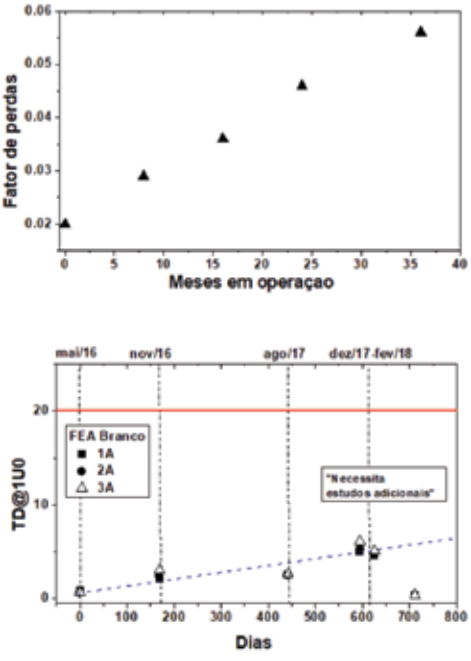

Figura 4 – Exemplos de resultados de manutenção preditiva por tangente delta para óleos isolantes (à esquerda) e cabos isolados com isolamento em EPR (à direita).

Figura 5 – Exemplo de um típico equipamento para medição do tangente delta de óleos isolantes em laboratório.

seja possível uma avaliação confiável e contínua ao longo do tempo indicam-se equipamentos com sensibilidade de pelo menos 1% dos valores medidos, de modo que a resolução dos equipamentos mais modernos está atualmente em 1E-6. Tal requisito é necessário para que óleos, considerados bons, sejam acompanhados ao longo do tempo, permitindo o estudo do seu envelhecimento. Os requisitos normativos também indicam que os ensaios sejam realizados, muitas vezes, em temperaturas acima à do ambiente, entre 90ºC e 100ºC, sendo o sistema de aquecimento fundamental para o tempo de análise e qualidade dos resultados (ver figura 5).

Vale ressaltar que a qualidade dos equipamentos é fundamental, pois resultados falsos ou inexatos podem ter consequências desastrosas, como a aprovação de óleos de má qualidade, levando a condições de risco e a falta de segurança para estruturas e trabalhadores. Por este motivo, a calibração e manutenção periódica dos equipamentos é prática comum e se faz necessária.

**Rafael Morgado é físico pela Universidade de São Paulo (USP), mestre e doutor pelo IPEN-USP, com ampla experiência em propriedades elétricas de materiais e tratamento estatístico de dados. Gerente do Laboratório de Metrologia e Reparos da Baur do Brasil e professor universitário do ciclo básico do curso de Engenharia da Universidade Paulista (UNIP). É autor de diversos artigos internacionais, livros didáticos e um software patenteado para tratamento estatístico de dados.*