

MELHORIA NO ISOLAMENTO TÉRMICO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA O AUMENTO DE SUA CONFIABI- LIDADE

Frank Wilian Santos Luz¹; Leonardo Balieiro dos Santos¹; João Borges da Silveira^{2,5}; Gisele Aparecida de Souza^{3,5}; Mariana Costa Falcão^{4,5*}

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS; ² Doutor em Ciência dos Materiais – FEIS/UNESP; ³ Doutora em Ciência dos Materiais – FEIS/UNESP; ⁴ Mestre em Engenharia Elétrica – UNESP; ⁵ Docente das Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS.

* autor correspondente: profmarianafalcao@gmail.com

RESUMO

A utilização dos transformadores de potência é indispensável para a continuidade de operação do sistema elétrico, sendo um dos componentes mais importante do sistema de distribuição de energia, pelo fato de um alto custo de manutenção, se ter uma boa confiabilidade é primordial para as companhias. Um dos componentes importantes do transformador de potência é o fluido isolante, responsável por seu isolamento elétrico interno e sua refrigeração. Com a crescente preocupação ambiental, viu-se a necessidade de buscar novas alternativas para o sistema de isolamento dos transformadores, uma vez que o óleo mineral isolante é proveniente do petróleo, considerado tóxico, nocivo ao ambiente e de baixa biodegradabilidade. Estudos atuais realizados mostraram que o óleo vegetal isolante é uma alternativa viável para a substituição do óleo mineral isolante, por ser um fluido biodegradável, com ponto de fulgor e combustão elevados, podendo ser considerado como um fluido de maior segurança, além de aumentar o isolamento térmico do transformador e sua expectativa de vida.

PALAVRAS-CHAVE: transformador de potência; isolamento térmico; óleo mineral isolante; óleo vegetal isolante.

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são componentes que adequam as tensões entre várias partes dos circuitos que possuem sistemas com grande capacidade de potência, convertem a corrente alternada (CA) com uma determinada frequência e nível de tensão em energia CA com a mesma frequência, porém em níveis de tensões diferentes, isso possibilita a

transmissão de energia elétrica em médias e grandes distâncias de forma mais econômica (WEG, 2022).

Os transformadores de potência são um dos elementos mais caros e críticos de um sistema de energia, falhas que causam interceptações tem grandes consequências na manutenção e confiabilidade do mesmo. Portanto, a capacidade de medir a necessidade de manutenção ou substituição desses equipa-

mentos na rede elétrica tem importância fundamental na gestão econômica e qualidade de distribuição. Cabe ressaltar que a retirada dos transformadores de serviço muitas vezes está associada a falhas na parte ativa (núcleo e enrolamentos), que envolvem maiores prazos e custos de reparo (PENA, 2003).

O transformador é composto por um núcleo de material ferromagnético, geralmente de aço silício o qual possui uma alta permeabilidade magnética, que é maior que a permeabilidade do ar. Tal material possui momentos de magnetização na ausência de um campo externo, e manifestam magnetizações altas e permanentes. Seus enrolamentos geralmente são fabricados de alumínio ou cobre, e para isolamento das bobinas o mais utilizado é o papel tipo Kraft. Nos transformadores, o componente mais sujeito a desgaste é o sistema papel-óleo isolante (RIES, 2007).

Um dos fatores que mais estimulam a degradação da celulose é a temperatura, quanto maior a temperatura de operação do transformador, mais acelerada é a decomposição do material usado no isolamento. A base da celulose tem o tempo de vida reduzido à metade para cada 8-10 °C de acréscimo da temperatura de operação (RIES, 2007). Conclui-se que a vida útil do equipamento está ligada à vida do isolamento; uma vez perdido o equipamento não realiza sua tarefa básica (STOCCO, 2009).

Todos os componentes e elementos do transformador ficam imersos no seu meio isolante, em transformadores de potência de alta tensão esse meio geralmente é líquido. O mesmo é o responsável pelo isolamento entre as partes e componentes do equipamento com diferentes níveis de tensão e pelo transporte do calor gerado pela parte ativa para o sistema de resfriamento que podem ser utilizados radiadores e trocadores de calor. Além dessas funções principais, o líquido é responsável pela extinção de descargas, atua como meio de amor-

tecimento acústico e fornece meios para avaliar as condições dos equipamentos, tanto durante seu regime normal de operação, como após seu regime de falhas (FOFANA, 2013).

Os principais tipos de fluídos isolantes que são utilizados em transformadores de potência, são os óleos minerais e óleos vegetais ou ésteres naturais, entre outros líquidos isolantes que também são empregados em diferentes tipos de transformadores. Em transformadores de potência de alta tensão o óleo mineral é o líquido mais tradicionalmente utilizado, a sua popularidade se deve ao fato de seu baixo custo e disponibilidade, além de suas qualidades em propriedades dielétricas. Este óleo é obtido a partir da destilação fracionada do petróleo (STOCCO, 2009). Sua classificação é definida conforme os métodos de refino aos quais foi submetido, que podem ser purificação ácido/alcalina, extração seletiva de solventes, desparafinação, purificação por contato com adsorventes e hidrogenação sob pressão (LIPSTEIN; SHAKHNOVICH, 1970).

As propriedades isolantes do óleo mineral isolante (OMI) com o tempo se deterioram e geram subprodutos que aceleram a degradação da celulose que isolam as bobinas e promovem a formação de borras. A ação do calor degrada o OMI por pirólise, gerando também compostos gasosos que variam com a temperatura (STOCCO, 2009).

O OMI sendo de base parafínica ou naftênico ambos são nocivos ao meio ambiente e podem gerar consequências em grandes escalas. Os compostos de hidrocarbonetos podem migrar com infiltração da água da chuva, da superfície para o lençol freático, sendo que um litro de óleo pode contaminar milhões de litros de água, tornando-a imprópria para o consumo, e o custo para tratar seus efeitos é bastante elevado (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014)

O óleo vegetal isolante (OVI) é classificado pela norma ABNT-NBR-

13.231 como alto ponto de combustão classe K e como líquido resistente a fogo, tendo essas propriedades, nos últimos anos, tem crescido o interesse do mercado de energia por conta de seus benefícios. Estes óleos são originalmente obtidos a partir de sementes ou grãos de plantas oleaginosas, onde passam por um processo apropriado de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. Os elementos mais utilizados são o milho, soja, colza e sementes de girassol (MORETTO; FETT, 1998).

Ao final do processo, obtém-se o óleo bruto. Então, este passa pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização para se obter o óleo refinado comercializado (MORETTO; FETT, 1998). O OVI é adaptado por meio de processos específicos e recebe aditivos antioxidantes

além de depressores de ponto de fluidez, para ser utilizado como fluido de refrigeração e isolante em transformador (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

O objetivo deste trabalho é descrever as vantagens da substituição do óleo mineral isolante pelo óleo vegetal isolante em transformadores de potência.

Este trabalho baseou-se em estudos e pesquisas realizadas sobre o uso do óleo vegetal isolante em transformadores de potência, indexados em livros e plataformas especializadas, tal como Google Acadêmico.

2 TIPOS DE FLUIDOS ISOLANTES

Os principais tipos de fluidos isolantes aplicados a transformadores de potência são tratados a seguir. As principais propriedades destes, e de outros líquidos isolantes empregados em diferentes tipos de transformadores, estão listadas no Quadro 1.

Quadro 1. Propriedades de líquidos isolantes de transformadores.

Categoria	Tipo de líquido	Principais características
Óleos minerais	Naftênico, parafínico	<ul style="list-style-type: none"> Boa resistência a oxidação Bom índice de viscosidade Baixo ponto de combustão Baixa tolerância a umidade Possível ataque de enxofre corrosivo
Hidrocarbonetos de alto peso molecular	Parafínico	<ul style="list-style-type: none"> Alto ponto de fulgor
Óleos vegetais ou ésteres naturais	Rícino, soja, algodão, milho, palma, girassol	<ul style="list-style-type: none"> Baixas perdas dielétricas Prontamente biodegradável Baixa estabilidade a oxidação
Hidrocarbonetos halogenados	Ascarel (PCB)	<ul style="list-style-type: none"> Não inflamável Termicamente estável
	Policlorodifenil metano	<ul style="list-style-type: none"> Não inflamável Biodegradável
	Policloretos alcanos	<ul style="list-style-type: none"> Termicamente estável
Óleos siliconados	Polidimetil siloxano, polimetilfenil siloxano	<ul style="list-style-type: none"> Bom índice de viscosidade Alto ponto de fulgor Absorção de gás sob descarga parcial Alta estabilidade a oxidação Baixa biodegradabilidade
Ésteres orgânicos ou sintéticos	Ésteres complexos, tetra-éster de pentaeritritol	<ul style="list-style-type: none"> Alto ponto de fulgor Alta tolerância à umidade Prontamente biodegradável Alta estabilidade a oxidação
Outros líquidos	Nanofluidos	<ul style="list-style-type: none"> Adaptabilidade
	Líquidos misturados	

Fonte: Adaptado de SOARES, 2015.

2.1 Comparações entre transformadores de potência isolados a óleo mineral isolante e óleo vegetal isolante

Análise das diferenças de propriedades físico-químicas do OMI e do OVI foi feita por meio de parâmetros

estabelecidos nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O Quadro 2 mostra os diferentes parâmetros determinados pelas normas técnicas para análise físico-química do OVI e do OMI.

Quadro 2. Ensaio de características físico-químicas de OVI e OMI.

Características	Unidade	OVI	OMI
Ponto de combustão (mínimo)	°C	300	160
Ponto de fulgor (mínimo)	°C	275	140
Densidade a 20/4°C (máximo)	-----	0,96	0,90
Viscosidade (máxima) a 40°C	cSt	50	12
Teor de água (máximo)	Mg/kg	200	35
Índice de neutralização (máximo)	mg KOH/g	0,06	0,03
Rigidez dielétrica (mínima)	Kv/2,5mm	42	42

Densidade do óleo isolante a 20 °C em relação à densidade da água a 4 °C.

Fonte: Extraído de Normas Técnicas ABNT NBR 11341, 7148, 10441, 15422, 14248 e 6869.

De acordo com o Quadro 2, pode-se observar que o OVI possui ponto de combustão mínimo de 300 °C, enquanto o OMI possui ponto de combustão mínimo de 160 °C. Assim, o OMI traz desvantagens no que se refere a poluição do ar, segurança de operação e confiabilidade operacional caso o transformador atinja o ponto de combustão e comece a queimar, pois emitiria substâncias nocivas na atmosfera, podendo causar explosões e conseqüentemente paradas de operação. O OVI, com a maior temperatura de combustão, apresenta uma maior segurança de operação, visto que a intensidade inicial de um desastre catastrófico, contribuindo para que não haja acidentes provocados por incêndios e emissão de gases de queima no meio ambiente (SILVA; COELHO, 2019).

O ponto de fulgor é a característica do óleo isolante que determina a menor temperatura na qual o combustível libera vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável por uma fonte externa de calor (CUNHA OTTONI et al., 2003). Com isso, pode-se dizer que quanto maior o ponto de fulgor, menores serão as chances de o óleo liberar vapor para se tornar uma mistura inflamável.

2.2 Vidas médias de transformadores de potência isolados a óleo mineral isolante e óleo vegetal isolante

O óleo vegetal isolante apresenta maior tolerância e aceitação em água, comparando-o com o óleo mineral, como se pode observar no Quadro 2. Contudo, a água possui maior facilidade de migração da isolação sólida para o líquido isolante vegetal, o que implica na diminuição da umidade, fazendo com que a degradação do papel isolante diminua e assim sua vida útil aumente.

O Quadro 3 mostra estudos realizados pelo fabricante ABB referente a expectativa de vida útil do transformador de potência isolado a óleo mineral e óleo vegetal, considerando diferentes temperaturas de operação. Conclui-se que a expectativa de vida útil do OVI é de aproximadamente duas vezes maior do que a do OMI.

2.3 Diferença da degradação térmica do OVI e do OMI

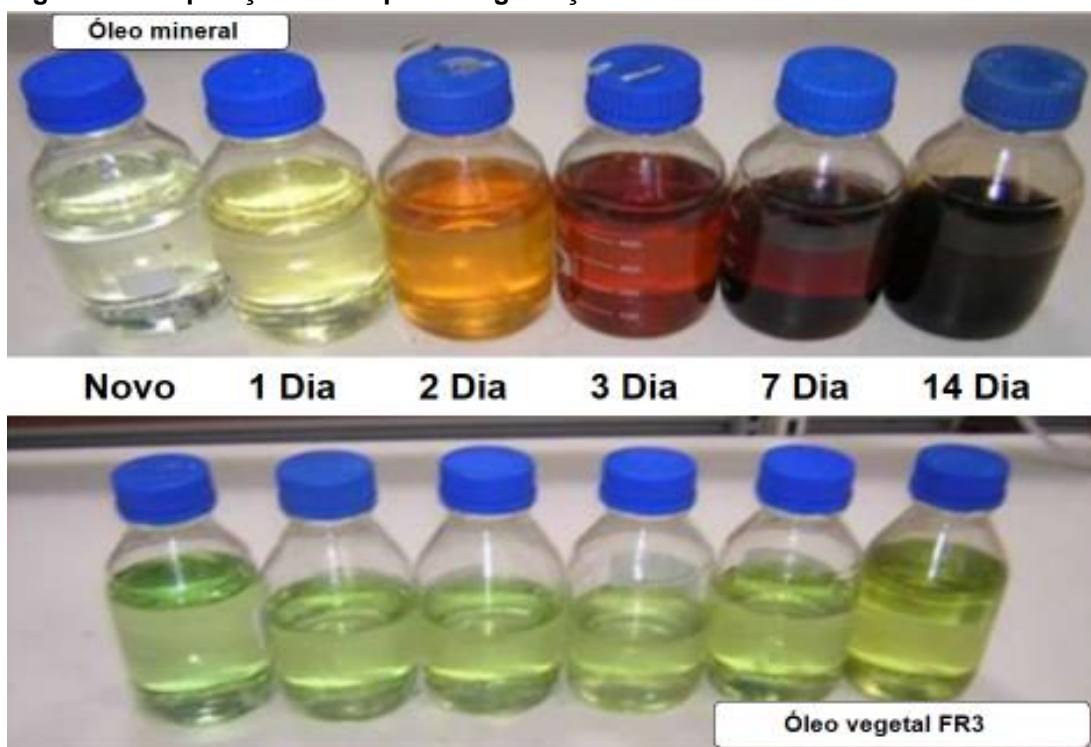
A Figura 1 mostra a diferença de degradação dos fluidos isolantes mineral (OMI) e vegetal (OVI) no decorrer de catorze dias de testes, manipulados até temperatura de 135 °C.

Quadro 3. Vida média do transformador de potência isolado a óleo mineral versus óleo vegetal - ambos casos com papel isolante classe 55 °C.

Temperatura do ponto mais quente do transformador (°C)	Vida média do transformador / h	
	Óleo mineral isolante	Óleo vegetal isolante
85	220.000	440.838
95	65.000	130.335
100	36.232	72.626
105	20.500	41.100
110	11.800	23.607
120	4.050	8.125

Fonte: Extraído de Mendes, 2008.

Figura 1. Comparação do tempo de degradação do OMI e OVI.



Fonte: Extraído de CARGILL, 2018.

Pode-se concluir pela Figura 1 que a degradação do OMI é maior do que a do OVI. Observa-se que a coloração do óleo muda gradativamente no decorrer dos dias devido às perdas das propriedades físico-químicas que o OMI sofre pela exposição a altas temperaturas. Com isso, conclui-se que o OMI depois dos catorze dias de teste, não apresenta mais características para ser fluido isolante, pois está degradado e acarreta à diminuição da vida média do transformador por acelerar a deterioração de seus componentes isolantes. Por outro lado, o OVI, após os catorze dias de testes,

aparentemente tem uma leve mudança na sua coloração, ou seja, mantém todas suas propriedades físico-químicas mesmo após exposição a altas temperaturas, logo ainda pode ser usado como fluido isolante eficaz. Com todos os resultados obtidos, o OVI comprova ser mais eficaz que o OMI pelo fato de não perder suas propriedades quando usado em altas temperaturas. Logo, o óleo vegetal isolante tem vida média maior assim como a do transformador, pelo fato de diminuir a degradação e deterioração de todos seus componentes expostos ao fluido isolante.

3 DIFERENÇA DE DEGRADAÇÃO DO PAPEL TIPO KRAFT IMERSO EM OMI E EM OVI

Papéis termicamente envelhecidos

(170 °C) em OVI e OMI por horários variados, demonstram que a celulose envelhece mais lentamente quando imersa em OVI do que quando imersa em OMI (Figura 2).

Figura 2. Degradação do papel tipo Kraft imerso em OVI E OMI.



Fonte: Extraído de CARGILL, 2018.

O fluido FR3 é um líquido isolante superior para transformadores de energia e distribuição, fornecendo capacidade de carga flexível sem sacrificar a vida útil ou a confiabilidade dos ativos. O uso do fluido FR3 como óleo do transformador de energia ou distribuição tem os benefícios de otimizar o desempenho do transformador; prolongar a vida útil dos ativos e adia os custos de substituição, ao mesmo tempo em que reduz potencialmente os gastos de capital de longo prazo; aumentar a confiabilidade da rede e diminuir o risco de falha do transformador.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O OMI é maléfico ao meio ambiente e tem baixa tolerância à umidade sendo um produto inflamável, além de ser um recurso finito proveniente do petróleo. A constante operação do

transformador acarreta mudanças em suas propriedades físicas, químicas e elétricas, fazendo com que o mesmo perca sua eficiência de isolamento, gerando uma série de consequências, por exemplo, a degradação e deterioração dos componentes internos e papéis isolantes do transformador.

Uma das alternativas para melhorar o isolamento térmico e a confiabilidade de um transformador de potência é a troca do óleo mineral isolante (OMI) pelo óleo vegetal isolante (OVI), visto que o mesmo é um recurso renovável e tem maior afinidade com a água, implicando na diminuição da umidade no transformador e conseqüentemente o aumento da vida útil de sua isolamento sólida (papel kraft). Além de ser considerado como fluido de segurança, sendo que só é inflamável em altas temperaturas (acima de 340°C).

O aumento da sua confiabilidade

proveniente da substituição do OMI que é a principal causa do envelhecimento dos transformadores através de sua degradação, pelo OVI é um dos principais motivos para agregar mais anos de vida aos transformadores. Este, por ter comportamento mais benéfico aos materiais e elementos do mesmo, assim como ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

CARGILL. Fluido Envirotamp FR3 formulado para um melhor desempenho, 2018b.

CUNHA OTTONI, D. et al. Fogo e Incêndio. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 1-8, 2003.

FOFANA, I. 50 Years in the Development of Insulating Liquids, IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 29, n. 5, p. 13-25, 2013.

FRIEDENBERG, L.; SANTANA, R. Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente. In: LX SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. 2014, Porto Alegre - RS. ENERGIA E AMBIENTE, p. 1-12, 2014.

LIPSTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. Transformer oil. 2. ed. Jerusalem, Israel: 275 p. 1970.

MENDES, J. C. BIOTEMP - Óleo Vegetal da ABB - Aplicação em Transformadores de Potência em Alta Tensão Rio de Janeiro, CEPEL, 2008.

MORETTO, E.; FETT, R. Tecnologia de óleos e gorduras vegetais. São Paulo: Varela, 150 p. 1998.

PENA, M. Falhas em transformadores de potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções,

Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de Mestrado, Itajubá, p. 1-134, 2003.

RIES, W. Transformadores: Fundamentos para projeto e cálculo. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

SILVA, R. I. da; COELHO, A. A nova instrução técnica n ° 37 / 2018 subestação elétrica, do Corpo de Bombeiros do estado de São Paulo e o reconhecimento dos benefícios do uso de transformadores e reatores imersos em fluido isolante de alto ponto de combustão (classe K). XVIII ERIAC. Anais... Foz do Iguaçu: Cigre CENN, 2019.

SOARES, V. Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de Tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão. 2015. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná. 2015.

STOCCO, M. Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2009.

WEG. Transformadores de potência. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Geração%2C-Transmissão-e>>. Distribuição/Transformadores-e-reatores-a-oleo/Transformadores-de-Potência-a Óleo. Acesso em: 20 abr. 2022.

WILHELM, H.; TULLIO, L.; UHREN, W. Produção e uso de óleo vegetal isolante no setor elétrico. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2009.