DOI: 10.48011/asba.v2i1.1095

Análise Eletromagnética e Térmica de Transformadores de Distribuição Refrigerados a Óleo: Uma Abordagem Baseada em Simulações Computacionais e Ensaios Laboratoriais

Gabriel C. Nogueira, Alexander C. Dutra,
Daniela M. Bueno, Leonardo H. Medeiros,
Micael M. Oliveira, Rafael C. Beltrame,
Rodolfo P. Londero, Rodrigo O. Miranda,
Vitor C. Bender, Tiago B. Marchesan

Instituto de Redes Inteligentes; Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – RS – Brasil (e-mail: gabrielnog89@gmail.com).

Abstract: This work presents an analysis referring to energy losses in the core and the thermal behavior of two 75 kVA natural ester-cooled distribution transformers, which are only distinguished by the presence and absence of fins. The methodology includes: electromagnetic and fluid dynamic simulations performed in the ANSYS® Maxwell and ANSYS® CFX softwares, respectively, and laboratory tests according to the guidelines of the ABNT NBR 5356 standard. Thus, in view of the implementation of two different fin configurations, it was possible to study the consequences on the electromagnetic losses and oil temperature in the transformer. The results were used to study the operation of the transformers in the presence and absence of the fins and to analyze them according to the standard ABNT NBR 5440, which deals with the operating conditions of these equipments. It was also possible to validate the electromagnetic and fluid dynamic simulations as an efficient, fast and economically viable alternative for predicting transformer operation, validated by tests.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise referente às perdas de energia no núcleo e ao comportamento térmico de dois transformadores de distribuição refrigerados a óleo vegetal de 75kVA unicamente distintos pela presença e ausência de aletas. A metodologia é composta por: simulações eletromagnéticas e fluidodinâmicas realizadas nos softwares ANSYS® Maxwell e ANSYS® CFX, respectivamente, e ensaios laboratoriais conforme as diretrizes da normativa ABNT NBR 5356. Assim, através da implementação de duas diferentes configurações de aletas, foi possível estudar as consequências sobre as perdas eletromagnéticas e a temperatura do óleo do transformador. Os resultados serviram para estudar o funcionamento dos transformadores na presença e ausência das aletas e analisá-los diante da normativa ABNT NBR 5440, que trata das condições de funcionamento desses equipamentos. Também, foi possível validar as simulações eletromagnéticas e simulações fluidodinâmicas como uma alternativa eficiente, rápida e economicamente viável de predição do funcionamento do transformador, validada por ensaios.

Keywords: Computational electromagnetism; Computational fluid dynamics; Distribution transformer; Natural ester oil; Laboratory testing.

Palavras-chaves: Eletromagnetismo computacional; Ensaio laboratorial; Fluidodinâmica computacional; Óleo vegetal isolante; Transformador de distribuição.

1. INTRODUÇÃO

O funcionamento do sistema elétrico brasileiro pode ser subdividido em três amplos setores: geração, transmissão e distribuição.

Os geradores realizam a conversão de energia, geralmente de origem mecânica, em elétrica. Para injetar a energia nas linhas de transmissão, as tensões são elevadas, de modo a diminuir as correntes e, consequentemente, as perdas ôhmicas na transmissão de energia à longas distâncias. Por limitações físicas os geradores atuam na faixa de 10 kV a 30 kV, assim, o transformador de força é responsável por elevar os níveis de tensão, por exemplo a 500 kV. Por razões práticas, a energia deve ter seus níveis de tensão reduzidos antes de ser entregue ao sistema de distribuição; onde, transformadores de força são responsáveis por rebaixar os níveis de tensão. Já no sistema de distribuição, por motivos econômicos e também de segurança, a energia passa por mais um estágio de rebaixamento das tensões, realizado por transformadores de distribuição (Monticelli & Garcia, 2015).

Nesse contexto, o transformador desempenha uma função essencial no sistema elétrico brasileiro, pois permite adequar

os níveis de tensão e corrente durante todo processo de fornecimento de energia, reduzindo as perdas e contribuindo para a redução de custos de uma operação segura e eficiente.

O transformador é um equipamento complexo e de valor financeiro elevado. Entre os desafios construtivos, destacam-se aqueles relacionados à transferência de calor, fenômeno ocorrido devido à elevação de temperatura ocasionada pelas perdas intrínsecas ao processo de transformação de energia. O não gerenciamento térmico pode ser danoso ao equipamento, pois a elevação da temperatura impacta diretamente na redução da sua vida útil.

O desempenho térmico do transformador deve ser previsto na etapa de projeto, de acordo com normativas que especificam limites de temperaturas. Contudo, as equações empregadas para tal fazem uso de aproximações e estimativas, que podem levar a resultados equivocados. A fim de determinar com precisão a distribuição das temperaturas internas de um transformador, metodologias a partir de modelos térmicos equivalentes são implementadas. Ainda, metodologias baseadas em simulações computacionais, ferramentas que vêm se destacando pela precisão e praticidade, também são utilizadas para analisar a performance térmica de transformadores (Amoiralis, 2009).

Desse modo, as perdas de energia e a temperatura de operação do transformador de distribuição entram em pauta, a partir da relação direta de critérios operacionais exigidos pela normativa brasileira ABNT NBR 5440, com o custo de desenvolvimento e implementação do sistema arrefecedor. Nesse trabalho, são empregados o eletromagnetismo computacional e dinâmica de fluidos computacional para estudar, respectivamente, a eficiência elétrica do transformador e o desempenho do sistema arrefecedor, a partir de dois protótipos ONAN (Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Natural), um com aletas e outro sem aletas. Posteriormente, os dois equipamentos foram submetidos a ensaios laboratoriais de acordo com a normativa ABNT NBR 5356, cujos resultados foram comparados.

Assim, diante das diferenças físicas dos dois modelos, foi possível analisar as perdas e o sistema arrefecedor, de acordo com as exigências da normativa brasileira. Ao comparar os resultados das simulações computacionais de alto desempenho com os obtidos pelos ensaios laboratoriais, foi possível validá-las como soluções de confiabilidade e precisão, como uma importante ferramenta na validação de projetos e redução de custos industriais.

2. DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do presente estudo foram realizadas revisões bibliográficas em normativas e sobre métodos de arrefecimento de transformadores.

2.1 Normativas

Os transformadores estudados, aplicáveis à redes aéreas de distribuição, com potência nominal de 75 kVA, enrolamentos de alumínio e imersos em óleo vegetal isolante com resfriamento natural, devem cumprir as diretrizes normativas para ensaio laboratorial e operação, respectivamente previstas na ABNT NBR 5356 e na norma ABNT NBR 5440.

A norma ABNT NBR 5356-2 detalha os métodos de ensaios para a medição da elevação de temperatura, ou seja, estipula o critério para o reconhecimento e determinação da convergência térmica. Esse estado, também abordado como regime permanente, é compreendido como a taxa de variação da elevação de temperatura do topo de óleo inferior a 1 ºC durante um período de três horas.

Para essa classe de transformadores, a norma ABNT NBR 5440, define que estão aptos a operar quando:

- Com valor máximo para perdas em vazio de 295 W, admitindo uma tolerância de até 10%.

- Durante o regime térmico a elevação sobre a temperatura ambiente na superfície topo de óleo for, no máximo, 70 °C.

2.2 Perdas de energia

As perdas no transformador podem ser subdivididas em dois tipos: perdas em carga e perdas a vazio.

A primeira trata das perdas Joule nos enrolamentos de cobre ou alumínio, provenientes da corrente elétrica que percorre os condutores com determinada resistência elétrica, somadas às perdas parasitas, provenientes das correntes parasitas induzidas nos condutores das bobinas pelo fluxo de dispersão. As perdas em carga são estimadas por meio do ensaio de curto-circuito, onde os enrolamentos secundários são curto-circuitados e as medições são realizadas (Oliveira, Cogo & Abreu, 1983).

O ensaio de curto-circuito é um ensaio que normalmente é realizado nos transformadores ao saírem das linhas de fabricação com o objetivo de medir a impedância interna, determinar as perdas nos enrolamentos e realizar o ensaio de aquecimento que permite verificar a elevação da temperatura média das bobinas quando o transformador estiver operando com carga nominal (Ries, 2007).

A segunda refere-se às perdas no núcleo, sendo as perdas por histerese proveniente do atraso no núcleo ferromagnético entre a indução magnética e o campo magnético, e as perdas de Foucault devido à corrente alternada que flui pelos enrolamentos gerar um campo magnético variável no núcleo e, por consequência, a circulação de correntes parasitas. Esse tipo de perda é estimado por meio do ensaio em vazio, onde o secundário fica em aberto e as medições realizadas (Umans, 2014).

2.3 Aquecimento e refrigeração do transformador

Quando o transformador entra em operação, o enrolamento e o núcleo começam a aquecer e a temperatura do componente interno aumenta gradualmente. Após um período de processo de aquecimento e resfriamento para alcançar o equilíbrio, a temperatura tende a ser estável (Cui, 2017).

O óleo do transformador e o papel isolante estão sujeitos constantemente à altas temperaturas quando os transformadores trabalham regularmente. Por esse motivo, a temperatura desempenha um papel significativo no envelhecimento do óleo e, principalmente, do papel (Pei, 2016). O guia IEEE C57.91-1995, define a vida útil de um transformador como a vida útil do próprio isolamento sólido (por exemplo: papel). O sistema arrefecedor com óleo isolante destaca-se pela eficiência em trocar calor com o ambiente externo e amenizar os efeitos da degradação do papel.

Em um transformador de refrigeração natural imerso em óleo (ONAN), o ON refere-se ao óleo de resfriamento que circula devido à convecção natural pelo princípio termossifônico e o AN refere-se ao radiador externo refrigerado a ar que também depende da convecção natural para dissipar o calor do óleo de resfriamento, é mais frequentemente usado e preferido (Zhang, 2004).

Nesse sistema, a parte ativa do transformador é imersa em um tanque contendo óleo isolante, onde a energia transferida da parte ativa para esse fluido gera uma diferença de temperatura entre a topo T_{top} e a base T_{bot} do tanque, que associada à diferença de altura ΔH entre o centro da parte ativa e o centro do radiador e à gravidade g faz com que o óleo com densidade $\rho_{óleo}$ e expansividade térmica $\beta_{óleo}$ gere uma pressão Δp mostrada em (1); essa diferença de pressão faz o óleo circular pelo tanque e radiador (Barth, 2018).

$$\Delta p = \rho_{óleo} \cdot g \cdot \beta_{óleo} \cdot (T_{top} - T_{bot}) \cdot \Delta H \qquad (1)$$

A partir desse fenômeno, é possível implementar no tanque um sistema de dutos que direcionam e viabilizam a troca térmica entre o meio e o óleo. São as aletas que, juntas, formam o radiador (Fig. 1).

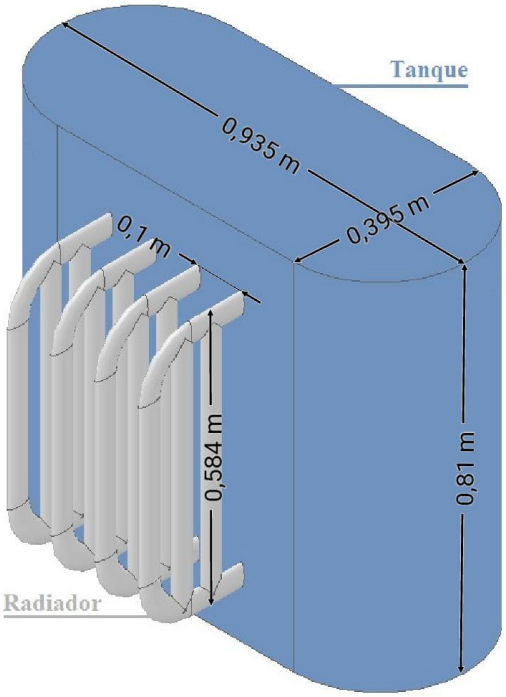


Fig. 1 Radiador composto por aletas anexo ao tanque.

2.4 Dinâmica de fluidos computacional (CFD)

O CFD é a associação da mecânica de fluidos a métodos numéricos. Assim é possível resolver problemas como modelagem de fluxo, turbulência, transferência de calor e reações para aplicações industriais.

As equações diferenciais provenientes da mecânica de fluidos resolvidas em CFD são complexas para serem resolvidas de forma analítica, sendo necessário aplicar alguma técnica numérica para resolvê-las. O método dos volumes finitos (MVF) entra em pauta por ser incorporado pelo software comercial ANSYS® CFX.

O FVM é uma técnica numérica que transforma as equações diferenciais parciais, representando leis de conservação sobre volumes diferenciais, em equações algébricas discretas sobre volumes finitos, conhecidos por elementos ou células (Moukalled, Mangani & Darwish, 2016).

A ferramenta CFD possui três componentes principais que são usados para lidar como objeto desde o ponto inicial até a análise dos resultados: Pré-processamento, processamento de soluções e pós-processamento (Soto, 2008).

A. Pré-processamento

Envolve a criação da geometria, domínio computacional e geração de malha. A malha é a geometria discretizada em pequenos volumes de controle, conhecidos como células. A precisão da solução é uma função do número de células que compõem a malha (Thabet, 2018).

A Fig. 2 mostra a geração da malha do radiador de um transformador.

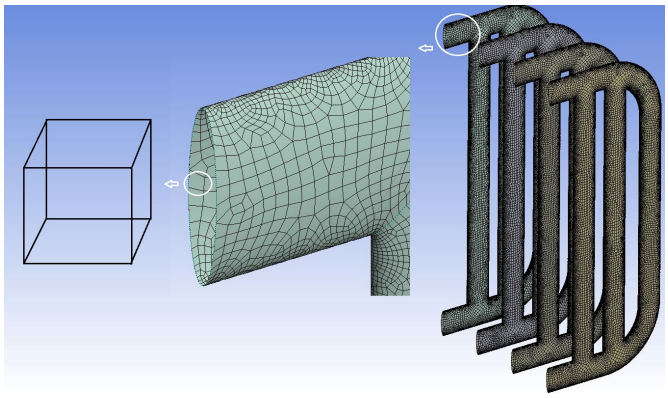


Fig. 2 Exemplificação de elemento de volume hexaédrico, que forma a malha.

B. Processamento de soluções

O solucionador CFD aplica as equações diferencias à malha, com base nas condições de contorno, materiais e definições de controle da simulação.

A convergência pode ser obtida de duas formas, estado estacionário (do inglês "*steady state*") e transitório (do inglês "*transient*"). No estado estacionário o solucionador resolve o problema sem considerar a escala de tempo, ou seja, a solução em qualquer ponto específico do sistema permanece constante após o equilíbrio ser alcançado, isso significa obter

apenas o estado final do sistema. Por outro lado, na análise transitória as variáveis do sistema variam com o tempo, ou seja, refere-se a um fluxo não constante de energia, isso significa a possibilidade de analisar o comportamento do problema ao longo de um tempo definido.

C. Pós-processamento

Nesta etapa, realiza-se a análise dos resultados. Isso inclui a plotagem de contornos, exibições de vetores, formas deformadas e listagens dos resultados em formato tabular (Madenci & Guven, 2015).

2.5 Eletromagnetismo computacional (CEM)

O CEM associa campos eletromagnéticos e eletricidade a métodos numéricos. Assim, é possível resolver problemas elétricos e magnéticos, com a aplicação da análise por elementos finitos (FEA do inglês, *finite element analysis*) às equações de Maxwell, (2) a (5).

$$\nabla \bullet \vec{D} = \rho_v \tag{2}$$

$$\nabla \bullet \vec{B} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{4}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{5}$$

Diante dessas equações aplicadas à geometrias complexas, a simulação também demanda um método de cálculo eficiente, e o mais aplicado em CEM é o MEF (método dos elementos finitos).

A grande vantagem do MEF é a sua flexibilidade de aplicação, pois as formulações são aplicadas através da discretização do domínio de estudo em elementos menores, denominados elementos finitos, obtidos através de processos de geração de malha que discretizam o domínio de forma automática (Nunes, 2018).

Ademais, o processo em torno da simulação CEM é similar a simulação CFD, respectivamente: gerar a malha, definir os materiais, indicar as condições de contorno e condições iniciais, configurar o solucionador, analisar a convergência e posteriormente o pós-processamento.

3. SIMULAÇÕES

Primeiramente, para as simulações foram reproduzidos em software os desenhos dos transformadores (Tabela 1) unicamente diferenciados pela ausência de radiador Fig. 3(a) e presença de radiador Fig. 3(b), além de serem iguais aos equipamentos ensaiados laboratorialmente.

Após, para as simulações eletromagnéticas, que visam calcular as perdas no núcleo, as geometrias foram inseridas no ANSYS® Maxwell®, onde foram definidos: os materiais condutores e isolantes (Tabela 1), a corrente de excitação, a geração de malha e a configuração do solucionador. Posteriormente, na etapa de pós-processamento, foram criados os campos renderizados e calculadas as perdas em vazio, mostradas na Tabela 2.

Para as simulações fluidodinâmicas, as geometrias foram inseridas no ANSYS® CFX®, onde a malha foi confeccionada. Nessa etapa deve-se considerar os aspectos físicos e condições de contorno que posteriormente serão configurados, como a condição anti-deslizamento para fluidos viscosos, que se aplica ao óleo do transformador. Essa estabelece que para um contorno sólido como a carcaça do transformador, o fluido viscoso terá a velocidade igual a zero na camada limite da interface de contato do sólido com o fluido. Ademais, nessa etapa os materiais são atribuídos a cada domínio da geometria, as perdas elétricas são definidas nos enrolamentos e núcleo, as condições ambientais são definidas, como pressão igual a 1 atm e temperatura ambiente a 25 °C, dentre outras configurações. A Fig. 3 mostra as geometrias simuladas e a Tabela 1 os materiais configurados em cada domínio.

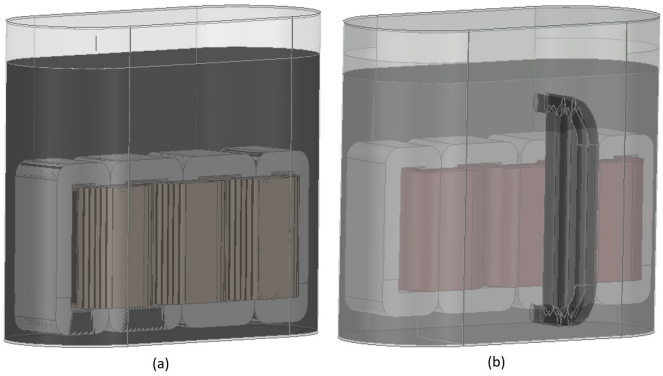


Fig. 3 Geometria dos transformadores simulados: (a) Sem aletas; (b) Com aletas.

Um fator pertinente nas simulações são os valores das perdas atribuídas as bobinas de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT) e ao núcleo, pois esses valores são os mesmos encontrados nas simulações eletromagnéticas e podem ser observados conforme a Tabela 2.

Tabela 1. Definições dos materiais

Parte do Transformador	Material
Tanque	Aço
Óleo isolante	Óleo vegetal isolante
Enrolamentos	Alumínio
Núcleo	Aço amorfo
Ar	Ar (a 25 °C)

Tabela 2. Perdas definidas nas simulações fluidodinâmicas

	Sem radiador	Com radiador
AT	657 W	657 W
BT	558 W	558 W
Núcleo	88,82 W	95,2 W

Por fim, as configurações da simulação foram estabelecidas. Visando reduzir erros foi escolhido o modo transitório de simulação por ser mais eficiente ao resolver problemas de fluidos confinados. Além disso, esse método permite a análise temporal do comportamento térmico. Isso é de suma importância, uma vez que possibilita aplicar os critérios de regime impostos pela ABNT NBR 5356-2, ou seja, é possível realizar o estudo da simulação a partir de fatores aplicados a equipamentos os reais

4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os transformadores foram ensaiados no Laboratório de Ensaios em Média Tensão (INRI MT), parte do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), seguindo regulamentações das normas ABNT NBR 5356-1:2007, ABNT NBR 5356-2, ABNT NBR 5356-3:2007.

Os transformadores foram submetidos a cinco ensaios. A Tabela 3 mostra os ensaios realizados e os respectivos equipamentos utilizados.

O ensaio de perdas a vazio é realizado utilizando-se a fonte emuladora de rede CA, alimentando o lado de baixa tensão com a tensão nominal do enrolamento. A medição foi realizada utilizando-se os transformadores de potencial e de corrente para a obtenção dos valores instantâneos e o analisador digital trifásico de grandezas elétricas MONITEK 9451, que oferece um sistema de supervisão através do seu software.

Tabela 3. Ensaio realizado e equipamento utilizado

Tipo de Ensaio	Equipamento Utilizado
Ensaio de relação de transformação	Medidor digital trifásico de relação de transformação MONITEK 9610
Ensaio de perdas ôhmicas	Medidor digital de resistência ôhmica MONITEK 9930
Ensaio de perdas a vazio e ensaio de perdas em carga	Fonte emuladora de rede CA e analisador digital trifásico de grandezas elétricas MONITEK 9451
Ensaio de elevação de temperatura	Sistema automatizado de sensores de temperatura no óleo e no ambiente, monitorados via *software*

O ensaio de perdas em carga é realizado utilizando-se a fonte emuladora de rede CA, alimentando o lado de alta tensão com a corrente nominal do enrolamento, enquanto o lado de baixa tensão é sujeito a um curto-circuito. A medição foi realizada utilizando-se os transformadores de potencial e de corrente para a obtenção dos valores instantâneos e o analisador digital trifásico de grandezas elétricas MONITEK 9451. O ensaio foi realizado nos taps nominal e crítico (menor tensão) do transformador.

No ensaio de elevação de temperatura foi utilizada a mesma configuração do ensaio de perdas em carga. Entretanto, para este ensaio, foram aplicadas as perdas totais (perdas a vazio somadas as perdas em carga) considerando o tap crítico (menor tensão). Um sensor de temperatura foi instalado dentro do transformador, para acompanhar a temperatura do topo do óleo, e outros três sensores foram alocados às proximidades do transformador sob ensaio. O transformador, então, entrou em processo de aquecimento até a estabilização da temperatura. O analisador de energia oferece um sistema supervisório através de seu software, que alerta o usuário ao fim do ensaio de aquecimento. Após o aquecimento do transformador, foi aplicada a corrente nominal do enrolamento e aguardado mais uma hora. Ao final desta hora, foi utilizado o medidor digital de resistência ôhmica para obtenção da resistência à quente.

5. RESULTADOS

5.1 Perdas eletromagnéticas

A Fig. 4 compara os valores de perdas no núcleo e apresenta os valores de erro calculado.

Conforme define a norma ABNT NBR 5440, para um transformador de 75 kVA o valor máximo para perdas em vazio é de 295 W com uma tolerância de até 10%. Assim, na Fig. 4, uma linha de referência mostra o critério para as perdas eletromagnéticas.

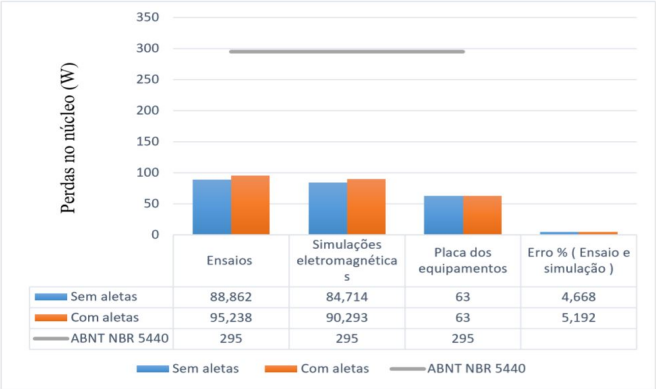


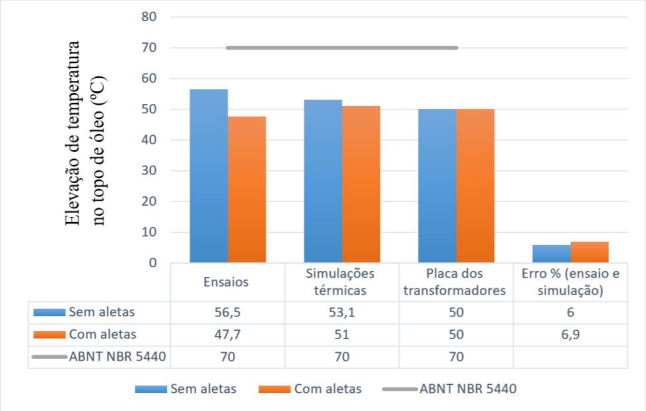
Fig. 4 Gráfico comparativo de perdas eletromagnéticas.

Considerando o objetivo dos ensaios laboratoriais de perdas e simulações eletromagnéticas, isto é, averiguar as perdas eletromagnéticas no núcleo em dois modelos de transformadores, é possível após a obtenção e estudo dos resultados, afirmar que as simulações eletromagnéticas aproximam-se de forma satisfatória aos ensaios em laboratório, como é visto nos valores de erro calculado. A simulação eletromagnética não considera os efeitos da temperatura. Portanto, a diferença entre as perdas dos dois modelos simulados, é justificada pela variação da malha e da geometria. Ambos os estudos, computacional e laboratorial, evidenciam que os equipamentos atendem os critérios impostos pela normativa ABNT 5440.

5.2 Elevação de temperatura

A Fig. 5 compara os valores de elevação de topo de óleo e apresenta os valores de erro calculado.

Ainda, a norma ABNT NBR 5440, define que para um transformador de 75 kVA o valor máximo de elevação de temperatura medido no topo de óleo é 70 °C. Assim, na Fig. 5, uma linha de referência mostra o critério para a elevação de temperatura.



	Ensaios	Simulações térmicas	Placa dos transformadores	Erro % (ensaio e simulação)
Sem aletas	56,5	53,1	50	6
Com aletas	47,7	51	50	6,9
ABNT NBR 5440	70	70	70	

Fig. 5 Comparação da elevação de temperatura no topo de óleo (ºC).

A normativa ABNT NBR 5356-2 estipula o critério para o reconhecimento e determinação da convergência térmica, compreendido como a taxa de variação da elevação de temperatura do topo de óleo inferior a 1 ºC durante um período de três horas. Nesse sentido, os ensaios obedecem a esse critério e a Fig. 6 mostra o período de simulação para os diferentes transformadores, onde é possível observar que as simulações térmicas também seguem as solicitações da normativa.

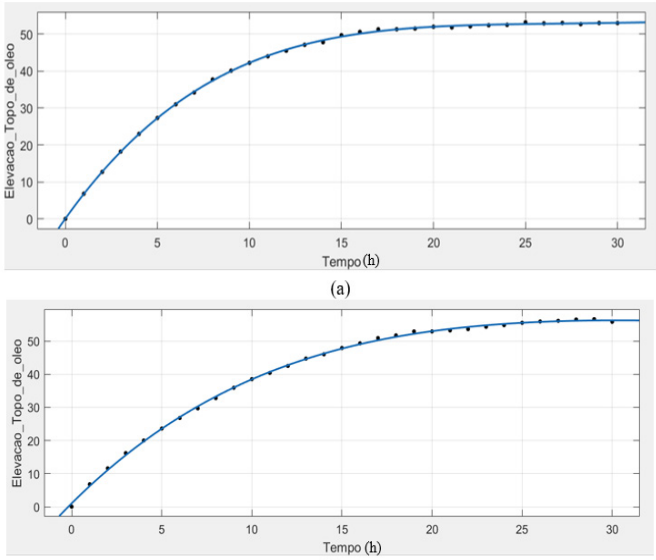


Fig. 6 Gráficos com linha de interpolação dos pontos da temperatura (ºC) em função do tempo (h) das simulações térmicas: (a) transformador com aletas (b) transformador sem aletas.

Através da Fig. 5 percebe-se que ambos modelos atenderam aos limites de elevação especificados. Contudo, a ausência de aletas faz com que o transformador dissipe menos calor para o meio externo, levando a uma maior temperatura de topo de óleo do que aquele com as aletas.

Na Fig. 6 observa-se a dinâmica térmica de ambos transformadores, onde uma linha representa a interpolação dos pontos da elevação de temperatura (ºC) em função do tempo (h), caracterizando seus processos de regime térmico. Ainda, é possível visualizar que a variação de temperatura nas últimas três horas em ambos os modelos está de acordo com o especificado pela norma ABNT NBR 5356-2 para considerar o regime permanente. Além disso, foi possível validar o tempo de dinâmica térmica também utilizando a simulação térmica.

Os resultados das simulações térmicas foram processados computacionalmente e renderizados, de acordo com a Fig. 7.

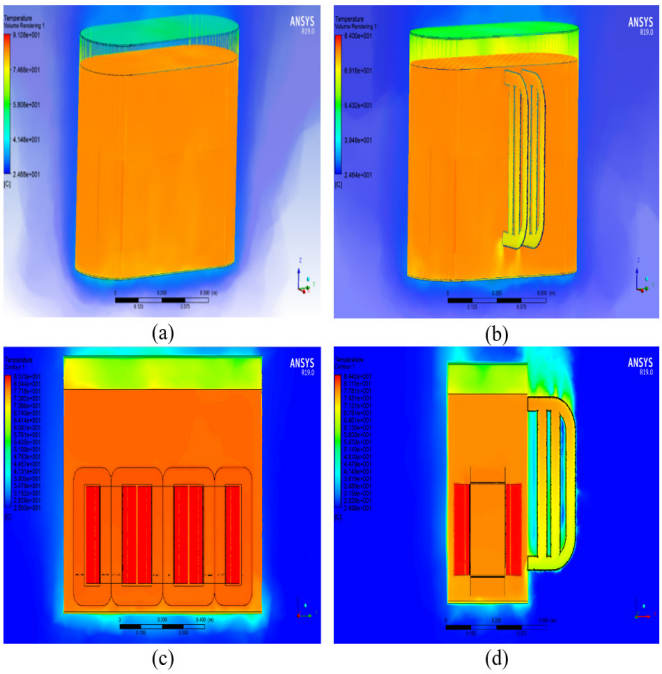


Fig. 7 Renderização das simulações térmicas: (a) perspectiva tridimensional da configuração sem aletas, (b) perspectiva tridimensional da configuração com aletas, (c) vista frontal com transparência do tanque, na configuração sem aletas, (d) vista lateral com transparência do tanque, na configuração com aletas.

Com a renderização das simulações térmicas, torna-se possível observar a distribuição da temperatura em diversos pontos do transformador. Como o fluxo de óleo dentro dos transformadores é resultante do aquecimento, por consequência, é visível a atuação do sistema de arrefecimento presente no modelo com aletas. Além disso, embora sem aletas, a outra configuração de transformador também se mostrou satisfatória, atendendo a normativa, representando uma configuração construtivamente mais econômica do ponto de vista do uso de material e complexidade de fabricação.

6. CONCLUSÕES

Dois modelos de transformadores de distribuição, um com aletas e outro sem, foram analisados quanto as suas características elétricas e térmicas. Simulações computacionais foram realizadas para obter as perdas eletromagnéticas no núcleo e a temperatura de topo de óleo. Os resultados das simulações foram validados com valores obtidos por ensaios laboratoriais dos protótipos, mostrando a eficiência da ferramenta de simulação para o projeto e análise de transformadores. Ambos os modelos atingiram os requisitos de perdas e temperaturas de topo de óleo previstos pelas normativas ABNT NBR 5356-2 e ABNT NBR 5440, tanto por simulações quanto por ensaios. O modelo com aletas apresentou uma temperatura de topo de óleo inferior ao modelo sem aletas. Contudo, mesmo sem aletas o protótipo mostrou-se dentro das normas, sendo, portanto, uma opção construtivamente menos custosa. Percebe-se, portanto, que o emprego de simulações na etapa de projeto de transformadores pode ser muito útil, apresentando resultados confiáveis que permitem otimizar projetos e reduzir custos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através Programa de Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT) divisão de Geração Distribuída (GD) pelo apoio financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5356-2. (2007). *Transformadores de potência Parte 2: Aquecimento.* Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 5440. (2014). *Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição - Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Amoiralis, E. I., Tsili, M. A., & Kladas, A. G., (2009). *Transformer Design and Optimization: A Literature Survey*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 1999-2024.

Barth, N. D., Oliveira, A., Maschio, G., Marchesan, T. B., & Falcão, C. E. G., (2018). *Metodologia de projeto de radiadores para transformadores de potência baseado na análise térmica, hidráulica e escalar*. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Cui, J., Zhao, T., Zhang, Y., Guo, Y., & Zou, L., (2017). *Study on the hotspot distribution characteristics of oil immersed transformer based on electromagnetic-fluid-thermal fields coupling analysis*. China International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, pp. 451-455.

de Oliveira, J. C., Cogo, J. R., & de Abreu, J. P. G. (1984). *Transformadores: teoria e ensaios*. Blucher, São Paulo, pp. 1-15.

Iaronka, O., (2014). *Desenvolvimento de um sistema de refrigeração de elevada eficiência com o método de elementos finitos para transformadores de distribuição*. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Madenci, E., & Guven, I., (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®.* Springer International Publishing, Boston, pp. 26.

Medeiros, L. Hautrive., Feil, D. L. P., & Marchesan, T. B., (2016). *Desenvolvimento de transformadores de distribuição de elevada eficiência empregando núcleo amorfo e óleo vegetal isolante*. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M., (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. Springer International Publishing, Berlim, pp. 4.

Nunes, A. S., (2018). *Modelagem de dispositivos eletromagnéticos usando uma abordagem híbrida entre o Método da Rede de Relutância (RNM) e o Método dos Elementos Finitos de Faceta (FFEM).* Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.

Pei, C., Shengchang, J., Lingyu, Z., Cui, Y., Shihua, Z., Yun, L., Huisheng, Y., & Ping, P., (2016). *The effect of thermal aging on surface structure and mechanical strength of oil-impregnated pressboard*. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, pp. 1000-1003.

Ries, W., (2007). *Transformadores: Fundamentos para projeto e cálculo.* EdiPUCRS, Porto Alegre, pp. 11-90.

Soto, A., Souto, D., Turowski, J., Lopez-Fernandez, X. M., & Couto, D. (2008). *Software for fast interactive three-dimensional modeling of electromagnetic leakage field and magnetic shunts design in shell type transformers.* 18th International Conference on Electrical Machines (ICEM), Vilamoura, pp. 1-6

Thabet, S., Thabit, T. H., & Jasim, Y. A. (2018). *CFD Analysis of a Backward Facing Step Flows.* International Journal of Automotive Science and Technology, vol. 2, no. 3, pp. 10-16.

Umans, S. D., (2014) *Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery*. Toe McGraw-Hill Global Education Holdings, New York, p. 63-112.

Zhang, J., & Li, X., (2004). *Coolant flow distribution and pressure loss in ONAN transformer windings: Part I: Theory and model development.* IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 186-193.