

Comportamento Térmico de um Transformador de Potência Refrigerado por Óleo Dirigido/Forçado Diante da Variação da Vazão da Bomba Hidráulica

Micael M. Oliveira*, Leonardo H. Medeiros*, Antônio M. Kaminski Jr.*, Pedro O. Bacin*, Richard G. Cornelius*, Rafael C. Beltrame*, Carlos E. G. Falcão*, Vitor C. Bender*, Tiago B. Marchesan*, Marco A. Marin**, Helena M. Wilhelm***

*Instituto de Redes Inteligentes, Univ. Federal de Santa Maria, RS, Santa Maria, Brasil (e-mail: oliveira.micael@acad.ufsm.br)

** Companhia Paranaense de Energia, PR, Curitiba, Brasil (e-mail: marin@copel.com)

***Vegoor Tecnologia Aplicada, PR, Colombo, Brasil (e-mail: helena@vegoor.com.br)

Abstract: Power transformers are essential equipments for the electrical system and their useful life is regulated by internal temperatures that accelerate the degradation of their solid insulation. In this sense, studies to understand and improve the thermal performance of these equipments are justified. This article presents a thermal performance analysis of transformers with directed/forced oil cooling system, through heating tests carried out in a prototype unit equipped with 31 fiber optic sensors to measure temperatures along its active part and points such as oil top and radiator inlet. Also, through a complete test setup, the oil circulation speed imposed by the hydraulic pump was varied and its impact on each of the cooling systems was evaluated. In this way, the obtained results make it possible to evaluate the performance of cooling systems under different conditions, contributing to transformer thermal designs and operation.

Resumo: Transformadores de potência são equipamentos essenciais para o sistema elétrico e têm sua vida útil regulada pelas temperaturas internas que aceleram a degradação da sua isolação sólida. Nesse sentido, estudos para compreender e melhorar o desempenho térmico desses equipamentos são justificados. O presente artigo traz uma análise do desempenho térmico de transformadores com sistema de arrefecimento por óleo dirigido/forçado, através de ensaios de aquecimento realizados em uma unidade protótipo equipada com 31 sensores de fibra óptica para medir as temperaturas ao longo da sua parte ativa e em pontos como topo de óleo e entrada do radiador. Ainda, através de uma configuração completa de ensaio, variou-se a velocidade de circulação de óleo imposta pela bomba hidráulica e foi avaliado seu impacto em cada um dos sistemas de arrefecimento. Dessa forma, foram obtidos resultados que possibilitam a avaliação do desempenho dos sistemas de arrefecimento sob diversas condições, contribuindo para projetos térmicos e operação de transformadores.

Keywords: Power Transformer; Temperature Rise Test; Thermal Performance; Cooling System; Optical Fibers; Directed Oil; Forced Oil.

Palavras-chaves: Transformador de Potência; Ensaio de Aquecimento; Desempenho Térmico; Sistema de Arrefecimento; Fibras Ópticas; Óleo Dirigido; Óleo Forçado.

1. INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são os equipamentos responsáveis pela adequação da tensão elétrica ao longo dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Amplamente empregados e de suma importância para o sistema elétrico, os transformadores têm as suas temperaturas internas como o fator mais crítico que determina o seu carregamento e limita a sua vida útil, quando deve ser retirado de operação e substituído por uma nova unidade (Stebel et al. 2021; Radakovic et al. 2012).

Isso se deve ao fato de que o papel isolante empregado na construção dos transformadores, composto a base de celulose, tem seu envelhecimento e degradação acelerados sob altas temperaturas. Ao perder suas propriedades dielétricas e mecânicas, a isolação sólida é comprometida, podendo levar a

falhas como curtos-circuitos internos, culminando com o fim da vida útil do equipamento (Liu et al. 2019).

Para garantir a correta e segura operação dos transformadores e evitar o seu envelhecimento precoce, diferentes normas estipulam valores máximos das temperaturas internas, de acordo com a classe de cada equipamento (ABNT, 2007 e 2017; IEC, 2011 e 2018). Do ponto de vista de projeto, o sistema de arrefecimento é o responsável por dissipar o calor gerado na parte ativa para o meio externo e manter as temperaturas dentro dos limites adequados. O arrefecimento se dá pela circulação do óleo interno e do ar externo, podendo ocorrer de modo natural, baseado apenas na convecção natural dos fluidos, ou com o auxílio de bombas e ventiladores que melhoram o desempenho térmico do equipamento (Kulkarni, Khaparde 2017).

Como ferramentas de auxílio no projeto térmico de transformadores, atualmente são empregados modelos termo-hidráulicos e simulações computacionais da dinâmica dos fluidos (CFD) (Radakovic et al. 2012; Nogueira et al. 2021; Chi et al. 2022). Essas técnicas podem ser utilizadas tanto na análise de transformadores já em operação quanto em etapas prévias de projeto, para obter as distribuições das vazões de óleo e das temperaturas ao longo dos enrolamentos e radiadores, contribuindo para a tomada de decisão e melhoria de projeto.

Uma vez em operação, é recomendável monitorar as temperaturas do transformador em tempo real para garantir a sua segurança. O conhecimento das temperaturas em tempo real permite tomadas de decisão mais assertivas, como redistribuição do carregamento e levantamento de ativos para manutenção e/ou substituição. Na maioria dos casos, esse monitoramento é feito através de sensores PT100 (Rahimpour et al. 2007) e sensores do tipo termopar, instalados em pontos estratégicos do transformador (Torriano et al. 2018; Liu et al. 2019; Daghrh et al. 2020). Contudo, para o monitoramento das temperaturas ao longo dos enrolamentos, sugere-se o uso de sensores de fibras ópticas. Porém, dado o alto custo de instalação e a fragilidade das sondas, que impactam no processo de manufatura e manutenção, ainda não é uma prática amplamente empregada.

Assim, estudos para avaliar o comportamento térmico de transformadores de potência e as características das diferentes configurações de sistemas de arrefecimento são de suma importância. Isso se deve à busca pelo prolongamento da vida útil desses equipamentos, bem como ao uso de menos materiais e respectiva redução de custos. Para contribuir neste sentido, o presente trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho térmico de transformadores que operam com sistemas de arrefecimento fazendo uso de bombas para óleo dirigido e forçado. Ensaios de aquecimento foram realizados em um transformador protótipo equipado com 31 sensores de fibra óptica para medição das temperaturas internas (conforme recomendação de CIGRÉ, 2016). O transformador foi ensaiado para as configurações de óleo dirigido e óleo forçado, com a variação da velocidade de circulação do óleo pela bomba. Dessa forma, avaliou-se as características de cada configuração de arrefecimento e o impacto causado pela variação da vazão de óleo.

2. SISTEMA DE ARREFECIMENTO

Apesar da elevada eficiência dos transformadores, parte da energia processada por esses equipamentos é transformada em energia térmica. Uma vez integrado ao sistema elétrico, perdas no núcleo magnético e nos enrolamentos elevam as temperaturas internas. O calor gerado na parte ativa é então dissipado para o ambiente externo, majoritariamente nos radiadores acoplados ao tanque. Além disso, o desempenho térmico do equipamento está diretamente atrelado às características do sistema de arrefecimento adotado (Radakovic, Sorgic 2010; Kulkarni, Khaparde 2017).

Os radiadores oferecem um caminho para a circulação do óleo dissipar com mais eficiência para o ar o calor absorvido na parte ativa. Essa troca pode ser a base de convecção natural do

ar externo, na configuração chamada de Ar Natural (AN), ou com o auxílio de ventiladores que forcem a circulação de ar por entre os radiadores, na configuração chamada de Ar Forçado (AF). A configuração AF apresenta uma maior eficiência por aumentar o coeficiente de troca térmica entre os radiadores e o ambiente, porém apresenta mais custos, referentes à aquisição, instalação e manutenção dos ventiladores. Ainda, um mesmo transformador pode operar em ambas as configurações AN/AF, alternando entre elas de acordo com o seu carregamento através do acionamento e desligamento dos ventiladores (Nogueira et al. 2021; Kulkarni, Khaparde 2017).

Internamente, a circulação de óleo pode ocorrer de forma natural, baseada apenas na convecção natural do fluido interno, caracterizando a configuração chamada de Óleo Natural (ON). Contudo, em transformadores de potência é comum a utilização de bombas hidráulicas para aumentar a velocidade da circulação de óleo dentro do tanque (Nogueira et al. 2021; Kulkarni, Khaparde 2017). Na sequência serão apresentadas as configurações de Óleo Dirigido (OD) e Óleo Forçado (OF), objetos de estudo do presente artigo.

2.1 Óleo Dirigido (OD)

A configuração de óleo dirigido (OD), ilustrada na Fig. 1 (a), consiste na utilização de uma bomba hidráulica e estruturas internas que direcionam o óleo bombeado diretamente para dentro dos enrolamentos. A principal característica da configuração OD é fazer com que todo o óleo circule apenas por dentro dos enrolamentos, evitando que ele se disperse por outras regiões dentro do tanque. Isso faz com que todo o calor gerado pelos enrolamentos esteja constantemente sendo absorvido e transferido pelo óleo. Como resultado, tem-se uma distribuição de temperaturas mais homogênea ao longo da altura dos enrolamentos, evitando pontos mais quentes que podem comprometer a isolamento. Como desvantagem desta configuração destaca-se o custo da fabricação, a complexidade de montagem da estrutura interna que faz o direcionamento do óleo e o risco de falha da mesma, já que é feita em papel e pode sofrer deformações ao longo da operação.

2.2 Óleo Forçado (OF)

A configuração de óleo forçado (OF), ilustrada na Fig. 1 (b), também utiliza uma bomba hidráulica, mas, diferente da OD, não possui estruturas internas para direcionamento do óleo. Dessa forma, o óleo vindo da bomba adentra ao tanque e circula pelo caminho de menor resistência hidráulica. Diferente da configuração OD, no OF o óleo pode circular em paralelo por dentro e por fora dos enrolamentos. Por vezes, considera-se que o óleo forçado circula majoritariamente por fora dos enrolamentos, de forma que dentro deles a refrigeração ocorre apenas por convecção natural, apresentando temperaturas mais elevadas. Assim, no topo do transformador ocorre uma mistura do óleo quente que vem de dentro dos enrolamentos e do óleo frio que vem da bomba e circula por fora deles. Outra desvantagem desta configuração, que também ocorre na OD, é que se a bomba falhar, o caminho de circulação de óleo pelos radiadores é interrompido e o

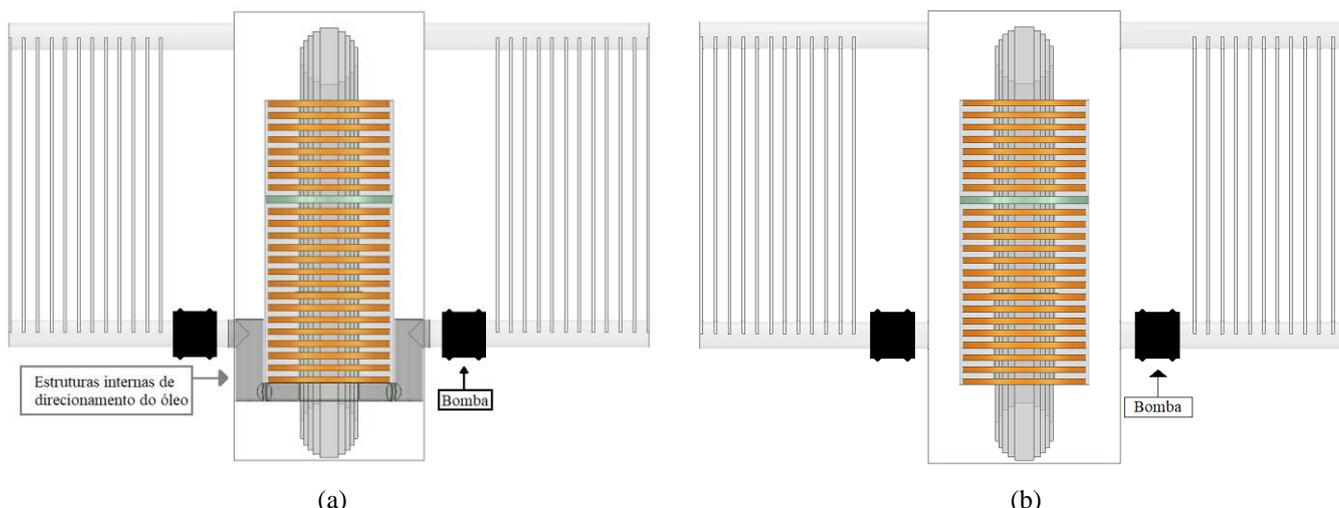


Fig. 1 Estrutura construtiva do transformador com sistema de arrefecimento com (a) OD e (b) OF.

transformador não é capaz de operar na configuração de óleo natural, acarretando a elevação súbita das temperaturas.

3. TRANSFORMADOR PROTÓTIPO

Os ensaios de aquecimento para o desenvolvimento do presente estudo foram realizados no transformador protótipo apresentado na Fig. 2. Este transformador é monofásico, com enrolamentos concêntricos de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT) separados em duas colunas com conexão central. As principais características elétricas e operativas são apresentadas na Tabela 1.

Para dissipar o calor gerado na sua parte ativa, o transformador possui quatro conjuntos de radiadores, cada um com doze fileiras de nove tubos elípticos. Ainda, possui dois ventiladores que podem ser utilizados para alternar da ventilação natural para a ventilação forçada. Contudo, no presente estudo, apenas a configuração AN é abordada.

Internamente, o transformador foi fabricado com estruturas que direcionam o óleo advindo da bomba hidráulica externa para dentro dos enrolamentos, conforme ilustrado na Fig. 1 (a), mantendo a configuração de óleo dirigido. Tais estruturas são passíveis de remoção, alternando o sistema de arrefecimento interno para óleo forçado, conforme ilustrado na Fig. 1 (b).



Fig. 2 Transformador protótipo e setup de ensaios.

Ainda, os enrolamentos de AT foram construídos com desvios de óleo alocados ao longo dos seus eixos axiais, conforme ilustra a Fig. 3. Esses desvios são estruturas fixadas que interrompem o fluxo de óleo nos canais axiais pelos discos onde são posicionados, de forma a forçar o óleo a circular pelos canais radiais entre discos e aumentar o desempenho térmico do equipamento.

O transformador foi fabricado e equipado com 27 sensores de fibra óptica distribuídos ao longo dos seus enrolamentos para medição de temperatura (conforme recomendado por CIGRÉ, 2016). A distribuição dos sensores também está ilustrada na

Tabela 1. Características do transformador protótipo

| Parâmetro | Especificação |
|--------------------------|----------------|
| Potência Nominal | 1,2 MVA |
| Tensão Nominal | 4400/440 V |
| Sistema de Arrefecimento | AN/AF OD/OF |
| Número de Radiadores | 4 |
| Enrolamento de AT | 60 discos |
| Enrolamento de BT | 60 discos |

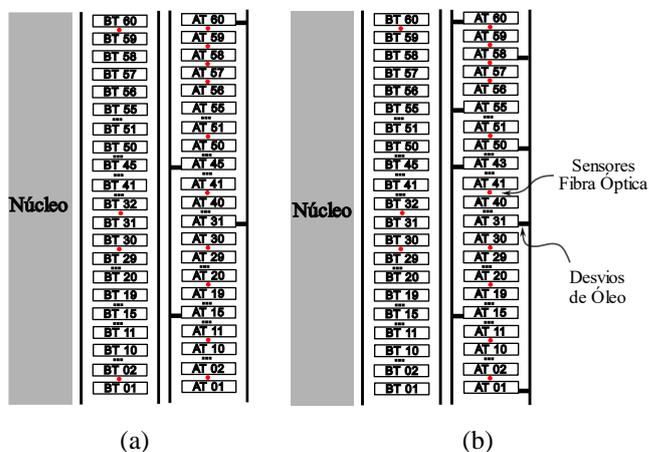


Fig. 3 Distribuição dos sensores de fibra óptica nos enrolamentos de (a) AT e (b) BT em ambas as colunas.

Fig. 3 (a posição das sondas é indicada pelos pontos vermelhos). Além dos enrolamentos, outros 4 sensores foram instalados para medição de temperatura nos seguintes pontos: topo do óleo, base de óleo, topo do radiador e núcleo.

4. ENSAIOS DE AQUECIMENTO

Os ensaios de aquecimento foram realizados conforme instruções da norma ABNT NBR 5356-2 (2007). O transformador foi aquecido mediante aplicação de carga conforme desejado pelo usuário e o fim do ensaio ocorre quando o gradiente de temperatura em todos os pontos medidos é inferior a 1°C em um intervalo de 3 horas (condição de regime permanente).

O setup de ensaios, visto na Fig. 2, é composto por uma bomba hidráulica de 1/2 CV, Fig. 4 (a), pelo equipamento de medição Qualitrol® Omniflex que faz a leitura dos sensores de fibra óptica, Fig. 4 (b), transformadores de potencial e de corrente para aquisição dos dados elétricos através de um analisador de potência Yokogawa® WT3000, um banco de capacitores, a caixa de comando da bomba e dos ventiladores, e uma câmera térmica Flir® A6753sc. Ainda, conforme ABNT NBR 5356-2 (2007), três sensores de fibra óptica foram posicionados no entorno do transformador para medição da média da temperatura ambiente.

Foram realizadas duas baterias de ensaios de aquecimento. A primeira consiste em 3 ensaios na configuração de óleo dirigido, variando a velocidade de circulação de óleo na saída da bomba hidráulica. Considerou-se como condição nominal uma vazão de 5 m³/h, que equivale a uma velocidade de 1 m/min nos canais de óleo da parte ativa. A partir disso, reduziu-se a velocidade de circulação para 0,8 e 0,5 m/min. A segunda bateria corresponde aos ensaios na configuração de óleo forçado, com a retirada das estruturas internas responsáveis pelo direcionamento do óleo. Para efeitos de comparação, mantiveram-se as mesmas três condições de velocidade de circulação de óleo da configuração OD. A Tabela 2 resume as condições em que foram realizados cada ensaio. Como os ensaios foram realizados sob diferentes

Tabela 2. Ensaios de aquecimento realizados

| Config. | Vazão (m/min) | Perdas Cobre (kW) | Perdas Núcleo (kW) | T_{amb} (°C) |
|---------|---------------|-------------------|--------------------|----------------|
| OD | 0,5 | 11,802 | 1,935 | 24,82 |
| | 0,8 | 11,802 | 1,935 | 24,72 |
| | 1,0 | 11,802 | 1,935 | 25,05 |
| OF | 0,5 | 14,468 | 1,961 | 32,00 |
| | 0,8 | 14,243 | 1,928 | 28,40 |
| | 1,0 | 14,328 | 1,956 | 30,30 |

temperaturas ambientes, para fins de comparação são analisadas apenas as elevações de temperatura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final das baterias de ensaios analisou-se as imagens obtidas com a câmera térmica e as temperaturas internas através das medições dos sensores de fibra óptica.

As imagens térmicas obtidas para os ensaios ODAN e OFAN são apresentadas na Fig. 5 (a) e Fig. 5 (b), respectivamente. As imagens são referentes aos ensaios sob a condição nominal de circulação de óleo de 1 m/min. Observa-se a nítida diferença do perfil de temperatura ao longo da parede do tanque. Devido à característica do sistema OD, o óleo circula somente por dentro dos enrolamentos, de modo que fora deles não há circulação significativa, resultando em uma distribuição linear da temperatura, desde a base do tanque até seu topo, onde se concentram as temperaturas mais quentes. Já no sistema OF, com o óleo forçado circulando por fora dos enrolamentos constantemente, o perfil de temperatura na parede do tanque se mostrou mais homogêneo entre a base e o topo.

A imagem térmica também possibilita verificar que há diferenças de temperaturas entre os lados esquerdo e direito do



(a)



(b)

Fig. 4 Setup de ensaios: (a) Bomba hidráulica e (b) Qualitrol® Omniflex.

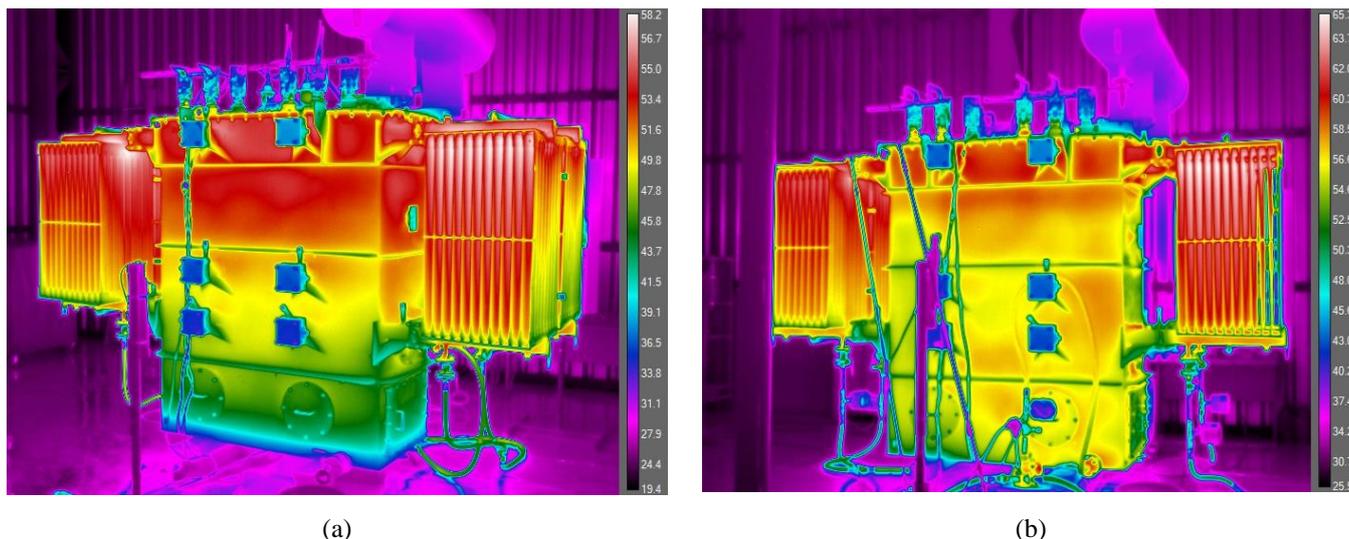


Fig. 5 Imagem térmica do ensaio para condição nominal para (a) ODAN e para (b) OFAN.

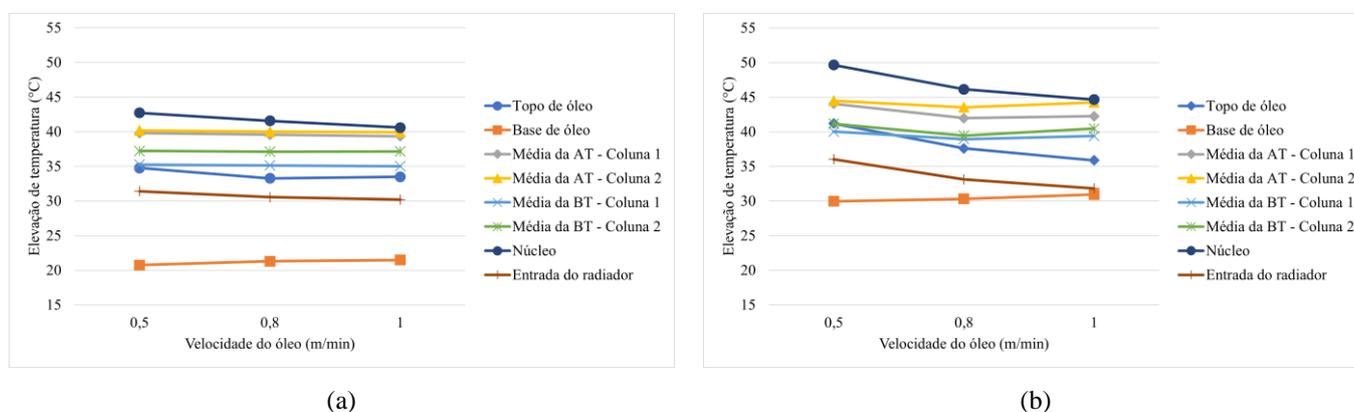


Fig. 6 Elevação de temperatura para diferentes velocidades de circulação de óleo para (a) ODAN e para (b) OFAN.

tanque na configuração OF. Isso ocorre, pois, a entrada do óleo forçado advindo da bomba está localizada no canto inferior direito da parede do tanque, de forma assimétrica. Portanto, verifica-se que a localização da entrada de óleo na configuração OF é um fator que causa interferência na distribuição das temperaturas internas.

Através das medições dos sensores de fibra óptica, é possível analisar o comportamento das temperaturas internas. A Fig. 6 (a) e a Fig. 6 (b) mostram as elevações de temperatura nos pontos externos aos enrolamentos para os ensaios ODAN e OFAN, respectivamente, para as três diferentes velocidades de circulação de óleo avaliadas. Nota-se que o comportamento do sistema OD diante da variação da bomba se manteve constante no que se refere às temperaturas externas aos enrolamentos e médias das bobinas. Ao comparar com os resultados do sistema OF, percebe-se a influência da variação da bomba em alguns pontos monitorados. As temperaturas de topo de óleo e de entrada do radiador são reduzidas à medida que a vazão de óleo aumenta, uma vez que esse óleo circula somente por fora dos enrolamentos e não carrega o calor gerado por eles para o topo do equipamento.

A influência mais significativa foi notada na temperatura de topo de óleo do caso OF, com uma redução de 5,3°C com o

aumento da velocidade de circulação. Com relação às temperaturas médias internas dos enrolamentos, na configuração OD não ocorrem variações significativas, conforme realiza-se a variação da velocidade do óleo. Dentro da faixa de velocidades analisada, a redução da velocidade não causou elevações de temperaturas, o que demonstra que mesmo com velocidades menores a circulação OD tem desempenho satisfatório.

Para a configuração OF, a velocidade de 0,8 m/min demonstra-se a mais adequada, sendo que um aumento de velocidade para 1 m/min resultou em elevações nas temperaturas. Nota-se que a análise individual do topo de óleo não representa o comportamento das temperaturas internas dos enrolamentos.

Por outro lado, as temperaturas pontuais medidas no interior dos enrolamentos mostraram-se com comportamentos diferentes para os dois sistemas. A Fig. 7 (a) ilustra a elevação de temperatura para os pontos da bobina de AT da Coluna 1 em ambos os sistemas e para as três velocidades avaliadas, enquanto o mesmo é ilustrado na Fig. 7 (b) para a Coluna 2. Analisando as temperaturas do sistema OD, nota-se que a variação da bomba exerce pouca influência na distribuição das temperaturas. O mesmo parece ocorrer no sistema OF, porém,

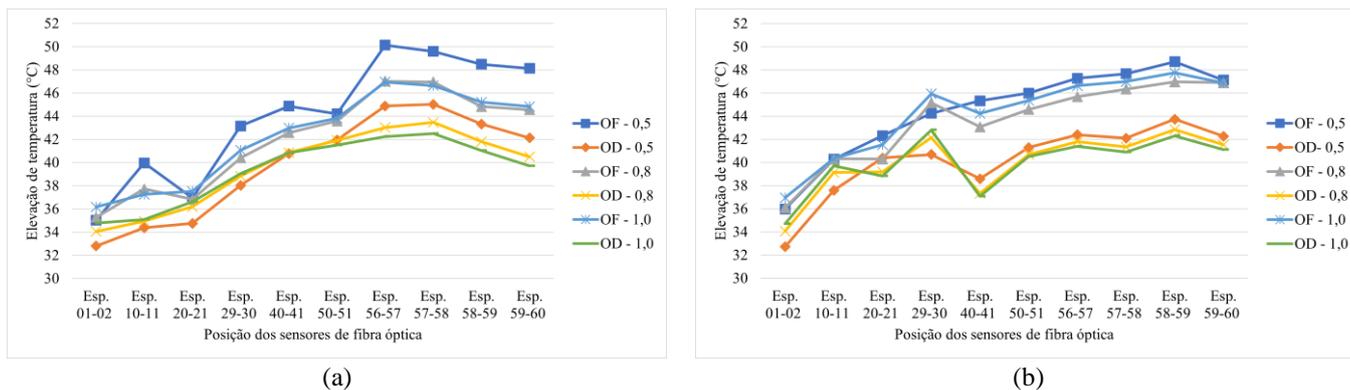


Fig. 7 Elevação de temperatura ao longo do enrolamento para diferentes velocidades de circulação de óleo na (a) AT Coluna 1 e na (b) AT Coluna 2.

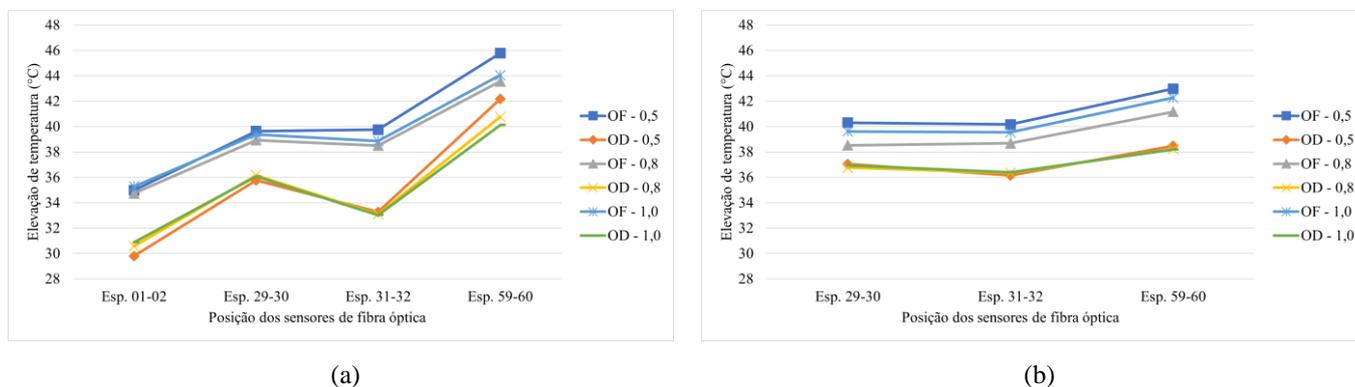


Fig. 8 Elevação de temperatura ao longo do enrolamento para diferentes velocidades de circulação de óleo na (a) BT Coluna 1 e na (b) BT Coluna 2.

nesse caso, percebe-se diferenças de comportamento entre as duas colunas. Na Coluna 1, com menos desvios de óleo, teve-se um aumento de 3,2°C na temperatura de *hotspot*, operando com a bomba no nível mínimo, sendo a diferença mais significativa observada. Enquanto a Coluna 2, com mais desvios de óleo, apresentou comportamento semelhante para os três níveis de bomba. Nota-se, também, que as temperaturas da Coluna 2 sob regime OF apresentaram uma diferença maior para as do regime OD do que as observadas da Coluna 1. Percebe-se, portanto, um efeito causado pela inserção de desvios de óleo no construtivo das bobinas. Ao inserir tais desvios, a resistência hidráulica das bobinas é modificada e, o que pode ser benéfico para um sistema de arrefecimento pode ser prejudicial para outro.

Os comportamentos térmicos das bobinas de BT também são analisados, conforme ilustram a Fig. 8 (a) e Fig. 8 (b) para a Coluna 1 e para a Coluna 2, respectivamente. Salienta-se que o sensor instalado no canal entre as espiras 01 e 02 da Coluna 2 foi danificado durante a fabricação do equipamento, de modo a não se ter esse ponto para avaliação e comparação. Novamente, o regime OD não apresenta diferenças diante da variação da velocidade de circulação de óleo, diferente do OF, que apresenta temperaturas mais elevadas à medida que a vazão de óleo diminui. Nenhuma das bobinas de BT possui desvios de óleo, porém a diferença de temperatura entre as duas colunas pode ser explicada por possíveis diferenças durante a etapa de fabricação e também pelo conjunto da

coluna inteira, uma vez que as bobinas são concêntricas às de AT.

6. CONCLUSÕES

Manter as temperaturas internas dos transformadores de potência dentro dos limites estipulados por normas é essencial para garantir sua correta e segura operação, além de evitar o envelhecimento acelerado da sua isolamento sólida. Nesse sentido, o presente trabalho apresentou uma análise do desempenho térmico de transformadores que operam com sistemas de arrefecimento com óleo dirigido e forçado, através de ensaios de aquecimento de um protótipo equipado com 31 sensores de fibra óptica, proporcionando uma medição detalhada das temperaturas internas.

Verificou-se que ambos os sistemas apresentam comportamentos térmicos diferentes sob as mesmas condições de perdas e velocidade de circulação de óleo. A partir das imagens térmicas, percebe-se o impacto da circulação do óleo por fora dos enrolamentos nas temperaturas nas paredes do tanque. O fato de o óleo circular apenas por fora dos enrolamentos no regime de OF também faz as temperaturas de topo e entrada do radiador serem reduzidas. Contudo, isso pode levar a tomadas de decisão errôneas, já que as temperaturas dentro dos enrolamentos apresentam valores bastante superiores e acabam por ser mascaradas. No OD, como o óleo circula por dentro dos enrolamentos, essa diferença para as temperaturas de topo é menor.

Em relação ao impacto da variação da velocidade de circulação de óleo a partir da bomba hidráulica, verificou-se que o sistema OD praticamente não apresenta diferenças. Já o OF apresentou diferenças mais consideráveis, principalmente para a vazão mínima avaliada. A variação na velocidade também demonstra que, embora haja uma redução na temperatura de topo de óleo considerável, o mesmo não é válido para os enrolamentos, sendo a estimativa das temperaturas na parte ativa fundamental, seja por meio de modelos matemáticos ou por medições por sensores. Ainda, ao reduzir a vazão no caso OF, aproximando cada vez mais de um caso ON, percebeu-se a influência da inserção dos desvios de óleo nas bobinas de AT.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer à Companhia Paranaense de Energia (Projeto de P&D PD-06491-0421/2016), VEGOOR Tecnologia Aplicada, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM, Instituto de Redes Inteligentes da UFSM e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Geração Distribuída pelo apoio técnico e financeiro deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2007). NBR 5356-2: Aquecimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2017). NBR 5356-7: Guia de carregamento para transformadores imersos em líquido isolante. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Chi, C., Yang, F., Xu, C., Cheng, L., Yang, C. (2022). A multi-scale thermal-fluid coupling model for ONAN transformer considering entire circulating oil systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 135.
- CIGRÉ (2016). Transformer Thermal Modelling, *Working Group A2.38*.
- Daghrah, M., Zhang, X., Wang, Z., Liu, Q., Jarman, P., Walker, D. (2020). Flow and temperature distributions in a disc type winding-part I: Forced and directed cooling modes, *Applied Thermal Engineering*, Volume 165.
- IEC (2011). Std 60076-2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. International Electrotechnical Commission.
- IEC (2018). Std 60076-7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. International Electrotechnical Commission.
- Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. (2017) Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. CRC press.
- Liu, G., Zheng, Z., Ma, X., Rong, S., Wu, W., Li, L. (2019). Numerical and Experimental Investigation of Temperature Distribution for Oil-Immersed Transformer Winding Based on Dimensionless Least-Squares and Upwind Finite Element Method, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 119110-119120.
- Nogueira, G.C., Medeiros, L.H., Oliveira, M.M., Barth, N.D., Bender, V.C., Marchesan, T.B., Falcão, C.E.G. (2021). Thermal Analysis of Power Transformers with Different Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics. *J Control Autom Electr Syst*.
- Radakovic, Z.R., Sorgic, M.S. (2010). Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 790-802.
- Radakovic, Z., Sorgic, M., Van der Veken. W., Claessens, G. (2012). Ratings of Oil Power Transformer in Different Cooling Modes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 618-625.
- Rahimpour, E., Barati, M., Schäfer, M. (2007). An investigation of parameters affecting the temperature rise in windings with zigzag cooling flow path, *Applied Thermal Engineering*, Volume 27, Issues 11–12, Pages 1923-1930.
- Stebel, M., Kubiczek, K., Rodriguez, G.R., Palacz, M., Garelli, L., Melka, B., Haida, M., Bodys, J., Nowak, A.J., Lasek, P., Stepien, M., Pessolani, F., Amadei, M., Granata, D., Storti, M., Smolka, J. (2022). Thermal analysis of 8.5 MVA disk-type power transformer cooled by biodegradable ester oil working in ONAN mode by using advanced EMAG–CFD–CFD coupling, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 136.
- Torriano, F., Campelo, H., Quintela, M., Labbé, P., Picher, P. (2018). Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 69, Pages 62-72.