

## Análise do Comportamento Térmico de um Transformador de Potência Através do Uso de Sensoriamento por Fibras Ópticas

L. H. Medeiros\*, M. M. Oliveira\*, A. M. Kaminski Jr.\*, P. O. Bacin\*, R. C. Beltrame\*, C. E. G. Falcão\*, V. C. Bender\*, T. B. Marchesan\*, J. B. Ferreira Neto\*\*, H. M. Wilhelm\*\*\*, L. P. Dill\*\*\*

\**Instituto de Redes Inteligentes, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil (e-mail: leonardo.medeiros@acad.ufsm.br)*

\*\* *Santo Antônio Energia, Porto Velho, Brasil (e-mail: joseferreira@santoantonioenergia.com.br)*

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

**Abstract:** Power transformers are essential equipments for the proper functioning of the electrical power system. Therefore, there is a need to provide solutions that extend their useful life and monitoring methods to avoid failures and consequently losses to electrical companies. This work presents a series of tests carried out in a prototype transformer built specifically for the purpose of studying the internal thermal behavior, using optical fibers to obtain the direct measurement of the winding temperatures. Thus, analysis of thermal phenomena that occur under different operating conditions are presented, discussing these phenomena from the perspective of temperature rise and loss of life, aiming to reconcile theory with the actual behavior of a transformer, suggesting adequate operating conditions, and also serving as a basis for future thermal studies in power transformers.

**Resumo:** Transformadores de potência são equipamentos essenciais para o funcionamento adequado do sistema elétrico. Portanto, existe a necessidade de apresentar soluções que prolonguem sua vida útil e métodos de monitoramento para evitar falhas e consequentemente prejuízos às concessionárias. O presente trabalho apresenta uma série de ensaios realizados em um transformador protótipo construído especificamente para estudar o comportamento térmico interno. Foram empregadas fibras ópticas para obter a medição direta da temperatura nos enrolamentos. Dessa forma, são apresentadas análises dos fenômenos térmicos que ocorrem para diversas condições operativas, discutindo acerca desses fenômenos sob a perspectiva da elevação de temperatura e perda de vida útil, visando conciliar teoria com o comportamento real de um transformador, sugerindo condições de operação adequadas e, também, servindo de base para futuros estudos térmicos em transformadores.

**Keywords:** Power Transformer; Temperature Rise Test; Thermal Performance; Cooling System; Optical Fibers; Prototype Unit.

**Palavras-chaves:** Transformador de Potência; Ensaio de Aquecimento; Desempenho Térmico; Sistema de Arrefecimento; Fibras Ópticas; Unidade Protótipo.

### 1. INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são essenciais para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Mesmo com uma elevada eficiência, parte da energia elétrica processada é convertida em calor, aumentando a temperatura do equipamento, sendo este o fator crítico que determina o seu carregamento e limita a sua vida útil (Stebel et al. 2021; Radakovic et al. 2012). Isso ocorre por conta de o isolante sólido empregado em transformadores ser a base de celulose, tendo seu envelhecimento acelerado quando submetido à altas temperaturas. Uma vez que haja o comprometimento da isolamento sólida, o equipamento atinge o fim da sua vida útil (Liu et al. 2019).

Diante disso, normas determinam valores limites das temperaturas internas, a fim de garantir a operação correta e segura do equipamento, além de evitar a aceleração do seu envelhecimento (ABNT, 2007 e 2017; IEC, 2011 e 2018). Para garantir tais limites, é necessário um sistema de

arrefecimento eficiente que dissipe o calor gerado na parte ativa para o ambiente externo. Tal sistema de arrefecimento consiste na circulação dos fluidos interno (óleo isolante) e externo (geralmente ar). Esses sistemas de arrefecimento podem funcionar à base da convecção natural dos fluidos ou, para melhorar o desempenho térmico, com o auxílio de bombas e ventiladores (Kulkarni, Khaparde 2017).

Para auxiliar no projeto térmico de transformadores, ferramentas, como modelos termo-hidráulicos e simulações computacionais da dinâmica dos fluidos (CFD), têm sido empregadas (Radakovic et al. 2012; Nogueira et al. 2021; Chi et al. 2022). Fazendo uso dessas técnicas é possível obter a distribuição da vazão de óleo e as temperaturas ao longo dos enrolamentos e dos radiadores a partir de dados construtivos e operacionais.

O monitoramento das temperaturas em tempo real também é essencial para garantir a operação segura do transformador, servindo como informação para possíveis tomadas de

decisão, como redistribuição do carregamento e levantamento de ativos para manutenção e/ou substituição. Geralmente, sensores PT100 (Rahimpour et al. 2007) e sensores do tipo termopar são utilizados para a medição de temperatura ao longo dos enrolamentos (Torriano et al. 2018; Liu et al. 2019; Daghrah et al. 2020), porém, por conta de suas características construtivas, não são o método mais adequado. Nesse sentido, recomenda-se o uso de sensores de fibras ópticas ao longo dos enrolamentos. Contudo, em virtude do custo de instalação e da fragilidade das fibras, que interferem na manufatura e na manutenção, essa ainda não é uma prática amplamente empregada.

Diante desse cenário, ter o conhecimento do desempenho térmico do transformador e do seu sistema de arrefecimento é fundamental para se garantir uma operação segura e prolongar a sua vida útil. O presente artigo tem como objetivo demonstrar e discutir os fenômenos térmicos que ocorrem em transformadores de potência para variadas situações operativas, servindo também como base para futuros estudos que empreguem um transformador com medição direta da temperatura nos enrolamentos. Desse modo, é apresentada uma análise do desempenho térmico de um transformador protótipo com sistema de arrefecimento do tipo Óleo Dirigido e Ar Forçado/Natural (ODAF/AN). Foram realizados ensaios de aquecimento variando parâmetros do sistema de arrefecimento, tais como a velocidade da bomba, número de ventiladores e número de radiadores. A medição da temperatura é feita através de 27 fibras ópticas distribuídas ao longo dos enrolamentos, permitindo uma análise precisa de cada situação. Ao final do trabalho são discutidos os efeitos da perda total ou parcial do sistema de arrefecimento, e é realizada uma análise de vida útil com o intuito de comparar sob esta perspectiva as diferentes condições de operação às quais o transformador é submetido.

## 2. COMPORTAMENTO TÉRMICO

Para compreender as características do sistema de arrefecimento e seu o impacto na operação do transformador, é preciso compreender o seu comportamento térmico, que pode ser representado pelo caminho fechado de óleo ilustrado na Fig. 1. O óleo é aquecido circulando pela parte ativa (trecho AB) e resfriado pelas paredes do tanque (trecho BC) e pelos radiadores (trecho CD). Assume-se que o óleo resfriado da base do radiador adentra aos enrolamentos na mesma temperatura (trecho DA) (Radakovic, Sorgic 2010; Kulkarni, Kharparde 2017). A seguir são apresentadas as configurações

de sistemas de arrefecimento e suas principais características.

### 3.1 Arrefecimento Interno

O arrefecimento interno consiste no modo como o óleo circula por entre a parte ativa, principalmente entre os enrolamentos, e influencia diretamente no trecho AB da Fig. 1. Essa circulação pode ser de modo natural (Óleo Natural – ON), a partir apenas do processo de convecção natural do óleo, onde o óleo aquecido pelos enrolamentos ascende e o resfriado pelos radiadores descende, ou com o auxílio de bombas hidráulicas. Utilizando uma bomba hidráulica externa, há duas opções de circulação do óleo. A primeira é denominada Óleo Forçado (OF), onde a bomba força a circulação do óleo frio para dentro do tanque, fazendo com que uma parcela circule por dentro e outra por fora dos enrolamentos. A segunda é a chamada Óleo Dirigido (OD), em que a bomba força a circulação do óleo para dentro dos enrolamentos na sua totalidade, através de estruturas que realizam esse direcionamento. A configuração ON não possui um desempenho térmico tão bom quanto a OD, contudo é a mais confiável e econômica, uma vez que não utiliza bombas. Percebe-se, portanto, uma forte relação entre custo e desempenho, uma vez que a utilização de bombas eleva a troca térmica, porém implica em custos de aquisição, manutenção e monitoramento.

### 3.2 Arrefecimento Externo

O arrefecimento externo é classificado de modo semelhante ao interno, podendo ser natural ou forçado, ocorrendo no trecho CD da Fig. 1. O arrefecimento natural (Ar Natural – AN) depende exclusivamente da convecção natural do ar externo através dos radiadores do transformador. Já o arrefecimento forçado (Ar Forçado – AF) utiliza ventiladores acoplados aos conjuntos de radiadores, forçando a circulação do ar e aumentando a troca térmica. Novamente, tem-se o compromisso entre desempenho e custos, uma vez que a utilização de ventiladores eleva consideravelmente a troca térmica nos radiadores, mas necessita de investimentos para sua aquisição, manutenção e monitoramento.

## 3. TRANSFORMADOR PROTÓTIPO

Para os ensaios de aquecimento apresentados neste artigo, empregou-se um transformador protótipo, apresentado na Fig. 2. O referido transformador, cujas principais características elétricas e operativas são sumarizadas na Tabela 1, é monofásico, com os enrolamentos concêntricos de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT) distribuídos em duas colunas com conexão central.

Em relação ao seu sistema de arrefecimento, o transformador foi fabricado com estruturas internas que direcionam o óleo para dentro dos enrolamentos (configuração OD). No seu tanque são acoplados 4 conjuntos de radiadores de tubos elípticos, formados por 12 fileiras com 9 tubos cada. A conexão dos radiadores ao tanque possui uma válvula que, quando fechada, permite operar o transformador com um número menor de conjuntos e, portanto, menor capacidade de

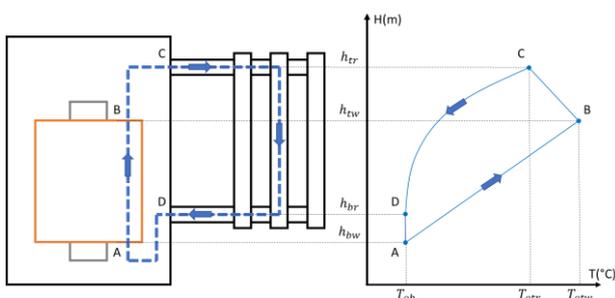


Fig. 1 Comportamento térmico do transformador.



Fig. 2 Transformador protótipo e *setup* de ensaios.

arrefecimento. Em dois dos conjuntos são instalados ventiladores para ventilação forçada no ambiente externo. Logo, é possível operar na configuração AN ou AF.

Para medição de temperatura, o transformador foi fabricado com 27 sensores de fibras ópticas distribuídos ao longo dos enrolamentos. A Fig. 3 ilustra essa distribuição, representando a posição das sondas pelos pontos em

**Tabela 1. Características do transformador protótipo**

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Potência          | 1,2 MVA    |
| Tensão Nominal    | 4400/440 V |
| Perdas Núcleo     | 1,946 kW   |
| Perdas Cobre (AT) | 7,651 kW   |
| Perdas Cobre (BT) | 6,683 kW   |

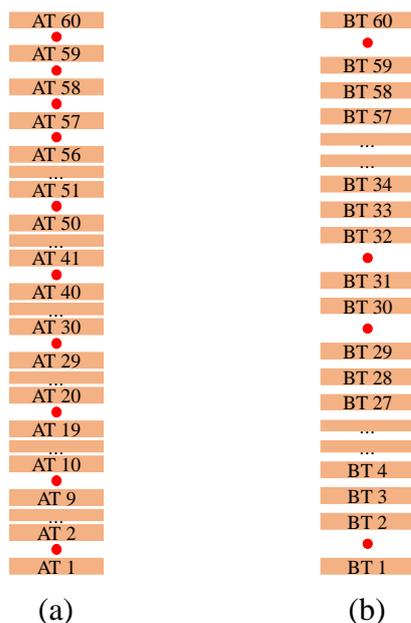


Fig. 3 Distribuição dos sensores de fibra óptica nos enrolamentos de (a) AT e (b) BT em ambas as colunas.



Fig. 4 Equipamento Qualitrol® Omniflex.

vermelho. Além dos sensores nos enrolamentos, foram instalados um sensor para medir cada uma das seguintes temperaturas: topo do óleo, base de óleo, topo do radiador e núcleo.

#### 4. SETUP DE ENSAIO

O *setup* de ensaio visto na Fig. 2 é composto por uma bomba hidráulica de 1/2 cv, pelo equipamento de medição Qualitrol® Omniflex que faz a leitura dos sensores de fibra óptica, Fig. 4, transformadores de potencial e de corrente para aquisição dos dados através de um analisador de potência Yokogawa® WT3000, um banco de capacitores e a caixa de comando da bomba e dos ventiladores. 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.

#### 5. ENSAIOS DE AQUECIMENTO

Nesta seção são apresentados os ensaios de aquecimento realizados no transformador protótipo. Foram realizadas quatro seqüências de ensaios: (i) variação da velocidade da bomba; (ii) variação do número de ventiladores; (iii) variação do número de radiadores; e (iv) perda total do sistema de arrefecimento. Todos os ensaios foram realizados de acordo com as instruções da norma ABNT NBR 5356-2 (2007), onde o ensaio de aquecimento é finalizado quando não há variação superior a 1°C no gradiente da elevação de temperatura para todos os pontos de medição em um intervalo de três horas. Este critério não se aplica apenas ao último ensaio, que envolve a perda total do sistema de arrefecimento, onde o ensaio é encerrado quando a temperatura no *hotspot* atinge um valor máximo de referência. O transformador foi ensaiado com as respectivas perdas apresentadas na Tabela 1.

##### 5.1 Variação da Velocidade da Bomba

A seqüência de ensaios correspondente à variação da velocidade da bomba compreende três ensaios com o protótipo alimentado em sua configuração nominal de perdas nos enrolamentos e no núcleo. Com os ventiladores responsáveis pelo arrefecimento externo desligados (condição

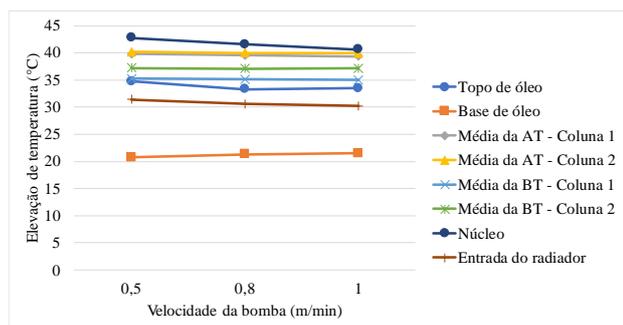


Fig. 5 Comparação de elevação de temperatura para diferentes velocidades de circulação de óleo.

AN), foram avaliadas três configurações de velocidade dos canais de óleo: 0,5 m/min, 0,8 m/min e 1,0 m/min.

A Fig. 5 apresenta os resultados de elevação de temperatura, com respeito à temperatura ambiente, nos diversos pontos de medição internos para as diferentes velocidades de circulação do óleo isolante.

A Tabela 2 apresenta os resultados para os pontos de maior interesse, comparando a variação de temperatura medida para as diferentes velocidades de circulação do óleo. Verificado o impacto da velocidade da bomba de óleo nas temperaturas do transformador, observa-se que, na unidade protótipo desenvolvida, a operação com velocidades diferentes da velocidade nominal, valor adotado como padrão em transformadores de potência, não causa interferência significativa nas temperaturas internas.

### 5.2 Variação do Número de Ventiladores

Na sequência, foram reproduzidos cenários em que ocorre a saída de operação de ventiladores. As configurações adotadas, todas com velocidade de escoamento do óleo de 1,0 m/min, foram as seguintes: dois ventiladores ligados, simulando a condição normal de arrefecimento; um ventilador ligado, simulando a perda de 50% do sistema de arrefecimento a ar; e nenhum ventilador ligado, simulando a perda total do sistema de arrefecimento a ar.

A sequência de ensaios inicia-se com o transformador em sua configuração nominal de arrefecimento e, após atingir o equilíbrio térmico, um dos ventiladores é desligado. Assim que a nova configuração atinge novamente o equilíbrio térmico estabelecido pelos critérios do ensaio de aquecimento, o segundo ventilador é desligado. A Fig. 6 e

**Tabela 2. Resultados da elevação de temperatura para variações na velocidade do óleo**

| Vel. Óleo      | 1,0 m/min (Ref.) | 0,8 m/min   | 0,5 m/min   |
|----------------|------------------|-------------|-------------|
| Hotspot (°C)   | 33,5             | 33,3 (-0,2) | 34,8 (+1,3) |
| Topo-Óleo (°C) | 42,5             | 43,5 (+1,0) | 45,0 (+2,5) |

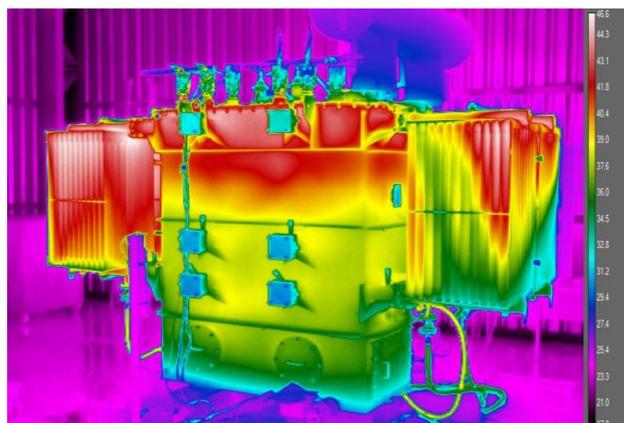


Fig. 6 Perda de ventilação nos radiadores do lado esquerdo.

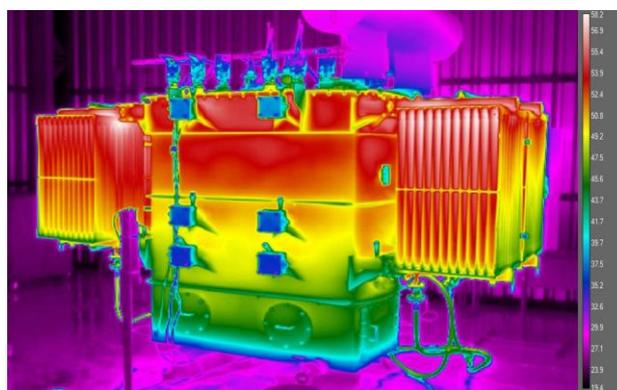


Fig. 7 Perda de ventilação nos radiadores de ambos os lados.

Fig. 7 apresentam as diferenças de temperatura nos radiadores obtida com o uso de uma câmera térmica Flir® A6753sc.

A Tabela 3 apresenta os resultados da variação da elevação de temperatura para as diferentes configurações nos pontos de maior interesse do transformador. Desta vez, é possível observar um impacto significativo, conforme a perda no sistema de arrefecimento é mais severa, evidenciando uma elevação significativa quando há perda de ventiladores. Com um ventilador a menos, observa-se uma elevação de 5,3°C nas temperaturas de *hotspot*, chegando à 15,6°C, sem os dois ventiladores.

### 5.3 Variação do Número de Aerotermos

Na sequência é analisada a operação do transformador com a perda de um aerotermo, ou seja, não perdendo apenas o ventilador, mas também interrompendo a circulação de óleo. Essa condição pode ser observada na Fig. 8. A velocidade interna de escoamento do óleo empregada neste ensaio é de 1,0 m/min.

A sequência de ensaios inicia-se com o transformador em sua configuração nominal de arrefecimento. A Tabela 3 apresenta a diferença da elevação de temperatura para a configuração adotada em relação à operação nominal do transformador. A

**Tabela 3. Resultados da perda parcial do sistema de arrefecimento**

|                   | 2 Ventiladores (Nom.) | Perda 1 Ventilador | Perda 1 Aerotermo | Perda 2 Ventiladores |
|-------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| Hotspot (°C)      | 29,9                  | 35,2 (+5,3)        | 37,8 (+8,0)       | 45,5 (+15,6)         |
| Topo-Óleo (°C)    | 18,5                  | 24,4 (+5,9)        | 27,8 (+9,3)       | 36,3 (+17,8)         |
| Redução Vida Útil | 0% (referência)       | 48,6%              | 62,9%             | 85,1%                |

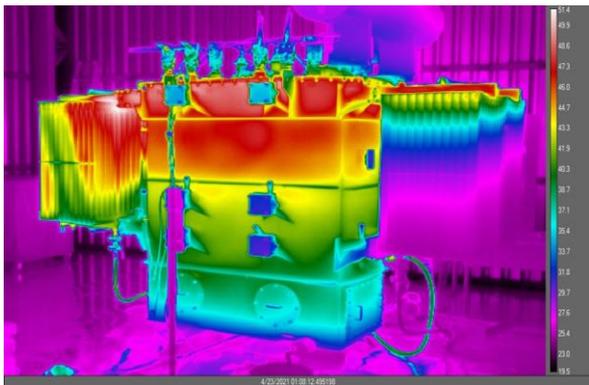


Fig. 8 Perda de um aerotermo (radiadores e ventilador) no lado direito.

perda de um aerotermo, ou seja, do conjunto de um ventilador e da circulação de óleo nos radiadores pertencentes ao respectivo ventilador, elevou a temperatura de *hotspot* em 8°C.

#### 5.4 Perda do Sistema de Arrefecimento Completo

A configuração do ensaio para determinação dos resultados de perda total do sistema de arrefecimento consiste na operação do transformador em regime e, na sequência, o desligamento completo (bomba e ventiladores) do sistema de arrefecimento. Por questões de segurança, a temperatura máxima de *hotspot* foi limitada a 105°C.

Esse ensaio foi realizado com o transformador operando em condições nominais de perdas e sem ventiladores ligados, até o ponto de estabilização. A partir desse momento, é realizada uma desenergização momentânea, que possibilita o fechamento dos radiadores com segurança. A partir desse instante, o transformador é energizado com a potência anterior, com a bomba de óleo desligada e os radiadores fechados, havendo somente dissipação do calor gerado através do tanque do transformador.

Essa configuração é realizada para aproximar o efeito da perda total do sistema de arrefecimento do transformador. Na Fig. 9 e Fig. 10 é possível observar as dinâmicas das temperaturas ao longo do transformador. Observa-se uma dinâmica térmica de 33,65°C/h para a temperatura nos enrolamentos e 11,35°C/h na temperatura de topo de óleo, demonstrando que outros métodos de monitoramento, como

imagem térmica podem ser ineficientes em prever situações de perda do sistema de arrefecimento (total ou parcial).

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Considerações Sobre a Perda de Vida Útil

Analisou-se, também, a redução da vida útil do transformador devido à elevação nas temperaturas observadas nos ensaios. A elevação de temperatura acelera o processo de degradação da isolamento sólida do transformador, sendo o cálculo de degradação utilizado apresentado pela norma IEC 60076-7 (2018). As premissas adotadas são que a vida útil da isolamento do equipamento é de 150 mil horas, e os aspectos de umidade e acidez não são considerados. O cálculo inicia-se com a determinação da vida útil do equipamento, quando este opera com seu sistema de arrefecimento nominal (2 ventiladores e circulação de óleo isolante por todos os radiadores). A partir da temperatura de *hotspot* observada, o cálculo de degradação indica o tempo que deverá ser transcorrido para que a isolamento do equipamento sob esta temperatura chegue ao final da vida útil, e conseqüentemente ao final da vida útil do transformador. Adota-se, portanto, este resultado como sendo a vida útil total do transformador, configurando o cenário base

A partir do cenário base, foi determinada a vida útil total do transformador na temperatura observada quando há falhas no sistema de arrefecimento, resultando na porcentagem de redução da vida útil total observada nos diferentes cenários, conforme sumarizado na Tabela 3. Observou-se que a perda

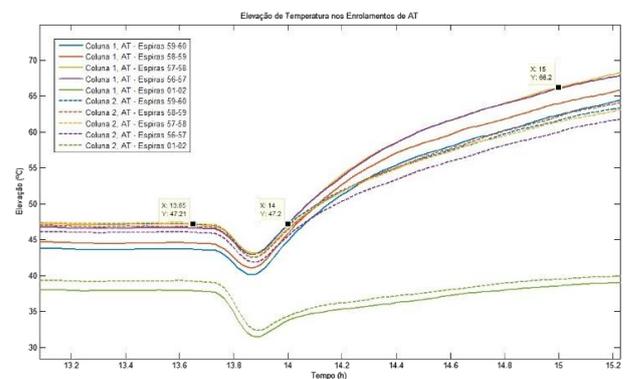


Fig. 9 Elevação de temperatura nos enrolamentos de AT.

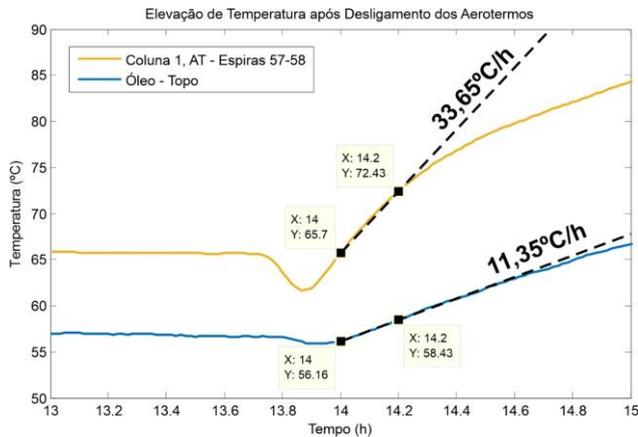


Fig. 10 Elevação de temperatura após desligamento completo do sistema de arrefecimento.

de um ventilador resulta em uma redução na vida útil do equipamento de 48,6%. Já a condição de perda de um aerotermino, situação que reduz em 50% a capacidade do sistema de arrefecimento do transformador, resulta em uma redução de 62,9% da vida útil total do equipamento. Por fim, a perda dos dois ventiladores, operando em uma configuração de ar natural somente, implica em uma redução de 85,1% da vida útil, quase o dobro de quando o equipamento perdeu apenas um dos ventiladores.

## 6.2 Resultados dos Ensaios de Aquecimento na Unidade Protótipo

A partir da realização dos ensaios obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A variação da velocidade da bomba (dentro dos limites analisados) não apresentou influência significativa na temperatura final;
- A perda de aeroterms causou uma acentuada elevação na temperatura, o que influencia na vida útil do equipamento a longo prazo, representando redução de até 63% da vida útil quando o transformador ensaiado perde 50% do seu sistema de arrefecimento, e de até 85% quando perde toda a refrigeração externa forçada.

## 7. CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma série de ensaios realizados em um transformador protótipo construído com fibras ópticas para realizar a medição direta de temperatura em seus enrolamentos. Os ensaios realizados abrangeram diferentes velocidades de escoamento do óleo, perdas parciais e totais de ventiladores, perda de radiadores e a perda total do sistema de arrefecimento. Os resultados apresentados demonstraram os diferentes impactos dos sistemas de arrefecimento na temperatura interna do equipamento, sendo analisados inclusive sob a perspectiva da perda de vida útil.

Constatou-se que a perda de um e dois ventiladores pode resultar em uma redução na vida útil do equipamento de 48,6% e 85,1%, respectivamente, devido à elevação de temperatura observada. Já a condição de perda de um

aerotermino, situação que reduz pela metade a capacidade do sistema de arrefecimento do protótipo, resultará em uma redução de 62,9% da vida útil total do equipamento. Observou-se também que a dinâmica térmica da temperatura do óleo isolante do transformador é menor que a dinâmica térmica nos enrolamentos. Portanto, sistemas que utilizam a temperatura de topo de óleo ou imagem térmica para monitoramento das temperaturas de transformadores podem apresentar uma velocidade reduzida de detecção de dinâmicas rápidas de temperatura devido a perda do sistema de arrefecimento (total ou parcial).

## 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 Santo Antônio Energia (Projeto de P&D PD-06683-0318/2018), VEGOOR, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica 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.
- 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.
- 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.
- Daghray, 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.
- 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.