DOI: 10.48011/asba.v2i1.1483

Análise Térmica de Transformadores de Potência com Diferentes Sistemas de Refrigeração Através da Dinâmica de Fluidos Computacional

**Gabriel C. Nogueira, Leonardo H. Medeiros,
Micael M. Oliveira, Daniel N. Barth,
Vitor C. Bender, Carlos E. G. Falcão,
Tiago B. Marchesan**

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

Abstract: This article performs a thermal study through the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) of six transformer prototypes, differentiated for the cooling system. The prototypes were computationally designed and simulated in the ANSYS CFX © software. It was possible to analyze the numerical temperature data at the hotspot, at the top of the oil and at the average temperature, thus comparing the thermal performance of each system and implementing the data in the methodology for estimating the lifespan of the transformer standardized by IEEE C57.100 -2011. In addition, the rendering of the results allows visualizing the thermal distribution, consequently, the performance for each refrigerator system.

Resumo: O presente artigo realiza o estudo térmico através da aplicação da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) em seis protótipos de transformadores, diferidos pelo sistema de refrigeração. Os protótipos foram desenhados computacionalmente e simulados no programa ANSYS CFX®. Foi possível analisar dados numéricos de temperatura no ponto mais quente, no topo de óleo e temperatura média, e assim, comparar o desempenho térmico de cada sistema e implementar os dados à metodologia de estimativa da vida útil do transformador fornecida pela IEEE C57.100-2011. Além disso, a renderização dos resultados permitiu visualizar a distribuição de temperatura, consequentemente, o desempenho de cada sistema refrigerador.

Keywords: Computational fluid dynamics; Insulating oil; Refrigeration system; Power transformer; Lifespan.

Palavras-chaves: Dinâmica de fluidos computacional; Óleo isolante; Sistema de refrigeração; Transformador de potência; Vida útil.

1. INTRODUÇÃO

A distribuição e transmissão de eletricidade requerem o uso de transformadores de potência, portanto são componentes vitais e estratégicos de qualquer sistema de energia elétrica (Fernández, 2016).

O estudo térmico dos transformadores refrigerados a óleo é importante para o correto dimensionamento do sistema de refrigeração necessário para dissipar as perdas, sem que as elevações de temperatura dos enrolamentos e do óleo ultrapassem os valores especificados pelas normas, de acordo com a classe térmica dos materiais empregados na construção (Ries, 2007).

Dentre todos os fatores que têm efeito na vida útil do transformador, a temperatura é o principal agente determinante desse parâmetro. A elevação da temperatura acontece em função das perdas que ocorrem no dispositivo elevando a energia térmica que deve ser transferida ao ambiente. Essa transferência de calor é responsável pela manutenção das condições de operação nominais do transformador (Iaronka, 2014).

Na prática, os fabricantes de transformadores garantem uma vida útil maior se esse equipamento operar respeitando os limites térmicos impostos pela normativa. Porém, a distribuição de temperatura dentro do transformador refrigerado a óleo não é uniforme, fazendo com que regiões específicas apresentem temperaturas elevadas em relação a totalidade e, consequentemente, aumentando a taxa de degradação do isolante naquela região, resultando na redução da vida útil do equipamento como um todo.

A troca de calor para o ambiente em transformadores imersos em óleo é feita pelo seu sistema de refrigeração, que pode ser composto por radiadores e sistemas de ventilação externa e bombeamento interno, dependendo da sua aplicação. Os transformadores são classificados, portanto, quanto ao sistema de refrigeração empregado, com diferentes tipos de circulação para os fluidos interno e externo.

O estudo e mapeamento da distribuição de temperatura dentro de transformadores refrigerados a óleo permite o desenvolvimento técnico e de operação desse equipamento. Desse modo, é possível desenvolver projetos com performances térmicas mais eficientes e, assim, assegurar uma maior vida útil do equipamento em operação e segurança durante o seu uso.

Considerando o elevado custo da produção de protótipos e equipamentos de medição, como sistemas de fibras óticas, a engenharia assistida por computador (CAE) apresenta-se como uma alternativa confiável e acessível para realizar o estudo térmico de transformadores refrigerados a óleo, com grande capacidade de detalhamento e possibilidade de aquisição de qualquer dado relevante em qualquer ponto do domínio.

Neste cenário, o presente trabalho traz uma análise do comportamento térmico de um protótipo de transformador com diferentes tipos de sistemas de refrigeração através de simulações empregando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). São analisados sistemas de refrigeração com circulação do ar externo de forma natural e forçada, e circulação do óleo interno de forma natural, forçada e dirigida.

2. AQUECIMENTO E VIDA ÚTIL

Embora os transformadores sejam máquinas elétricas muito eficientes, estão sujeitos às perdas. Em suma, as perdas nos transformadores são perdas Joule nos enrolamentos, perdas no núcleo e perdas por fluxo disperso. Esse conjunto de perdas resulta no aquecimento do equipamento. Nos transformadores refrigerados a óleo isolante, esse fluido atua como meio de transferência do calor dos enrolamentos para o ambiente, além de auxiliar na isolação em conjunto ao isolante sólido.

A temperatura de operação é fundamental para o funcionamento correto e prolongação da vida útil do transformador. Essa preocupação é decorrente do fato de que uma das principais causas de falhas e retiradas de operação de transformadores é, basicamente a ruptura do isolamento dos enrolamentos. Esta ruptura é consequência direta da degradação térmica do isolamento das bobinas com subsequente curto-circuito interno devido, principalmente, ao sobreaquecimento dos condutores da parte ativa ou operação contínua em faixas de temperaturas superiores às recomendadas (Iaronka, 2014).

O envelhecimento ou a deterioração do isolamento é uma função temporal da temperatura, teor de umidade e teor de oxigênio. Com os modernos sistemas de preservação de óleo, as contribuições de umidade e oxigênio para o isolamento a deterioração pode ser minimizada, deixando a temperatura do isolamento como o parâmetro de controle. Desde que, na maioria dos aparelhos, a distribuição de temperatura não é uniforme, a parte que está operando na temperatura mais alta normalmente sofrerá a maior deterioração. Portanto, em estudos de envelhecimento, é comum considerar os efeitos do envelhecimento produzidos pelos pontos de maior temperatura (ponto mais quente) (IEEE C57.91-1995).

O guia IEEE C57.91-1995, define a vida útil de um transformador como a vida útil do próprio isolamento, enquanto o guia IEEE C57.100 – 2011 aborda uma metodologia de cálculo para estimar a vida útil em função do ponto mais quente. A (1) é proposta na normativa como referência de cálculo da vida útil (LIFE em h) em função da temperatura do ponto mais quente (T em °C).

$$LIFE = e^{\left[\frac{15000}{T+273} - 27.064\right]} \quad (1)$$

Os efeitos adversos de temperaturas elevadas sobre o isolamento sólido, incluem perda da rigidez dielétrica e da resistência mecânica; e sobre o isolamento liquido a oxidação, que também contribui para a degradação do isolante sólido e, consequentemente, redução da vida útil.

Para operar um transformador de potência, é preciso conhecer suas limitações básicas. É evidente que a elevação de temperatura ocasionada pelas perdas do transformador pode afetar a vida útil do isolamento. Para garantir a longevidade do transformador, os fabricantes devem garantir que seus projetos sejam capazes de operar dentro dos padrões especificados (Perez, 2010). A normativa ABNT NBR 5356-2:2007 aborda os quesitos térmicos de operação de transformadores de potência, à temperatura ambiente de 25 ºC e a pressão de 1 atm. Dos quais, destacam-se, os limites de elevação de temperatura a potência nominal em regime permanente, de 65 ºC para o ponto mais quente e de 50 ºC para o topo de óleo.

Visto que a elevação de temperatura no transformador está diretamente associada à sua vida útil, é necessário o controle térmico, que pode ser realizado aplicando-se técnicas de arrefecimento do equipamento, mostradas na seção a seguir.

3. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM TRANSFORMADORES

Os aspectos construtivos do sistema arrefecedor do transformador refrigerado a óleo compõem métodos de eficientização do uso do óleo na retirada de calor. Tais aspectos são oportunos para determinadas situações, seja por motivos econômicos ou por fatores técnicos de funcionamento e operação.

Conforme a ABNT NBR 5356-2, os transformadores imersos em óleo isolante devem ser designados de acordo com o método de resfriamento utilizado, por meio de um código de quatro letras. A primeira letra define o meio de resfriamento interno, a segunda o tipo de circulação do meio de resfriamento interno, a terceira o meio de resfriamento externo e a quarta o tipo de circulação do meio de resfriamento externo.

A seguir são analisados os sistemas de acordo com a forma de circulação do fluido interno: óleo natural, forçado e dirigido, representados pelas siglas ON, OF e OD, respectivamente. Após, são abordados os sistemas quanto a forma de circulação

do fluido externo: ar natural e ar forçado, AN e AF, respectivamente.

a. ON (Óleo com Circulação Natural)

Nesse sistema (Fig. 1) o óleo aquecido no núcleo circula naturalmente.

O ON é o tipo de resfriamento mais simples e usado na prática. O resfriamento ON, é alcançado quando o fluxo de óleo através do enrolamento do transformador é impulsionado pela diferença de pressão entre o óleo do tanque e o óleo mais frio. Esta diferença de pressão deve-se à uma diferença de temperatura entre a temperatura do óleo no tanque e a temperatura do óleo nos radiadores. Essa circulação natural de óleo é referida como efeito "termo sifão". O calor do núcleo ferromagnético e dos enrolamentos é transferido para o óleo circundante principalmente através do processo de convecção. A densidade do óleo é inversamente proporcional à temperatura e é proporcional à pressão e altura. À medida que a temperatura do óleo aumenta, sua densidade reduz. O óleo torna-se leve e devido ao efeito de flutuação ele se move para cima em direção ao topo do tanque. Seu lugar é tomado pelo óleo frio do fundo que tem uma densidade maior. À medida que o óleo entra no radiador, o calor é dissipado ao longo de superfícies mais frias, ao mesmo tempo em que o óleo aumenta sua densidade. O óleo então flui para baixo através do radiador e entra no fundo do tanque do transformador a partir da entrada assim ocorre a circulação contínua do óleo (Dofan, 2011).

Algumas características do ON:

- Requer menos manutenção e é mais confiável, pois não exige controle do método de refrigeração e não apresenta adversidades ocasionadas pelo uso de bombas.

- Grande diferença de temperatura entre o topo de óleo e o óleo da base do transformador, devido à baixa velocidade do óleo na circulação natural.

- Significativa diferença entre a temperatura no ponto quente e a temperatura média do óleo.

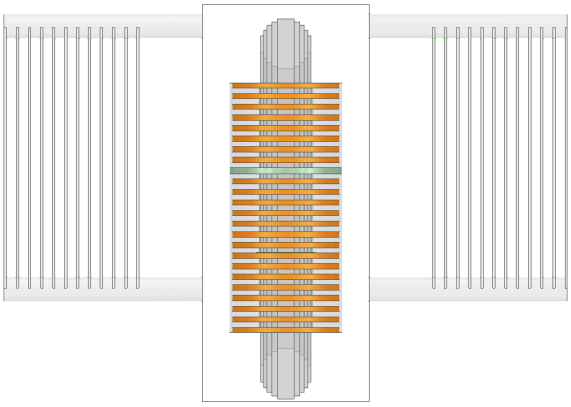


Fig. 1 Óleo com Circulação Natural (ON)

b. OF (Óleo com Circulação Forçada)

Nesse sistema (Fig. 2) o óleo circula com maior vazão devido à instalação de uma bomba de óleo que aumenta a vazão do óleo no sentido da circulação natural (Ries, 2007).

No OF, o óleo é forçado a entrar no transformador, seu fluxo é governado pelo menor caminho de resistência e também pela flutuabilidade. Portanto, parte do óleo pode não entrar nos enrolamentos ou no núcleo e formar um caminho paralelo fora desses dois. Assim, a temperatura máxima do óleo pode diminuir devido à mistura de óleo quente proveniente dos enrolamentos e do óleo frio proveniente da bomba. Isso, por sua vez, reduz a eficácia dos radiadores (Kulkani, 2004).

Uma forte desvantagem desse método é que se o sistema de bombas falhar o transformador não pode atuar no modo ON, assim os sistemas refrigeradores estagnam perdendo a controlabilidade da temperatura.

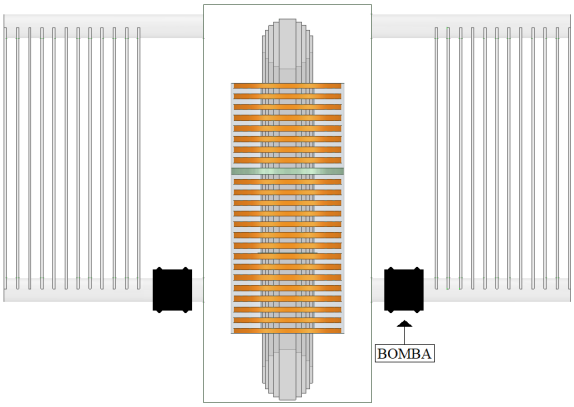


Fig. 2 Óleo com Circulação Forçada (OF)

c. OD (Óleo com Circulação Dirigida)

Nesse sistema (Fig. 3) o óleo refrigerado que sai do duto inferior do radiador e retorna ao tanque, é dirigido de modo que passe diretamente para os enrolamentos. Isso é realizado através de uma estrutura interna no tanque que confina e conduz o óleo refrigerado dentro do tanque, de maneira que, não entre em contato com o restante de óleo.

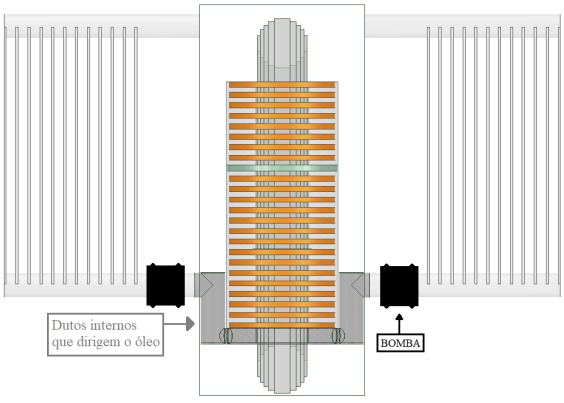


Fig. 3 Óleo com Circulação Dirigida (OD)

d. AN (Ar com Circulação Natural)

A função do radiador no transformador refrigerado a óleo é auxiliar a dissipar a energia térmica que passou do núcleo para o óleo, transferindo essa energia para algum meio externo, normalmente o ar. Esse processo ocorre, pois, a temperatura do ar é inferior a temperatura do transformador. Assim, a transmissão de calor das paredes externas do radiador ao ambiente acontece, principalmente, por convecção

Nesse sistema atua a convecção natural, ou seja, ar aquecido nas paredes externas do radiador é substituído naturalmente pelo ar frio.

e. AF (Ar com Circulação Forçada)

Nesse sistema são instalados ventiladores nas laterais ou em baixo do radiador, isso força o ar a circular através dos radiadores, assim, aumenta a capacidade de dissipação no processo de convecção.

Algumas características do AF são:

- Redução na temperatura média do transformador.

- Redução do número de radiadores para atingir a mesma eficiência do AN.

As Figuras 1, 2 e 3 mostram os protótipos simulados. Os enrolamentos são do tipo disco e o conjunto de enrolamentos é circundado por dois cilindros de papel, um externo e outro interno (entre o núcleo ferromagnético e o interior do disco). Entre o papel e os discos, os protótipos possuem dois desvios de óleo, um interno e outro externo, respectivamente, no oitavo e décimo sétimo disco.

4. DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Os transformadores com os sistemas de refrigeração mostrados anteriormente foram estudados por meio da Dinâmica de Fluidos Computacional.

A Dinâmica de Fluidos Computacional abrange a aplicação de métodos numéricos a sistemas envolvendo escoamento. O uso de métodos numéricos para a solução de equações diferencias permite a resolver fluxos reais em geometrias complexas. Existem diferentes formas de realizar isso, o presente artigo usou o programa ANSYS CFX®, que aplica o Método dos Volumes Finitos (MVF).

O MVF é uma classe do método de diferenças finitas. A geometria de cálculo é subdividida em um número de volumes de controle. As equações discretizadas representam a conservação integral através de cada volume de controle (Muniz, 1995).

Normalmente, a análise no software ANSYS® pode ser definida em três etapas sequenciais (Thabet, 2018).

1ª. Pré-processamento: Simplificações e idealizações na geometria, condições de contorno e definições de materiais, geração da malha.

2ª. Processamento: Resolução através da discretização das equações diferenciais aplicadas à malha, por meio do processamento computacional.

3ª. Pós processamento: Plotagem e listagem dos resultados, além da verificação da validade da simulação.

4.1 Malha

A criação da malha de uma geometria, está entre as etapas mais importantes do processo de simulação, pois a qualidade da malha determina majoritariamente a confiabilidade dos resultados. Em suma, a malha representa a decomposição da geometria em volumes de controle, permitindo a aplicação das equações diferenciais no sistema.

Para garantir a efetividade positiva da malha, uma análise com uma malha inicial é realizada primeiro e depois reanalisada usando o dobro de elementos. As duas soluções são comparadas. Se os resultados estiverem próximos, a configuração inicial da malha é considerada adequada. Se houver diferenças substanciais entre os dois, a análise deve continuar com uma malha mais refinada e uma comparação subsequente até que a convergência seja estabelecida (Madenci & Guven, 2015).

A Fig. 4 mostra um processo semelhante, onde, três malhas foram formadas para o mesmo radiador.

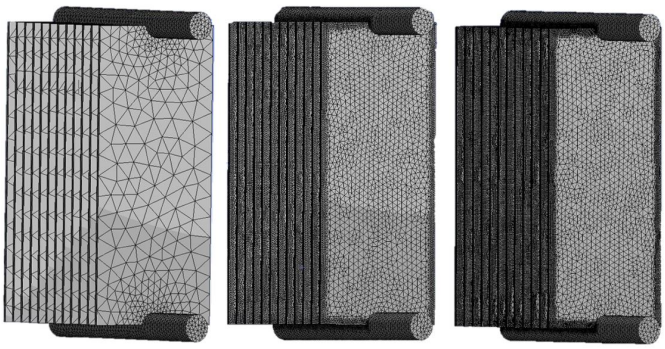


Fig. 4 Três refinamentos de malha para o radiador: (a) 44050 elementos; (b) 553179 elementos; (c) 1264500 elementos.

A Fig. 5 mostra uma simulação de prova para as três malhas da Fig. 4. Onde, para o mesmo intervalo de valores, a variável temperatura é renderizada. Assim, é possível observar, principalmente a Fig. 5(b) e 5(c), a convergência dos resultados perante o refinamento de malha.

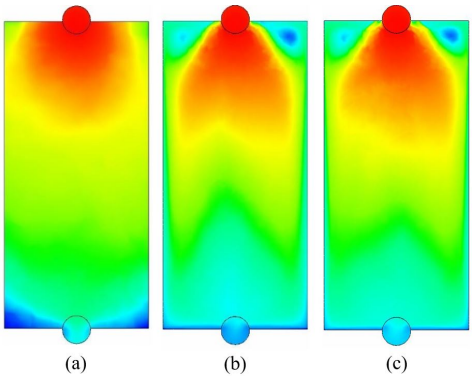


Fig. 5 Resultados da simulação de temperatura das três malhas da Fig.4: (a) Resultado para a malha da Fig.4 (a); (b) Resultado para a malha da Fig.4 (b); (c) Resultado para a malha da Fig.4 (c).

4.2 Condições de fronteira

O sistema de equações diferenciais parciais não-lineares, gerado pelos balanços de massa e da quantidade de movimento, exige um número de condições de contorno diferente para cada variável, dependendo da ordem da equação diferencial em relação à variável analisada, a fim de que ele possa ser resolvido satisfatoriamente (Muniz, 1995).

É importante definir as condições fronteira da geometria, pois elas traduzem o funcionamento do sistema por meio de restrições adicionais, como: perdas, vazão, escoamento, etc.

Para os transformadores simulados com geometrias da Fig. 2, 3 e 4, é pertinente destacar algumas condições de fronteira:

- Os valores de temperatura e pressão ambiente são 25°C e 1 atm, respectivamente.

- As perdas totais consideradas na parte ativa são de 7,5 kW.

- Para simular a bomba no sistema OF, é definido um valor de vazão próximo às bombas comerciais, de 0,4 m/s.

- No radiador, se atribui diferentes coeficientes de troca térmica para os sistemas AN e AF. Isso, permite a distinção entre os dois sistemas. A Fig. 6 mostra a renderização gráfica da simulação dos coeficientes de troca térmica.

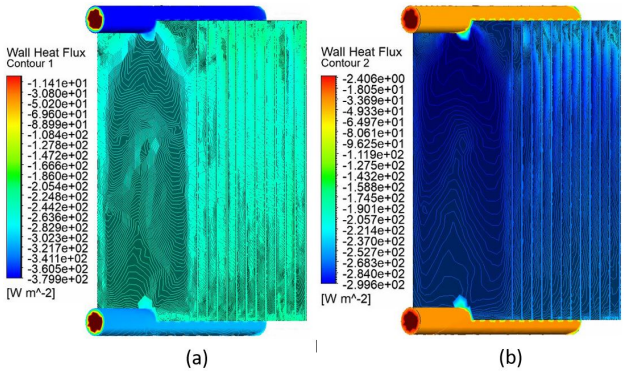


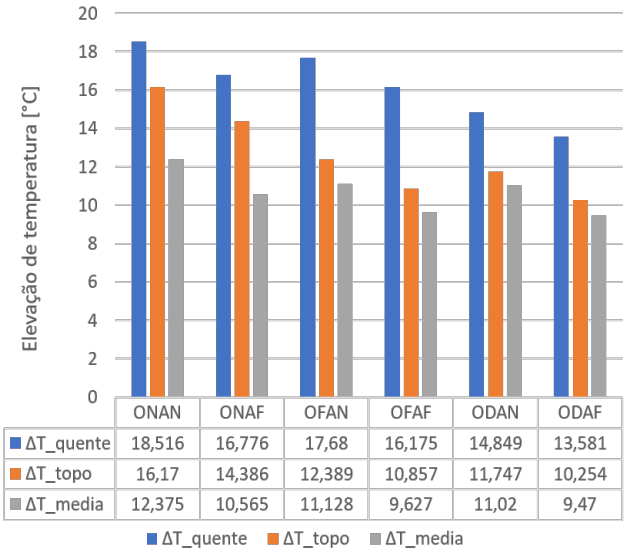
Fig. 6 Renderização dos coeficientes de troca térmica: (a) Ar forçado; (b) Ar natural.

5. RESULTADOS

Nessa seção será apresentada uma análise comparativa entre as configurações de refrigeração.

5.1 Análise numérica

A Fig. 7 reúne os dados de elevação de temperatura para o ponto mais quente e para o topo de óleo.



	ONAN	ONAF	OFAN	OFAF	ODAN	ODAF
ΔT_quente	18,516	16,776	17,68	16,175	14,849	13,581
ΔT_topo	16,17	14,386	12,389	10,857	11,747	10,254
ΔT_media	12,375	10,565	11,128	9,627	11,02	9,47

Fig. 7 Dados de elevação de temperatura [°C] no: Ponto mais quente (ΔT_quente) e topo de óleo (ΔT_topo).

Analisando a Fig. 7, é possível interpretar os dados e compreender melhor os fatores relacionados ao funcionamento térmico dos transformadores.

Primeiro, é possível analisar a eficiência dos sistemas de refrigeração externos, AN e AF. Pois, o ONAF obteve todas temperaturas de ponto quente inferiores ao ONAN; OFAF obteve todas temperaturas de ponto quente inferiores ao OFAN; ODAF obteve todas temperaturas de ponto quente inferiores ao ODAN. Logo o sistema AF é efetivo. Além disso, os sistemas AF obtiveram temperatura média inferior aos sistemas AN.

O fator K_{AF_AN}, calculado em (2), quantifica a redução na temperatura do ponto mais quente, devido a aplicação do sistema de refrigeração externo AF sobre o sistema de refrigeração externo AN, para as combinações com os sistemas de refrigeração interno ON, OF e OD. A comparação entre os resultados pode ser vista na Tabela 1.

$$K_{AF_AN} = \left(1 - \frac{\Delta T_{quente(AF)}}{\Delta T_{quente\ (AN)}}\right) * 10^2 \qquad (2)$$

Tabela 1. Ganho de temperatura do ponto mais quente no sistema AF relativo ao AN.

Tipo	K_{AF_AN} (%)
ON	9,39
OF	8,51
OD	8,53
Média	8,81

Segundo, comparando os sistemas de refrigeração internos, a implementação do OD resultou em temperaturas inferiores à implementação do OF, quando comparados ao ONAN. Assim, os sistemas de OD tiveram o melhor desempenho térmico. Isso, mostra que direcionar o óleo para as bobinas é eficaz.

A Tabela 2 mostra o fator K_{HOT_ONAN}, calculado por (3) que quantifica a elevação da temperatura do ponto mais quente normalizado com base no transformador ONAN, que possui a maior elevação de temperatura. Assim, os valores encontram-se no intervalo de 0 a 100, onde 0 é pior situação térmica e os valores superiores representam a melhora térmica percentual dos demais sistemas em relação ao ONAN.

$$K_{HOT_ONAN} = (1 - \frac{\Delta T_{quente}}{\Delta T_{quente\ (ONAN)}}) * 10^2 \quad (3)$$

Tabela 2. Elevações de temperatura no ponto mais quente relativizadas ao transformador ONAN.

Tipo	K_{HOT_ONAN} (%)
ONAN	0
ONAF	9,39
OFAN	4,51
OFAF	12,64
ODAN	19,80
ODAF	26,65

Terceiro, a interpretação das Tabelas 1 e 2, respectivamente, permite comparar os sistemas de refrigerações internos com os externos.

Comparando os sistemas ONAF e OFAN ao ONAN. O sistema AF obteve, aproximadamente, o dobro de redução percentual da temperatura à implementação do OF. Pois, a convecção natural do óleo e do ar possuem magnitudes diferentes, ou seja, a resistência térmica do ar é superior à resistência térmica óleo. O modo mais eficiente de melhorar a troca térmica é aproximando as duas resistências térmicas aumentando a velocidade do ar, consequentemente, melhorando sua convecção natural e reduzindo a resistência térmica. Isso é importante, devido às questões financeiras relacionadas a implementação da bomba hidráulica (para o OF) e do ventilador (para o AF).

A Tabela 3 mostra o cálculo para a perda de vida útil em função do tipo de transformador com o fator de normalização N_{LIFE_ODAF} calculado em (4) e o fator percentual P_{LIFE_ODAF} calculado em (5). Ambos fatores relativizam a vida útil LIFE de cada tipo de transformador sobre a vida útil do ODAF $LIFE_{ODAF}$, calculadas em (1).

$$N_{LIFE_ODAF} = \frac{LIFE}{LIFE_{ODAF}} \quad (4)$$

$$P_{LIFE_ODAF} = \left(1 - N_{LIFE_{ODAF}}\right).10^2 \quad (5)$$

Tabela 3. Perda relativa de vida útil

Tipo	N_{LIFE_ODAF}	P_{LIFE_ODAF} (%)
ONAN	0,4724	52,76
ONAF	0,6137	38.63
OFAN	0,5355	46,45
OFAF	0,6722	32,78
ODAN	0,8228	17,72
ODAF	1	0

A Tabela 3 mostra que o ODAF possui a vida útil mais elevada dentre as análises e o ONAN possui redução percentual de 52,76 % na vida útil em relação ao ODAF.

5.2 Análise dos contornos de temperatura

A Fig. 8 apresenta a renderização gráfica da variável de temperatura nas diferentes categorias de sistema de refrigeração. As imagens possuem escalas diferentes, assim, é possível analisar a distribuição de temperatura nos transformadores.

As figuras 8(a) e 8(b), mostram o expressivo gradiente de temperatura nos enrolamentos e entre o topo e a base do transformador com ON.

As figuras 8(c) e 8(d), mostram que o OF torna a temperatura entre o topo e base é significativamente uniforme comparada ao ON, porém esse sistema possui baixa atuação nos enrolamentos.

As figuras 8(e) e 8(f), traduzem o funcionamento do OD, é visto que o volume de óleo refrigerado que atravessa as bobinas é superior a qualquer sistema de refrigeração apresentado.

Isso garante o que a energia da parte ativa seja dissipada com maior eficiência. Nota-se que o óleo externo ao núcleo possui uma distribuição de temperatura uniforme e pouco gradiente de temperatura.

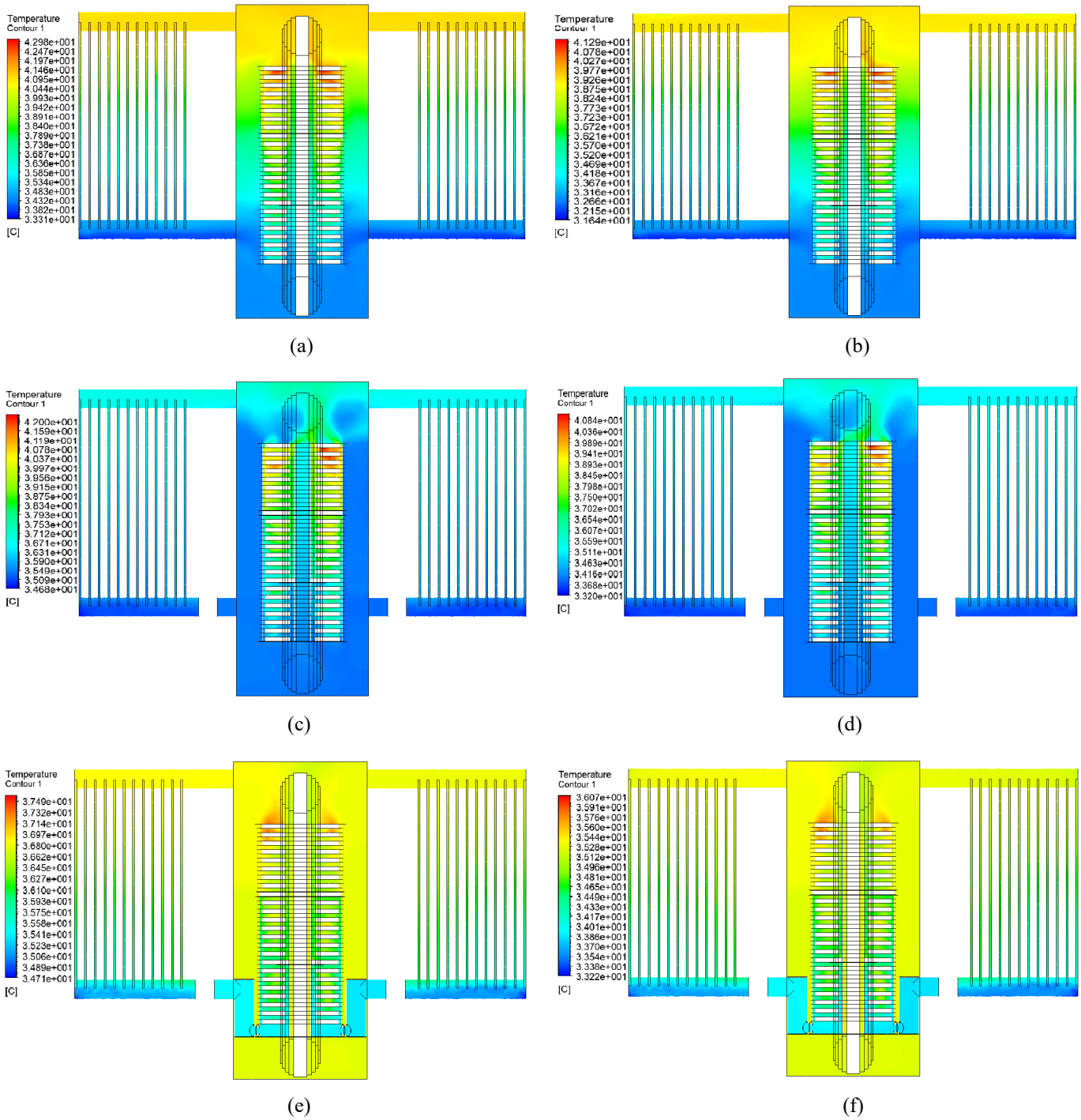


Fig. 8 Contornos de temperatura: (a) ONAN; (b) ONAF; (c) OFAN; (d) OFAF; (e) ODAN; (f) ODAF.

A Fig. 9 reúne em escala unitária os resultados da pesquisa para cada sistema refrigerador, onde 1 é a melhor situação e 0 a pior situação.

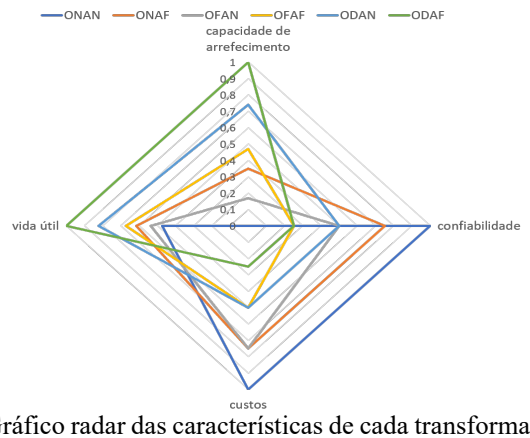


Fig. 9 Gráfico radar das características de cada transformador.

Observando o gráfico conclui-se o seguinte:

-Destaca-se em menores custos de fabricação e pouca manutenção devido à ausência de bomba e ventilador o transformador ONAN, porém carece no quesito vida-útil, assim pode ser usado em baixas potencias onde terá menor temperatura de ponto mais quente, consequentemente, maior vida-util.

-Destaca-se em desempenho e vida útil o transformador ODAF, porém possui elevado custo do equipamento e da manutenção necessária. Isso o faz oportuno em sistemas de alta potência.

- As outras soluções são intermediárias e aplicadas quando oportunas.

6. CONCLUSÕES

Os transformadores de potência são essenciais para sistema elétrico de transmissão e distribuição. Compreender seu funcionamento térmico através da CFD é um método viável de otimizar o projeto do transformador. O sistema AF teve resultados melhores se comparado ao AN, pois reduziu aproximadamente 8,81 % a temperatura de ponto mais quente. Além disso, reduziu a temperatura média de operação do transformador, como é visto nos gráficos e contornos de temperatura. Comparando OFAN e ONAF ao ONAN, o sistema AF resulta em temperaturas inferiores de ponto mais quente que o OF. A escolha do método de refrigeração impacta diretamente na vida útil do transformador, podendo resultar em 52,76% de redução na vida útil, como é visto no ONAN em relação ao ODAF. Com os contornos plotados, é notável que o OD atua diretamente sobre a parte ativa reduzindo a temperatura de ponto mais quente, consequentemente reduz o gradiente de temperatura entre topo e base. O sistema OF atua majoritariamente sobre o óleo externo à parte ativa, assim o gradiente de temperatura reduz, mas o ponto mais quente é pouco afetado. O sistema ON possui o maior gradiente de temperatura, devido à baixa velocidade do óleo.

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) e a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) através do P&D ANEEL contrato n° 9953354 pelo apoio financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5356-2., (2007). *Transformadores de potência Parte 2: Aquecimento.*

Dofan, J., (2011). *Study On Thermal Model For Calculating Transformer Hot Spot Temperature*. University Tun Hussein Onn Malaysia (UTMH), Malásia.

Fernandez, I., Delgado, F., Ortiz, F., Ortiz, A., Fern andez, C., Renedo, C.J., & Santisteban, A., (2016). *Thermal degradation assessment of Kraft paper in power transformers insulated with natural esters*. Applied Thermal Engineering, vol.104, pp. 129-138.

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.

IEEE Std C57.91., (1995). *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*.

IEEE Std C57.100, (2001). *IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power.*

Kulkani, S. V., & Khaparde, S. A., (2004). *Transformer Engineering: Design and Practice*. CRC Press, New York.

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

Muniz, L. A. R., (1995) *Método dos volumes finitos aplicados a problemas de escoamentos bidimensionais na região de entrada de dutos cilíndricos*. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil.

Perez, J., (2010) *Fundamental principles of transformer thermal loading and protection*, 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, pp. 1-14.

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

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.