

Simulação numérica da condução e convecção em transformadores imersos em ar e óleo via OpenFOAM

Numerical Simulation of Conduction and Convection in Air- and Oil-Immersed Transformers via OpenFOAM

¹Joyce Tamires de Souza Viana, ²André Luiz Amorim da Fonseca, ³Raul Vitor Arantes Monteiro, ⁴Daniela de Oliveira Maionchi

¹Graduanda em Engenharia Química – Universidade Federal de Mato Grosso (joyce.tamires.viana@gmail.com)

²Doutor em Engenharia Urbana – Professor EBTT Classe C 03 do Instituto Federal de Mato Grosso - Departamento de Engenharia Elétrica e Automação - Orientador no Programa da Pós Graduação em Educação Profissional e Tecnológica (ProfEPT-IFMT) (andre.fonseca@ifmt.edu.br)

³Professor Adjunto III do Departamento de Engenharia Elétrica - Orientador no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFMT) – Universidade Federal de Mato Grosso. (raul.monteiro@ufmt.br)

⁴Professora Associada III do Departamento de Física- Orientadora no Programa de Pós Graduação em Física Ambiental (PPGFA-UFMT)– Universidade Federal de Mato Grosso. (daniela.maionchi@ufmt.br)

RESUMO: O artigo aborda a crescente demanda global por energia elétrica, impulsionada pelo avanço de tecnologias, que exigem infraestruturas energéticas robustas. A pesquisa foca na análise térmica desse equipamento, essencial para garantir eficiência e segurança. Transformadores, compostos por núcleos de aço-silício e bobinas de cobre, utilizam sistemas de arrefecimento para dissipar o calor gerado pelo efeito Joule. O estudo utiliza simulações computacionais com o potencial de arrefecimento a ar e a óleo utilizando o solver *chtMultiRegionFoam*, do software OpenFOAM (versão 12) juntamente com tutorial *heatedDuct*, aplicando o Método dos Volumes Finitos para investigar a eficiência térmica de transformadores resfriados a ar (ANAN) e a óleo (ONAN). As simulações consideram a geometria, as propriedades do ar e do óleo mineral, e o modelo de turbulência $k - \epsilon$. Os resultados mostraram que o transformador resfriado a ar apresenta uma dissipação de calor mais lenta, enquanto o resfriado a óleo proporciona uma troca de calor mais eficiente, com temperaturas mais uniformes, embora com maior retenção de calor em algumas regiões. O estudo conclui que a escolha do fluido de arrefecimento impacta diretamente o comportamento térmico, sendo essencial para otimizar o desempenho e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

Palavras-chave: Transferência de Calor Conjugada. Confiabilidade de Equipamentos Elétricos. Gerenciamento Térmico.

ABSTRACT: The article addresses the growing global demand for electrical energy, driven by technological advancements, which requires robust energy infrastructures. The research focuses on the thermal analysis of this equipment, which is essential to guarantee efficiency and safety. Transformers, composed of silicon-steel cores and copper coils, utilize cooling systems to dissipate the heat generated by the Joule effect. The study uses computational simulations with air and oil cooling, employing the *chtMultiRegionFoam* solver from the OpenFOAM (version 12) software along with the *heatedDuct* tutorial, applying the Finite Volume Method to investigate the thermal efficiency of air-cooled (ANAN) and oil-cooled (ONAN) transformers. The simulations consider the geometry, the properties of air and mineral oil, and the turbulence model $k - \epsilon$. The results showed that the air-cooled transformer exhibits slower heat dissipation, while the oil-cooled transformer provides more efficient heat exchange, with more uniform temperatures, although with greater heat retention in some regions. The study concludes that the choice of the cooling fluid directly impacts the thermal behavior, being essential for optimizing the performance and reliability of electrical systems.

Keywords: Conjugate Heat Transfer. Electric Equipment Reliability. Thermal Management.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da demanda global por energia elétrica, impulsionado por tecnologias como inteligência artificial e internet das coisas, tem gerado a necessidade de infraestruturas energéticas cada vez mais robustas (International Energy Agency, 2023). No estado

de Mato Grosso, o aumento das temperaturas e a escassez de chuvas têm impactado a operação de equipamentos de geração de energia, especialmente transformadores, que correm o risco de superaquecimento, gerando prejuízos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. Isso exige medidas para assegurar uma oferta confiável de energia, como o aumento da eficiência energética e a adoção de fontes renováveis (Instituto Nacional de Meteorologia, 2024). Segundo (Harlow, 2012), os transformadores desempenham um papel essencial na distribuição de energia, sendo responsáveis pela transformação de tensão ao longo do percurso entre a geração e a distribuição. Para garantir a eficiência do sistema, é crucial manter o custo baixo, ao mesmo tempo em que se assegura a segurança do equipamento. Utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*), o estudo proposto visa avaliar a aplicabilidade do solver *chtMultiRegion* para transferência de calor conjugada, do pacote *OpenFOAM* (versão v12), na representação dos fenômenos de condução e convecção térmica em transformadores submetidos a diferentes meios de arrefecimento, como ar e óleo por meio de simulações computacionais. Para isso, foram desenvolvidos modelos tridimensionais com diferentes configurações de fluido de arrefecimento, permitindo a análise comparativa do comportamento térmico sob influência das propriedades físicas de cada meio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

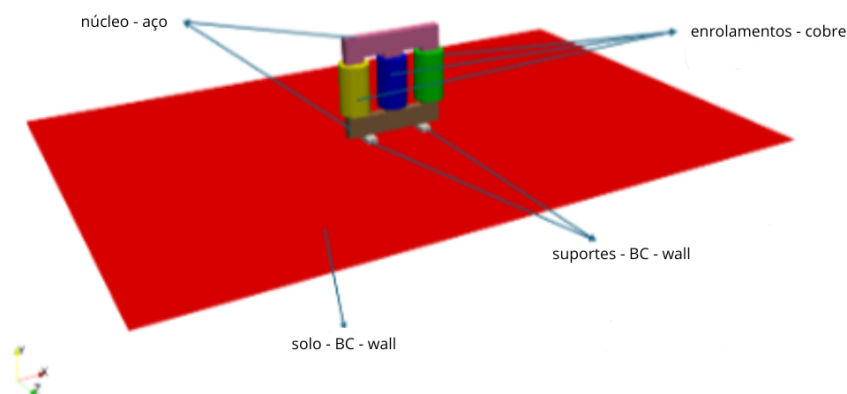
Para a realização das simulações numéricas, foi utilizado o solver *chtMultiRegionFoam*, incluído no pacote *OpenFOAM* (versão 12). Esse solver é voltado à análise de transferência de calor conjugada (CHT – *Conjugate Heat Transfer*), permitindo o acoplamento entre as equações de energia nos sólidos e as equações de Navier-Stokes nos fluidos. Foi utilizado o caso tutorial *heatedDuct*, disponibilizado com o próprio *OpenFOAM*, que consiste em um tutorial para duto aquecido com paredes sólidas e escoamento interno, o que permite utilizar a estrutura de diretórios, os arquivos de malha multi-região, e a implementação das interfaces de troca de calor entre as regiões. A partir dele, foram feitas as adaptações geométricas e físicas necessárias para representar o domínio do transformador, ajustando propriedades termofísicas, condições de contorno e características do escoamento de acordo com os objetivos do presente estudo. Devido à complexidade geométrica e à geração de vórtices, mesmo em baixas velocidades, foi adotado o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ devido à geometria complexa do transformador, que gera vórtices, mesmo com a velocidade do fluido sendo baixa. O estudo seguiu o Método dos Volumes Finitos (MVF) em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Foram analisados dois modelos de transformadores: um com ar natural (ANAN) e outro com óleo natural (ONAN), para comparar a dissipação de calor de cada fluido. O modelo tridimensional representou um transformador real, incluindo núcleo de ferro, bobinas de cobre, suportes de alumínio e o chão, conforme mostrado na Figura 1.

Em seguida, acontece a geração de uma malha adequada que é uma etapa crucial, neste caso, para a malha computacional demonstrada na Figura 2, foram utilizadas ferramentas nativas do próprio *OpenFOAM* como *blockMesh* e *nappyHexMesh* com o apoio do software externo ANSA que são compatíveis com a importação de arquivos para o *OpenFOAM*.

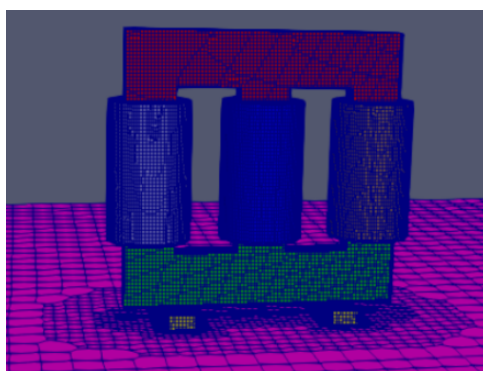
Para reduzir os erros decorrentes da discretização, foi conduzida uma análise de independência de malha. Foram testadas três malhas com refinamentos diferentes contendo, respectivamente, 265.353, 491.405 e 2.296.190 células. Após as simulações, foram verificados os resultados obtidos para a pressão, temperatura e velocidade, sendo possível verificar que a partir do primeiro refinamento, não houveram alterações significativas, sendo assim, a primeira malha está suficientemente refinada para que seja considerada satisfatória para a simulação.

Figura 1 – Geometria do modelo.



Fonte: Autores (2025).

Figura 2 – Malha Computacional



Fonte: Autores (2025).

Os parâmetros físicos do ar e do óleo mineral foram definidos no arquivo *thermophysicalProperties*. Para o ar, os dados incluem massa molar de $28,9 \text{ g/mol}$, C_p de 718 J/kg.K , densidade de 1225 kg/m^3 , viscosidade de $1.7894 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e número de *Prandtl* (*Pr*) de 0,73. Já o óleo mineral parafínico, tem massa molar de $338,7 \text{ g/mol}$, C_p de 2060 J/kg.K , densidade de $870,5 \text{ kg/m}^3$, viscosidade de $0,0161 \text{ m}^2/\text{s}$ e *Prandtl* de 276,15. Além disso, as propriedades iniciais dos fluidos, definidas pelo *boundaryField*, são fundamentais para as condições de contorno, afetando variáveis como velocidade e pressão. As simulações consideraram escoamento natural em cavidade fechada, tanto para o caso com ar quanto para o caso com óleo, sem entrada ou saída de massa. As fronteiras externas do domínio fluido foram tratadas com a condição de parede não deslizante (*noSlip*), enquanto as interfaces entre as regiões sólidas (núcleo e bobinas) e o meio refrigerante utilizaram a condição acoplada (*coupled*) para a troca térmica. Foi definida uma fonte de energia de 15 kVA nas bobinas, dividida por três para cálculo volumétrico e os campos iniciais de temperatura e velocidade foram definidos como uniformes, com os fluidos em repouso e temperatura inicial de $300 \text{ }^\circ\text{K}$, a fim de favorecer a convergência do regime permanente. A Equação (1) representa a conservação de energia para a condução da transferência de calor nos componentes sólidos,

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{g} = 0 \quad (1)$$

onde x_i é a direção da coordenada, k_s é o coeficiente de condução do sólido, T é a temperatura, \dot{g} é a taxa de geração de calor por volume.

Para descrever o fluido, as equações que governam a conservação de massa, momento e energia são demonstradas nas Equações (2)–(4),

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j \right) + \rho g_i \beta (T - T_\alpha) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_f}{c_{p,f}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho u_i T \right) \quad (4)$$

onde u , P , T , T_α , g , β , μ , ρ , k_f e $C_{p,f}$ correspondem às variáveis que representam velocidade, pressão, temperatura, temperatura do ar ambiente, gravidade, coeficiente de expansão térmica do ar, viscosidade do fluido, densidade do fluido, coeficiente de condução do fluido e calor específico do fluido, respectivamente.

Na fase de pós-processamento, utilizou-se o *ParaView*, ferramenta do *OpenFOAM*, para visualizar graficamente os resultados da simulação, facilitando a análise de variáveis como pressão, temperatura e velocidade. Essa etapa converte os dados numéricos em representações visuais, como gráficos e contornos, permitindo melhor interpretação dos fenômenos simulados, validação do modelo com dados experimentais e documentação dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No modelo simulado do transformador, a convecção entre as bobinas e o núcleo foi eficazmente reproduzida, mostrando o calor gerado pelo efeito *Joule* nas bobinas.

3.1 Simulação do fluido sendo o ar atmosférico

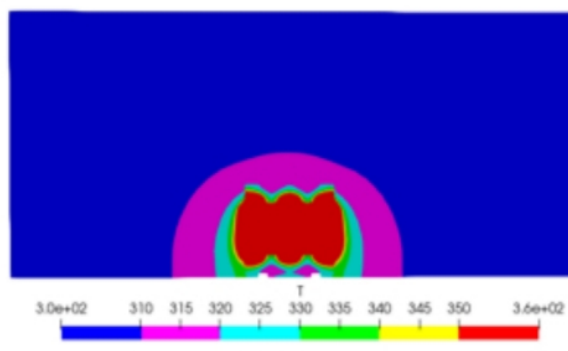
As Figuras 3 e 4 evidenciam que o calor gerado nas bobinas é conduzido ao núcleo e dissipado por convecção por meio do fluido de resfriamento. Esse movimento cria um ciclo de circulação térmica que ajuda a manter a temperatura segura, evitando o superaquecimento dos componentes internos do transformador.

A análise desses mecanismos de condução e convecção térmica é crucial para garantir o desempenho estável do transformador em diversas condições de carga (International Energy Agency, 2023). O resultado da simulação, analisando a distribuição térmica entre os sólidos e o ar, com valores de temperatura variando entre 300 a 363 °K mostraram que a condução e a convecção aconteceu de forma efetiva utilizando o modelo.

3.2 Simulação do fluido sendo o óleo parafínico

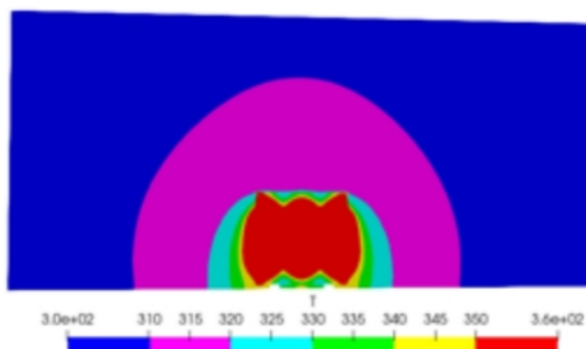
Na simulação realizada com o óleo parafínico, foram utilizados os mesmos modelos, a mesma malha e as mesmas equações da simulação anterior com ar, alterando-se apenas os parâmetros físicos do fluido. Essa alteração permitiu observar como diferentes fluidos afetam a transferência de calor e a distribuição de temperatura no sistema, considerando as distintas propriedades térmicas de cada fluido, conforme Figura 5.

Figura 3 – Simulação em 100 segundos.



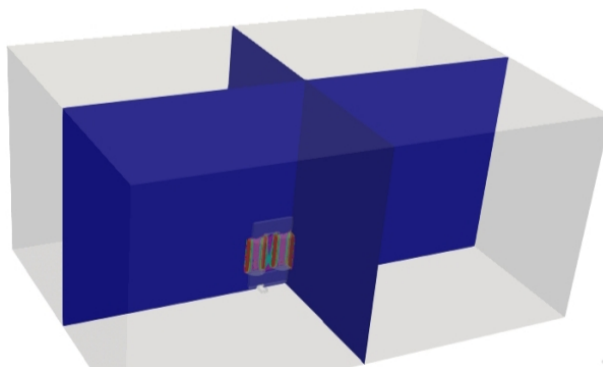
Fonte: Autores (2025).

Figura 4 – Simulação em 500 segundos.



Fonte: Autores (2025).

Figura 5 – Recorte transversal da bobina e núcleo.

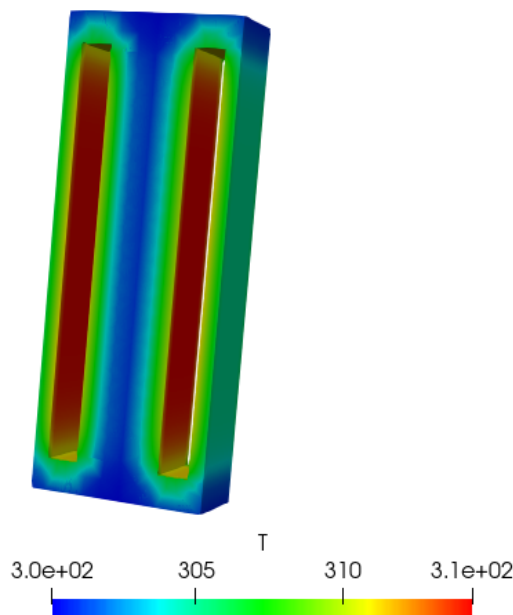


Fonte: Autores (2025).

Os resultados da simulação mostraram que o óleo parafínico promoveu uma troca de calor mais eficiente do que o ar, devido à sua maior capacidade térmica, condutividade e viscosidade. Ele melhora a condução entre as bobinas e o núcleo, distribui o calor de forma mais uniforme ao preencher os espaços internos e favorece a convecção natural, o que reduz pontos quentes, aumenta a confiabilidade e diminui o risco de falhas térmicas no transformador. Resultados estes que estão em conformidade com o comportamento esperado na prática, dessa forma, o modelo utilizado também demonstrou eficiência, reproduzindo de forma coerente o

comportamento térmico esperado. A Figura 6 ilustra a transferência de calor, destacando a eficiência da condução térmica, especialmente nas áreas de contato entre o óleo e as superfícies metálicas.

Figura 6 – Demonstração da condução de calor da bobina para o núcleo.



Fonte: Autores (2025).

4. CONCLUSÃO

O estudo sobre a simulação de transformadores de potência com arrefecimento a ar e a óleo utilizando o solver *chtMultiRegionFoam*, do *OpenFOAM* (versão 12) juntamente com tutorial *heatedDuct*, foi eficaz na análise dos processos de condução e convecção térmica em geometrias conjugadas. A pesquisa evidenciou que o modelo desenvolvido mostrou grande precisão na representação dos fenômenos térmicos, oferecendo uma base para o desenvolvimento de novas tecnologias de resfriamento. A pesquisa também destacou a importância de práticas de arrefecimento eficientes para reduzir impactos ambientais e melhorar a sustentabilidade no setor energético. Os resultados também mostraram que em regiões com altas temperaturas e baixa umidade, os desafios no gerenciamento térmico dos transformadores são mais críticos, exigindo inovações em design e métodos de resfriamento. O estudo abriu portas para soluções mais eficazes e sustentáveis, essenciais para propostas de arrefecimento cada vez mais eficientes e seguros.

REFERÊNCIAS

HARLOW, James H. (ed.). **Electric Power Transformer Engineering**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Boletim Climatológico: Balanço do Inverno 2024 em Cuiabá (MT)**. Brasília, out. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data centres & networks**. [S. l.: s. n.], 2023. <https://www.iea.org/energy-system/digitalisation/data-centres-and-data-transmission-networks>.

KEBRITI, Reza; HOSSEINI, S. M. Hassan. 3D modeling of winding hot spot temperature in oil-immersed transformers. **Electrical Engineering**, v. 104, p. 3325–3338, 2022. DOI: 10.1007/s00202-022-01553-0.

MAXWELL, James Clerk. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. 3. ed. Oxford: Clarendon Press, 1892. v. 2.

OPENFOAM. **OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox**. [S. l.: s. n.], 2024. <https://www.openfoam.com>.

RODRIGUES, L. M. M. **Avaliação do sistema de arrefecimento por óleo dirigido de um transformador de potência móvel por meio de dinâmica dos fluidos computacional**. 2022. Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTISTEBAN, A. *et al*. Thermal Modelling of a Power Transformer Disc Type Winding Immersed in Mineral and Ester-Based Oils Using Network Models and CFD. **IEEE Access**, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2957171.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es), o título do trabalho, a citação da revista e o DOI.