

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Douglas Machado Carvalho

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DO ÓLEO ATRAVÉS
DA BOBINA DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

Santa Maria, RS
2024

Douglas Machado Carvalho

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DO ÓLEO ATRAVÉS DA BOBINA
DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Guex Falcão

Coorientador: Prof. Vitor Cristiano Bender

Santa Maria, RS
2024

Douglas Machado Carvalho

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DO ÓLEO ATRAVÉS DA BOBINA
DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do título de **En-
genheiro Mecânico**.

Aprovado em 17 de julho de 2024:

Carlos Eduardo Guex Falcão, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Vitor Cristiano Bender, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Eduardo Xavier Barreto, Dr. (UFSM)

Leonardo Hautrive Medeiros, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2024

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Ednilson Carvalho e Edilena Carvalho, os quais sempre me apoiaram e serviram como pilares para que minhas decisões se tornassem realidade. E que muitas vezes abdicaram dos seus próprios desejos em favor dos meus...

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o fim de uma etapa da minha vida e o começo de novos desafios.

Agradeço aos meus pais Ednilson Carvalho e Edilena Carvalho pelo constante apoio em todas as decisões que tomei, pessoais e profissionais. Com certeza são os pilares da minha vida.

Aos meus irmãos, Cibelle Carvalho, Leonardo Carvalho e Eduardo Carvalho.

Ao meu orientador, Professor Carlos Guex Falcão, pela proatividade, disponibilidade, amizade e sabedoria por me direcionar neste trabalho. Seu constante suporte foi de imenso valor e contribuiu significativamente para o seu desenvolvimento. Estou certo de que este trabalho oferece uma contribuição valiosa para futuras pesquisas relacionadas à transferência de calor em transformadores.

Ao meu coorientador, Professor Vitor Cristiano Bender, pela oportunidade de conduzir este trabalho em um ambiente de trabalho extraordinário, onde o senhor gerencia com maestria todo o suporte necessário. Agradeço aos demais integrantes do INRI, pelos valiosos conhecimentos compartilhados na área de transformadores elétricos. Sem a disponibilidade e colaboração de todos vocês, este trabalho não teria sido possível.

Ao Professor Mário Eduardo Santos Martins e ao Professor Thompson Diordinis Metzka Lanzanova, pela oportunidade de adquirir conhecimentos tanto práticos quanto em simulações CFD na áreas de motores à combustão no GPMOT. Essa base teórica foi fundamental para o início deste trabalho.

À UFSM e ao Curso de Engenharia Mecânica pela oportunidade de uma graduação de qualidade.

Por fim, à FAPERGS, por fomentar a pesquisa e minha bolsa de iniciação científica ao longo do período desse trabalho.

RESUMO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DO ÓLEO ATRAVÉS DA BOBINA DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

AUTOR: Douglas Machado Carvalho

Orientador: Carlos Eduardo Guex Falcão

Coorientador: Vitor Cristiano Bender

Devido à relevância dos transformadores de potência nos sistemas de energia elétrica, melhorias contínuas em sua performance térmica visando estender sua vida útil são fundamentais. A longevidade do equipamento está estreitamente relacionada à degradação do papel isolante, cuja deterioração é acelerada por altas temperaturas de operação. Nesse contexto, este estudo apresenta um modelo computacional de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para determinar a distribuição detalhada das temperaturas internas nos enrolamentos de um transformador elevador de potência em operação na Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza, em Antonina (PR). O modelo desenvolvido realiza análises do escoamento do óleo através das bobinas, considerando tanto o óleo mineral quanto o óleo vegetal, com diferentes distribuições de perdas nos enrolamentos e diversas vazões de entrada, cujos resultados que foram comparados com dados disponíveis na literatura. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, evidenciando que a distribuição das perdas exerce um impacto significativo no perfil de temperatura das bobinas do transformador e que o óleo vegetal apresenta melhor performance térmica para a mesma vazão de entrada em comparação ao óleo mineral. Assim, o modelo proposto revela-se uma ferramenta precisa para a análise do comportamento e da taxa de escoamento do óleo através das bobinas do transformador, bem como para avaliar o impacto do tipo de óleo na transferência de calor dos enrolamentos. Além disso, pode ser utilizado como um modelo preditivo para estimar regiões críticas, apoiando processos decisórios e o projeto térmico de novos equipamentos. Essa abordagem promove a melhoria da eficiência térmica, consequentemente, estendendo a vida útil dos transformadores.

Palavras-chave: Transformador de potência, Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), Modelo numérico, Transferência de calor, Enrolamentos, Escoamento, Óleo vegetal

ABSTRACT

NUMERICAL SIMULATION OF OIL FLOW THROUGH THE WINDING OF A THREE-PHASE TRANSFORMER

AUTHOR: Douglas Machado Carvalho

ADVISOR: Carlos Eduardo Guex Falcão

CO-ADVISOR: Vitor Cristiano Bender

Due to the relevance of power transformers in electrical power systems, continuous improvements in their thermal performance, to extend their lifespan, are crucial. The longevity of the equipment is closely related to the degradation of the insulation paper, which deteriorates faster under high operating temperatures. In this context, this study presents a Computational Fluid Dynamics (CFD) model to determine the detailed distribution of internal temperatures in the windings of a power step-up transformer operating at the Governador Parigot de Souza Hydroelectric Power Plant in Antonina (PR). The developed model analyzes the oil flow through the coils, considering both mineral and vegetable oils, with different distributions of winding losses and various inlet flow rates, whose results were compared with data available in the literature. The obtained results were satisfactory, showing that the distribution of losses has a significant impact on the temperature profile of the transformer coils, and that vegetable oil exhibits better thermal performance for the same inlet flow rate compared to mineral oil. Thus, the proposed model proves to be a precise tool for analyzing the behavior and flow rate of oil through transformer coils, as well as for evaluating the impact of oil type on winding heat transfer. Furthermore, it can be used as a predictive model to estimate critical regions, supporting decision-making processes and the thermal design of new equipment. This approach promotes the improvement of thermal efficiency, thereby extending the lifespan of transformers.

Keywords: Power transformer, Computational Fluid Dynamics (CFD), Numerical model, Heat transfer, Windings, Flow, Vegetable oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de transmissão	20
Figura 2 – Transformador de potência	21
Figura 3 – Interior do transformador	22
Figura 4 – Tipos de enrolamentos: discos (a) e camadas (b)	22
Figura 5 – Componentes de sustentação de um transformador	23
Figura 6 – Parte ativa	25
Figura 7 – Desvios de óleo	26
Figura 8 – Sistemas de dissipação de calor: ONAN (a), OFAF (b) e ODAF (c)	28
Figura 9 – Transformador elevador trifásico	30
Figura 10 – Fluxograma da metodologia	32
Figura 11 – Dimensões construtivas	35
Figura 12 – Medições de temperatura: Instalação fibra óptica (a); Construtivo de uma coluna (b)	36
Figura 13 – Simplificações: (a) Enrolamentos do tipo disco, (b) Espaçamento e guias de óleo, (c) Modelagem do fluido (Óleo), e (d) Distribuição dos espaçadores .	37
Figura 14 – Plano de simetria	38
Figura 15 – Geometria simplificada	38
Figura 16 – Domínio da simulação no StarCCM+ 2310: (a) Reservatório inferior e (b) Extensão na região de saída	39
Figura 17 – Aplicação das condições de contorno: Região de entrada e saída (a); Região da parte ativa dos enrolamentos (b)	40
Figura 18 – Representação bidimensional da malha (2D): (a) Malha inicial; (b) Malha final	44
Figura 19 – Representação tridimensional da malha (3D): (a) Região superior do domínio; (b) Região inferior do domínio	45
Figura 20 – Comparação da temperatura da bobina AT com distribuição não uniforme: óleo vegetal (a) e óleo mineral (b)	52
Figura 21 – Comparação da temperatura da bobina AT com distribuição uniforme: óleo vegetal (a) e óleo mineral (b)	53
Figura 22 – Comparação da temperatura das bobinas BTs: óleo vegetal (a) e óleo mineral (b)	54
Figura 23 – Campo de temperatura do óleo vegetal: distribuição uniforme de perdas (a) e distribuição não uniforme (b)	57
Figura 24 – Campo de temperatura do disco 131 da bobina AT e do disco 123 das BTs: distribuição uniforme (a) e distribuição não uniforme (b)	58
Figura 25 – Campo de temperatura do óleo mineral: distribuição uniforme das perdas (a) e distribuição não uniforme das perdas (b)	59

Figura 26 – Campo de temperatura do óleo mineral do disco 131 da bobina AT e do disco 123 das BTs: distribuição uniforme (a) e distribuição não uniforme (b)	60
Figura 27 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo vegetal : -30% (a), -20% (b), -10% (c), 0% (d) +10% (e), +20% (f), +30% (g)	63
Figura 28 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo mineral : -30% (a), -20% (b), -10% (c), 0% (d) +10% (e), +20% (f), +30% (g)	64
Figura 29 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo vegetal no disco 111: -30% (a), 0% (b), +30% (c)	65
Figura 30 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo mineral no disco 111: -30% (a), 0% (b), +30% (c)	65
Figura 31 – Escoamento do óleo na entrada da coluna	67
Figura 32 – Análise do desvio de óleo externo: Escoamento de óleo nas BTs (a); Escoamento de óleo na AT (b)	68
Figura 33 – Escoamento do óleo no espaçador: (a) Vista 2D de um corte abaixo dos discos 118 (AT) e 111 (BT); (b) Ampliação da Figura 33 (a)	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição de perdas nos discos da bobina AT	41
Gráfico 2 – Distribuição de perdas nos discos da bobina BT	42
Gráfico 3 – Distribuição não uniforme do fluxo de calor nos discos da bobina AT	42
Gráfico 4 – Temperatura média de saída das bobinas	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Características do transformador	31
TABELA 2 – Propriedades térmicas dos óleos	39
TABELA 3 – Verificação dos resultados	44
TABELA 4 – Temperaturas médias entre discos para a AT	46
TABELA 5 – Temperaturas experimentais, calculadas e estimadas para a AT	47
TABELA 6 – Temperaturas medidas, calculadas e estimadas para a BT1.2	47
TABELA 7 – Temperaturas com distribuição uniforme com óleo mineral e vegetal	50
TABELA 8 – Temperaturas com distribuição não uniforme com óleo mineral e vegetal ..	52
TABELA 9 – Influência da vazão mássica no temperatura <i>hotspot</i> com óleo vegetal e distribuição não uniforme	61
TABELA 10 – Influência da vazão no temperatura <i>hotspot</i> com óleo mineral e distribuição não uniforme	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das categorias	28
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
AF	Ar Forçado
AN	Ar Natural
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
GP	Grau de Polimerização
OD	Óleo Dirigido
OF	Óleo Forçado
OM	Óleo Mineral
ON	Óleo Natural
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OV	Óleo Vegetal
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Redes Eléctricas
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INRI	Instituto de Redes Inteligentes
LabCAE	Laboratório assistido por computador
MVF	Método dos Volumes Finitos
MEF	Método dos Elementos Finitos
THNM	<i>Thermal-Hydraulic Network Model</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo
V	Volume
a	Área
ρ	Densidade
\mathbf{v}	Velocidade
\mathbf{S}_u	Termo fonte especificado pelo usuário
\mathbf{T}	Tensor de tensão
\mathbf{f}_b	Vetor de força de corpo
E	Energia total
H	Entalpia total
q	Fluxo de calor
A	área da superfície
$\mathbf{d}a$	Vetor de superfície

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.2	JUSTIFICATIVA	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	CENÁRIO E FUNCIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES	20
3.2	COMPORTAMENTO TÉRMICO EM TRANSFORMADORES	25
3.3	USO DE CFD EM TRANSFORMADORES	28
4	MATERIAIS UTILIZADOS	30
4.1	TRANSFORMADOR ELEVADOR TRIFÁSICO	30
4.2	CONFIGURAÇÃO DO COMPUTADOR UTILIZADO	31
5	MODELAGEM NUMÉRICA	32
5.1	DOMÍNIO DO PROBLEMA E SIMPLIFICAÇÕES	34
5.2	CARACTERÍSTICAS DOS ÓLEOS	39
5.3	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	40
5.4	PERDAS TÉRMICAS NAS BOBINAS	41
6	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	43
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
7.1	COMPARAÇÃO ENTRES O ÓLEO MINERAL E VEGETAL	49
7.2	ANÁLISE DAS PERDAS: DISTRIBUIÇÃO UNIFORME VS DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME	55
7.2.1	Simulação com óleo vegetal	55
7.2.2	Simulação com óleo mineral	58
7.3	INFLUÊNCIA DA VAZÃO MÁSSICA NO COMPORTAMENTO TERMO-HIDRÁULICO DO TRANSFORMADOR	60
7.4	ESCOAMENTO DO ÓLEO	67
8	CONCLUSÕES	70
9	TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

As redes de energia elétrica atuais estão diante de uma série de desafios crescentes. Isso se deve ao aumento da demanda por energia, à disponibilidade para geração de energia, aos custos inerentes, às preocupações ambientais e ao envelhecimento das infraestruturas (NASSAR; AISSA; ALSADI, 2017). Entre os vários componentes do sistema elétrico de potência, os transformadores de potência cumprem a função de ajustar tanto tensão quanto corrente, interligando linhas de transmissão e subestações do sistema (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Devido aos elevados custos e grandes dimensões desses equipamentos, bem como à sua localização frequentemente em áreas remotas, as falhas nesses dispositivos podem resultar na interrupção do fornecimento de energia em regiões extensas (AZEVEDO et al., 2007; JAHROMI et al., 2009). Além disso, a retirada e substituição desses equipamentos vêm acompanhadas de prejuízos financeiros e materiais consideráveis, levando a longos períodos de inatividade do sistema (ZHANG, 2017).

A durabilidade dos transformadores de potência é influenciada tanto pela deterioração inerente dos seus componentes, quanto pelos esforços elétricos, mecânicos e térmicos sofridos, provenientes de sobrecargas e curtos-circuitos (RIES, 2007). No entanto, a temperatura é o fator mais impactante na vida útil desses equipamentos, conforme demonstrado no guia IEEE (1995), que estabelece uma relação direta entre a temperatura e a vida operacional do transformador. Mesmo com alta eficiência dos transformadores, uma parte da energia é convertida em calor devido ao efeito Joule presente nos enrolamentos (SANTISTEBAN et al., 2019; KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Esse acréscimo de temperatura no interior do aparelho constitui uma das principais causas de falhas, devido ao superaquecimento dos condutores na parte ativa e à manutenção da operação em faixas de temperatura acima do recomendado (CHRISTINA et al., 2018). Isso realça a relevância do prognóstico na gestão da condição desses equipamentos, detectando dados como pressão e temperatura do óleo, e temperatura dos enrolamentos (ELMASHTOLY; CHANG, 2020). Pesquisas recentes também avaliam o uso de inteligência artificial para diagnosticar problemas nos transformadores (ZHANG et al., 2020).

Durante a fase de projeto do transformador, um dos parâmetros de maior relevância é a identificação do "hotspot", o ponto de maior temperatura. Este processo de determinação é usualmente fundamentado em modelos térmicos ou equações empíricas, contribuindo para a compreensão da distribuição térmica do equipamento (ZHANG, 2017). Diversas metodologias foram empregadas com o objetivo de estimar o escoamento do óleo e a distribuição de temperatura nas bobinas dos transformadores durante sua operacionalização, conforme descrito em estudos recentes (TAN et al., 2023; RODRIGUES et al., 2023; CHI et al., 2022; BARTH et al., 2020). Entre as abordagens adotadas, destacam-se principalmente duas: a Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) e os Modelos de Redes Termo-Hidráulicas (THNM, do inglês *Thermal Hydraulic Network Models*). Ambos os

métodos têm se mostrado eficazes na predição das condições operacionais de transformadores elétricos. Comparativos feitos em literaturas como Santisteban et al. (2019) e Campelo et al. (2016) evidenciam a superioridade da precisão da CFD, devido à incapacidade do THNM em resolver completamente o perfil do escoamento, o que compromete a reprodução de eventos como as inversões do escoamento. Por outro lado, os Modelos THNM apresentam vantagens significativas para desenho e acompanhamento em tempo real, graças à agilidade na obtenção de resultados e a facilidade de integração com outros sistemas já implementados (YUAN et al., 2022; CIGRE, 2016).

A temperatura de operação exerce o maior impacto na isolação do transformador, visto que um de seus componentes é o óleo. Este tem a função dual de auxiliar na dissipação do calor e fornecer isolação, em conjunto com a isolação incorporada nos condutores e enrolamentos. A isolação dos condutores, normalmente composta por papel kraft, sofre o impacto mais notável (RIES, 2007). Como a celulose, seu componente principal, tem sua taxa de reação acelerada com o aumento da temperatura, ocorre a despolimerização, impactando, por seqüência, as características mecânicas do material (MATHARAGE; LIU; WANG, 2016; YANG et al., 2011). Como essa isolação está integrada aos condutores que formam os enrolamentos, substituí-la se torna inviável, muitas vezes relacionando a vida útil da isolação à própria vida útil do transformador (GORGAN et al., 2012; PORTELLA et al., 2011).

Embora existam materiais isolantes mais avançados, como o Nomex, que apresentam menor sensibilidade a variações térmicas e suportam temperaturas mais elevadas sem sofrer uma taxa acelerada de degradação, a isolação de um transformador trifásico não depende exclusivamente desses materiais. A eficácia da isolação resulta da combinação de todos os isolantes sólidos e líquidos utilizados no sistema (CONTRI et al., 2024). Quanto aos fluidos isolantes, a quantidade de umidade varia conforme a estrutura química, atuando como catalisador na decomposição da celulose e conseqüente influência na longevidade do equipamento. Nesse sentido, em pesquisas sobre envelhecimento de isolantes sólidos, destaca-se o uso de óleos vegetais para aumentar a vida útil do transformador em relação aos óleos minerais (MCSHANE et al., 2002). Também, a utilização de óleo mineral traz outras desvantagens, como sua proveniência de energia não renovável, baixa biodegradabilidade e riscos ambientais em caso de derramamento, como a contaminação do solo. Isso torna a utilização de óleo vegetal mais vantajosa, visto que este apresenta uma taxa de reciclagem de cerca de 99% e possui um alto ponto de combustão, minimizando o risco de incêndio e permitindo o uso próximo a pontos de água (RAFIQ et al., 2015). Contudo, há desafios no uso de óleos vegetais em transformadores, uma vez que apresentam maior viscosidade cinemática, o que pode reduzir o escoamento do fluido ao passar pelas bobinas e comprometer a transferência de calor em comparação com o óleo mineral (AHMED; ISLM; KARMAKER, 2021).

Nessa perspectiva, conforme indicado pelo estudo estatístico conduzido pelo CIGRE (2013), as ocorrências de desligamento em transformadores de potência, seja nas subestações ou nos transformadores elevadores predominantemente empregados em usinas geradoras, estão

principalmente associadas a falhas nos enrolamentos. Portanto, torna-se relevante a realização de pesquisas que investiguem o comportamento de diferentes tipos de óleo e seu impacto térmico nos enrolamentos de transformadores trifásicos. Nesse contexto, o presente estudo propõe uma avaliação da performance térmica do óleo vegetal e do óleo mineral em um transformador trifásico em operação. Para tal, foi empregada uma metodologia baseada em métodos numéricos com a distribuição de perdas uniformes e não uniformes, cujos resultados demonstraram que o óleo vegetal apresentou um desempenho térmico superior.

2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo simular o escoamento de óleo vegetal e mineral nos enrolamentos de um transformador trifásico, e analisar como a distribuição de perdas, a vazão de entrada, e medidas construtivas influenciam o perfil de temperatura das bobinas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para este propósito, têm-se os objetivos específicos:

- Realizar a revisão bibliográfica sobre o tema;
- Desenvolver uma geometria simplificada do transformador para simulações;
- Criar um modelo simplificado do transformador para as simulações;
- Analisar os resultados obtidos nas simulações;
- Comparar os resultados das simulações com dados de modelos térmicos anteriores;
- Analisar o desempenho do óleo vegetal e óleo mineral no modelo;
- Analisar a perda de carga nas bobinas utilização do óleo vegetal e óleo mineral com variação da vazão mássica;
- Comparar o comportamento do óleo com a distribuição uniforme das perdas e não uniforme;

2.2 JUSTIFICATIVA

O estudo térmico de transformadores é de significativa importância para antecipar as temperaturas e mitigar os riscos de falha. A utilização da simulação de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) representa uma contribuição para a compreensão e o fortalecimento dos modelos térmicos fornecendo dados detalhados do comportamento termo-hidráulico do equipamento.

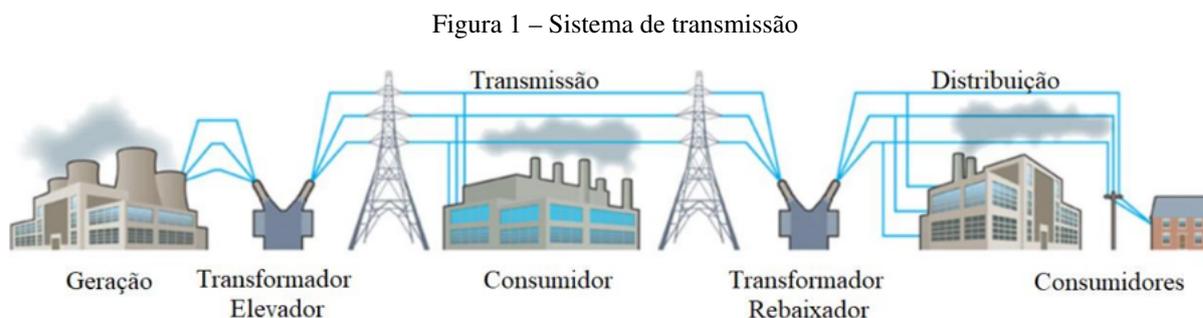
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre transformadores no cenário nacional, abordando seu funcionamento, os processos de aquecimento e dissipação de calor, com ênfase no comportamento térmico de transformadores imersos em óleo isolante. São discutidos o aquecimento na parte ativa, a dissipação do calor nos radiadores, além dos diferentes tipos de enrolamentos e configurações de sistemas de dissipação de calor. Por fim, foi feita a revisão dos modelos térmicos utilizados para determinar as temperaturas dos transformadores, incluindo métodos analíticos e simulações de CFD.

3.1 CENÁRIO E FUNCIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES

O aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, em conjunto com o crescente distanciamento entre as novas fontes de energia e os principais centros consumidores, emerge como um desafio substancial para a infraestrutura de transmissão de energia (BARTH et al., 2020; MELLO; NEVES, 2022). Segundo informações do ONS (2024), observa-se um aumento considerável na extensão das linhas de transmissão brasileiras ao longo das últimas duas décadas, totalizando mais de 171.000km. No entanto, para viabilizar a transmissão eficiente de energia em distâncias significativas, torna-se necessário a implementação de subestações para a elevação e redução da tensão (ROBBA et al., 2021).

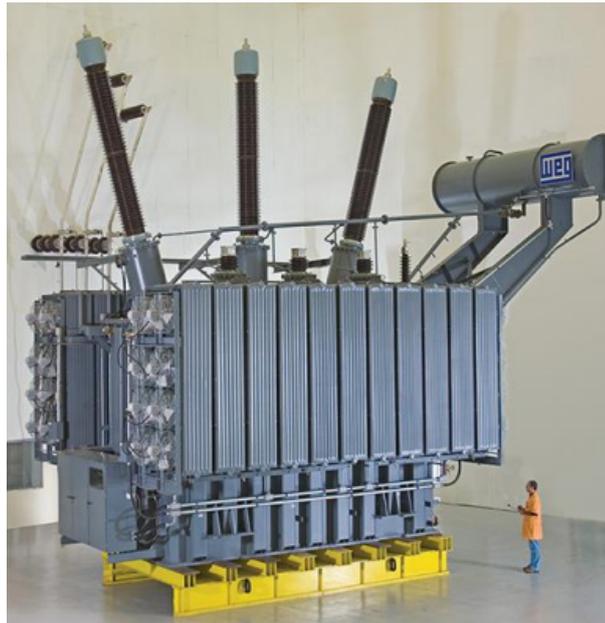
Os transformadores são dispositivos no sistema elétrico que atuam como mediadores para adequar a tensão ou corrente conforme a demanda (JÚNIOR, 2011). Essa conversão facilita a interligação entre fontes de energia e cargas que operam em diferentes níveis de tensão. Geralmente, eles consistem em um enrolamento primário, onde a energia elétrica é introduzida, e um enrolamento secundário, onde a energia é ajustada e disponibilizada (RIES, 2007; KULKARNI; KHAPARDE, 2004). A Figura 1 ilustra um esquema típico de transmissão, destacando a posição estratégica dos transformadores dentro desse sistema elétrico.



Fonte: Medeiros (2023).

Além de processar a energia proveniente das fontes até a subestação, os transformadores são frequentemente instalados em localidades remotas devido às suas robustas dimensões construtivas e ao seu elevado custo, que compõem cerca de 60% do investimento total em uma subestação (JAHROMI et al., 2009; GORGAN et al., 2012). A Figura 2 apresenta um exemplo de transformador de potência trifásico, destacando sua complexidade e dimensão no contexto do sistema elétrico.

Figura 2 – Transformador de potência

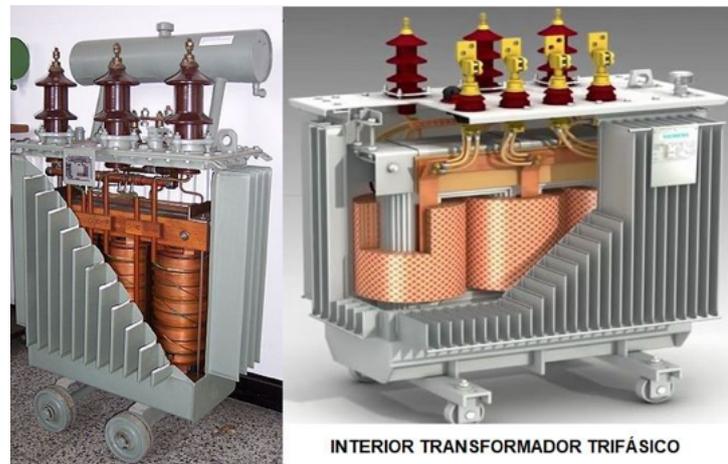


Fonte: WEG (2024).

Internamente, a maioria dos transformadores são projetados com uma bobina de baixa tensão envolvendo o núcleo magnético e, de forma concêntrica, uma bobina de alta tensão. O espaço entre as bobinas e o núcleo é preenchido com óleo isolante ou ar, dependendo se o transformador é imerso em óleo ou é seco. Esta disposição é exemplificada na Figura 3, que apresenta a configuração interna de um transformador, exibindo as culatras superior e inferior, além da coluna central que suporta as bobinas. Dentro das regiões delimitadas pelas bobinas AT e BT, encontram-se as seções dos condutores de cobre, revestidos por isolantes geralmente feitos de papel especialmente tratado. Esses materiais são escolhidos para proporcionar propriedades isolantes eficazes, especialmente quando impregnados com óleo mineral para transformadores (RIES, 2007; MEDEIROS, 2020).

Os designs dos enrolamentos de um transformador são adaptados para atender às classificações de tensão e temperatura, para as quais são especificados diferentes tipos de enrolamentos. Estes podem ser configurados em discos, com espiras sobrepostas horizontalmente ou em camadas, com espiras sobrepostas no sentido vertical, como indicado nas Figuras 4(a) e 4(b) (RIES, 2007; PRESS, 2001). Esses designs permitem a circulação do óleo refrigerante através de canais radiais e/ou axiais, essenciais para a dissipação de calor. Além disso, em alguns casos,

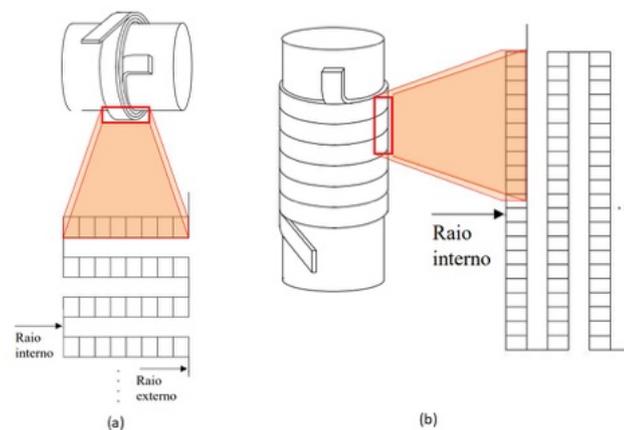
Figura 3 – Interior do transformador



Fonte: AREATECNOLOGIA (2024).

há mecanismos de regulação da tensão elétrica, os quais alteram a relação de transformação do equipamento ao modificar o número de espiras da bobina, conhecido como "*tap*", com o objetivo de manter uma tensão constante, frequentemente resultando em dimensões diversas (RIES, 2007; MEDEIROS, 2020).

Figura 4 – Tipos de enrolamentos: discos (a) e camadas (b)

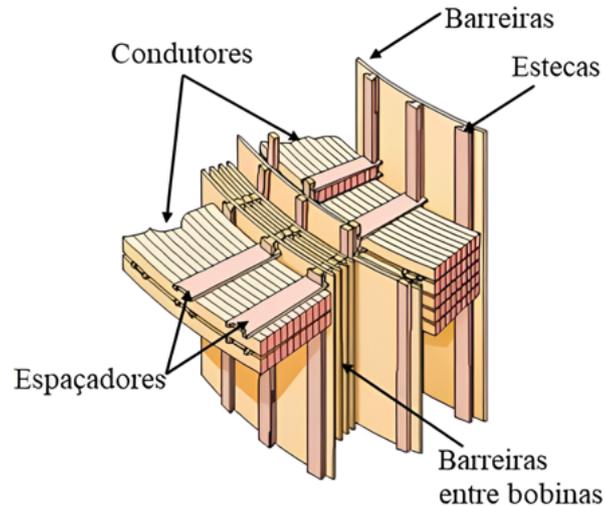


Fonte: Adaptado de Ries (2007) e Medeiros (2023).

Os enrolamentos dos transformadores estão sujeitos a diversos tipos de esforços, incluindo mecânicos, químicos e elétricos. Para garantir a sustentação e estabilidade mecânica, são empregados espaçadores ao longo dos enrolamentos, juntamente com isolamentos de material condutor de dureza adequada e outras estruturas de suporte, como ilustrado na Figura 5. Essas medidas visam manter a integridade dos enrolamentos, prevenindo deslocamentos que poderiam comprometer o desempenho do transformador. No entanto, nota-se que quanto maior a quantidade de espaçadores ao longo do enrolamento, maior será a sustentação do mesmo. Porém, essa maior quantidade de espaçadores pode dificultar a passagem do óleo refrigerante,

potencialmente levando a sobreaquecimentos (RIES, 2007; MEDEIROS, 2020).

Figura 5 – Componentes de sustentação de um transformador



Fonte: Adaptado de Medeiros (2023)

O isolamento em transformadores garante que componentes sujeitos a diferentes tensões, como os enrolamentos e o tanque, permaneçam separados para evitar o fluxo indesejado de corrente e prevenir descargas elétricas (CONTRI et al., 2024). O isolamento sólido de um transformador não apenas isola as partes metálicas sujeitas a diferentes tensões elétricas, mas também fornece suporte mecânico para as bobinas e direciona o escoamento do óleo isolante. Em sua maioria, é empregado material de origem da polpa da madeira, conhecido como papel kraft. No entanto, esse tipo de papel possui limitações relacionadas à temperatura, pois sua degradação é acelerada com o aumento da temperatura máxima (CONTRI et al., 2024; RIES, 2007).

A degradação da celulose ocorre devido à ação combinada da temperatura, umidade e oxigênio ao longo do tempo. Apesar de constantes modificações para aumentar sua durabilidade e confiabilidade, ainda existem áreas nos transformadores que operam além do limite tolerado. Isso pode resultar na ruptura do isolamento sólido, transformando-o em condutor e diminuindo a vida útil do transformador. Nesse sentido, a monitorização do papel isolante é realizada por meio do grau de polimerização (*Degree of Polymerization - GP*), uma medida que indica a quantidade de glicose presente na cadeia de celulose do papel (ZIOMEK et al., 2011; CONTRI et al., 2024; WILHELM; FERNANDES, 2015).

Os fluidos isolantes desempenham um papel dual, atuando tanto como isolantes quanto como agentes de dissipação de calor para manter a estabilidade térmica do transformador (RIES, 2007). A seleção estratégica do fluido isolante se torna significativa, pois são empregados também para facilitar a transferência de calor. O que torna a escolha adequada desse fluido determinante para a resistência do equipamento aos agentes ambientais, como umidade e poluentes (CONTRI et al., 2024).

O óleo mineral (OM) é o fluido mais comumente utilizado devido ao seu baixo custo e às suas propriedades dielétricas e refrigerantes. Originado da destilação fracionada do petróleo bruto, o OM possui boas características de resistência à oxidação (FOFANA, 2013). Entretanto, é conhecido por seu ponto de fulgor relativamente baixo e baixa biodegradabilidade, o que o torna um fluido com potencial impacto ambiental significativo. Esse fator tem levado empresas com foco ambiental mais responsável a optarem por fluidos alternativos (PASTERNAK; ROZGA, 2023; ALMEIDA; MUNIZ, 2021).

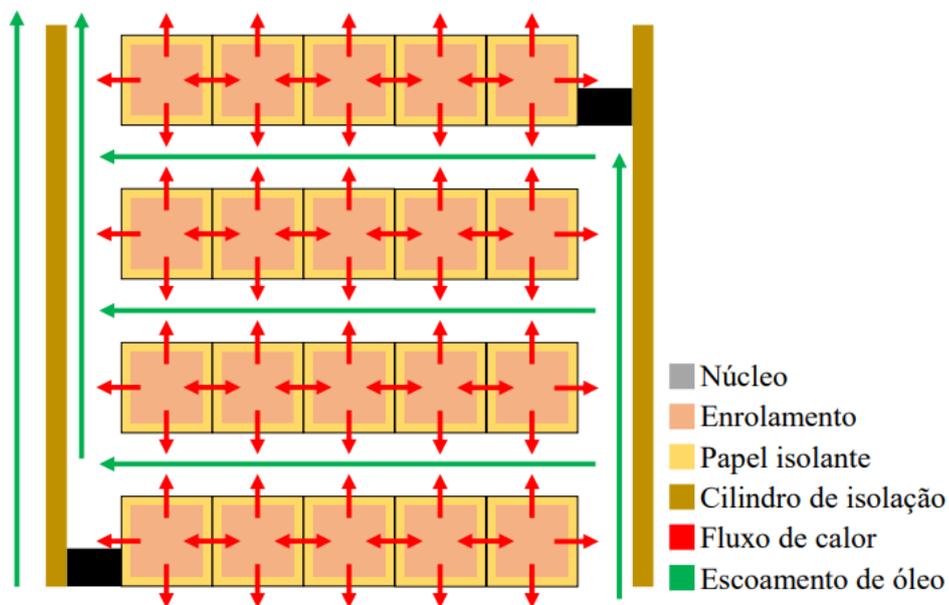
Por outro lado, o óleo vegetal (OV) apresenta um perfil ambiental mais positivo, sendo biodegradável, renovável, amplamente disponível e considerado mais seguro como meio isolante e de dissipação do calor alternativo para transformadores. Sua utilização não limita a aplicação dos transformadores em áreas onde vazamentos de óleo poderiam causar grandes impactos, como rios e florestas. O interesse pelo uso de óleo vegetal foi intensificado após a crise do petróleo na década de 1970, que incentivou pesquisadores e tomadores de decisão a buscar alternativas de óleo de transformador renovável. No entanto, ainda existem desafios associados ao uso de óleo vegetal, como a necessidade de aditivos para reduzir a oxidação e o aumento da temperatura em comparação com o OM, devido à viscosidade do óleo vegetal afetar a transferência de calor (RAFIQ et al., 2015).

Adicionalmente, a introdução de tecnologias como a fotovoltaica e a incorporação de componentes de corrente contínua nos sistemas de transformadores têm exigido ajustes nos seus designs térmicos (CALIL; COSTA; SALLES, 2020). A implementação de tecnologia de alta tensão, juntamente com o aumento das cargas não senoidais provenientes de veículos elétricos *plug-in*, desafia a estabilidade do sistema, resultando em maiores perdas nos enrolamentos e afetando a vida útil dos transformadores (JIA et al., 2023; CZERNORUCKI et al., 2023). Considerando que os enrolamentos constituem os principais elementos suscetíveis a falhas nos transformadores de subestações, evidencia-se a importância do design térmico adequado (ISLAM; LEE; HETTIWATTE, 2018; MEDEIROS, 2023).

3.2 COMPORTAMENTO TÉRMICO EM TRANSFORMADORES

Os transformadores elétricos são conhecidos por sua eficiência notável. No entanto, uma parcela da energia que operam é dissipada na forma de calor, resultando em um aumento da temperatura interna (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Esse calor é gerado pela conversão da energia elétrica em energia térmica e só cessa quando a taxa de geração de calor se equipara à taxa de transferência de calor para o ambiente circundante (CENGEL, 2003). A Figura 6 ilustra o fluxo de calor gerado em cada espira do enrolamento do transformador. Cada espira, funcionando como um elemento gerador, interage termicamente com o papel isolante que a envolve, com as espiras adjacentes e com o óleo que circula em suas superfícies (MEDEIROS, 2023).

Figura 6 – Parte ativa



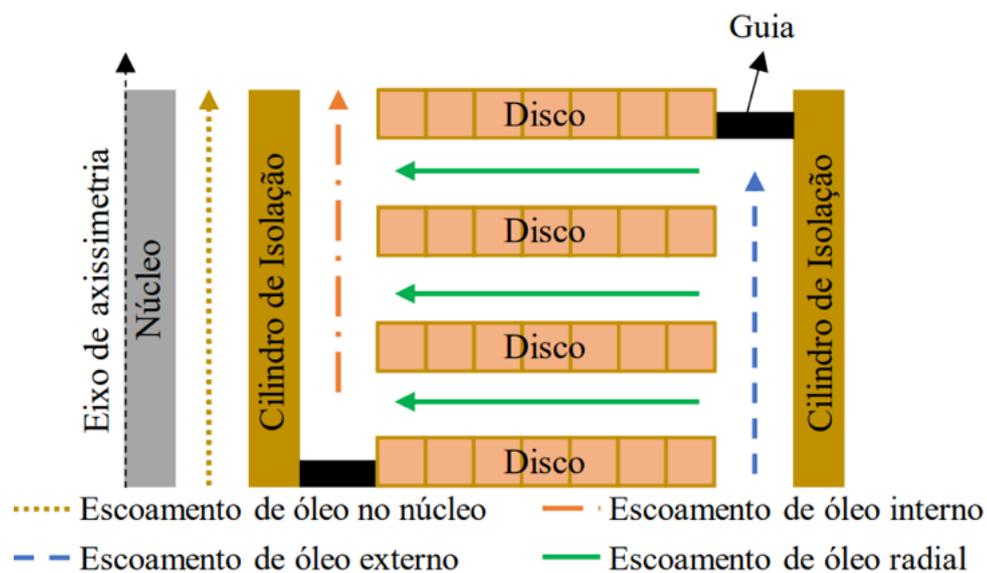
Fonte: Adaptado de Medeiros (2023).

As principais fontes de perda de calor em um transformador são o núcleo magnético e os enrolamentos que compõem sua parte ativa. Devido à sua configuração sólida, o calor produzido é conduzido e distribuído pelos enrolamentos e pelo núcleo por meio do processo de condução térmica. Quando o transformador é energizado apenas pelo seu circuito primário, com o secundário desconectado (ou seja, sem carga circulando nas bobinas secundárias), ocorre apenas a circulação da corrente de excitação na bobina primária, o que é conhecido como perda sem carga, caracterizando apenas as perdas no núcleo. Quando o circuito secundário é conectado e uma carga começa a ser alimentada, uma corrente de carga passa a circular pelas bobinas, resultando nas perdas sob carga. Essa circulação de corrente elétrica e suas correspondentes resistências causam perdas por efeito Joule nos condutores. Além disso, há perdas decorrentes do fluxo magnético disperso em partes metálicas, como no tanque (YU et al., 2023;

RIES, 2007; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; CENGEL, 2003). Essas perdas podem variar conforme a disposição dos discos e das espiras, devido à maneira como o fluxo magnético se dispersa. No entanto, alcançar essa distribuição não uniforme não é simples e, com frequência, em simulações térmicas, opta-se por uma distribuição uniforme (KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MEDEIROS, 2023).

Para dissipar o calor gerado, a parte ativa dos transformadores é projetada com canais para o escoamento do óleo. Esses canais facilitam a circulação do óleo entre os discos ou camadas, permitindo que o calor seja absorvido pelo óleo através da convecção para ser posteriormente dissipado. Diferentes arranjos podem ser adotados, resultando em diversas configurações de canais de óleo e, conseqüentemente, características específicas de troca de calor. Para otimizar esse processo, são empregados desvios (guias) de óleo, estruturas de papel fixadas em certos discos para bloquear o escoamento de óleo através do canal axial. Isso direciona o óleo a circular pelos canais radiais ao longo dos discos, promovendo uma troca térmica mais eficiente, conforme ilustrado na Figura 7. Essa abordagem se torna relevante quando o escoamento não se desenvolve adequadamente nos canais radiais, resultando em pontos quentes isolados (PRESS, 2001; RIES, 2007; CENGEL, 2003; KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Figura 7 – Desvios de óleo



Fonte: Medeiros (2023).

Uma vez que o óleo circula em contato com os elementos geradores de calor, como o núcleo e os enrolamentos, a eficácia da troca térmica está ligada à sua vazão. A taxa de transferência de calor aumenta com o aumento da vazão até que a diferença de temperatura entre os elementos geradores e o ambiente se equilibre. Para realizar modelagens térmicas precisas, é essencial determinar a distribuição de geração de calor a partir das perdas térmicas e da vazão de óleo que circula por seus canais (INCROPERA et al., 1996; MEDEIROS, 2023).

No entanto, a vazão nos enrolamentos dos transformadores é limitada devido a um fenômeno relacionado ao escoamento do óleo em um isolamento sólido. Nesse processo, o atrito

entre o óleo e os componentes dielétricos pode desencadear uma série de descargas elétricas e arcos voltaicos, conhecidos como eletrificação estática nos transformadores. À medida que o óleo flui pelos dutos, ocorre uma separação de carga nas interfaces entre o isolamento sólido e o óleo, o que também é observado nos tubos dos radiadores e nas bombas. As causas desse fenômeno não se limitam apenas à taxa de escoamento, mas também incluem a temperatura, umidade e o padrão de escoamento do fluido, todos sendo fatores a serem considerados. Isso apresenta um desafio significativo, especialmente à medida que a classe de potência do transformador aumenta, o que tende a exigir taxas de escoamento mais elevadas para fins de dissipação de calor (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Após atravessar as bobinas chegando na região de topo de óleo, o fluido ingressa no radiador, um dispositivo utilizado para dissipação de calor nos transformadores. Estes radiadores são trocadores de calor óleo-ar compostos por estruturas metálicas que facilitam a transferência térmica para o ambiente externo. Suas configurações variam conforme as necessidades de cada transformador (CENGEL, 2003; CIGRE, 2013; MEDEIROS, 2023).

Para aprimorar a eficiência térmica do transformador, são adotadas diversas configurações que impactam na circulação interna do óleo e na troca de calor com o ar ambiente. O escoamento interno do fluido pode ocorrer de maneira natural, seguindo o princípio do termossifão, onde as variações na densidade do óleo impulsionam o movimento (VEKEN et al., 2015), como ilustrado na Figura 8 (a), ou ser induzido por bombas, conforme mostrado na 8 (b). Adicionalmente, o óleo pode ser direcionado para os enrolamentos por meio de um sistema de distribuição, complementando a função das bombas, como visto na Figura 8 (c). Contudo, essa circulação adicional pode aumentar os custos do transformador e, em caso de falha das bombas, reduzir significativamente sua capacidade de dissipação de calor, levando a falhas (INCROPERA et al., 1996; RIES, 2007; KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Quanto à troca de calor externa, ela pode ocorrer naturalmente, onde o calor é dissipado por convecção natural do tanque para o ambiente, ou ser forçada, com a utilização de ventiladores nos radiadores, acelerando o processo de convecção. Além disso, em determinados casos, a circulação de água é incorporada nos radiadores, transformando-os em trocadores de calor óleo-água para melhorar ainda mais o desempenho térmico do transformador (INCROPERA et al., 1996; RIES, 2007; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; BARTH et al., 2020; NOGUEIRA et al., 2022).

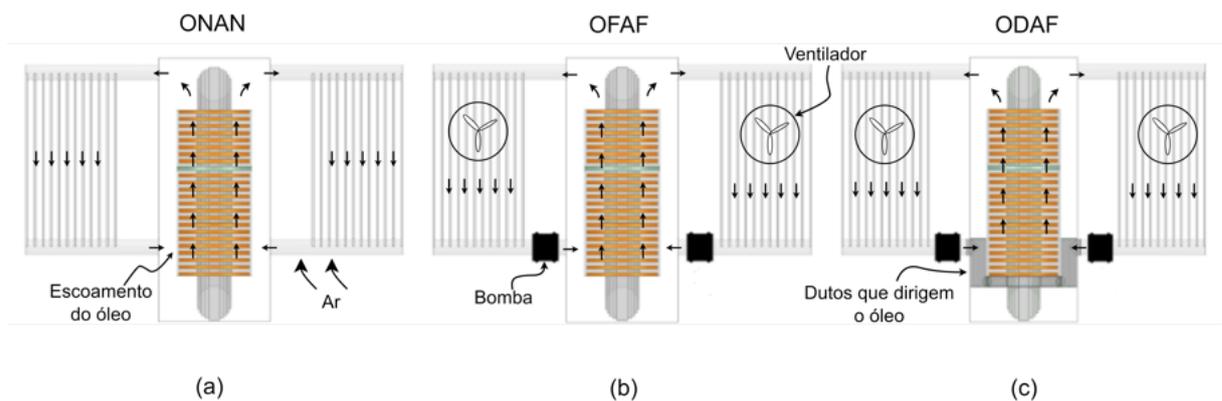
Os sistemas de dissipação de calor dos transformadores são identificados por um código de quatro letras, onde as duas primeiras letras indicam o método de dissipação interno e as duas últimas letras referem-se ao método de dissipação externo (BARTH et al., 2020; NOGUEIRA et al., 2022). A Tabela 1 apresenta as diversas aplicações desses sistemas de refrigeração.

Quadro 1 – Classificação das categorias

Classificação	Descrição
ONAN	Óleo Natural/ Ar Natural
ONAF	Óleo Natural/ Ar Forçado
OFAN	Óleo Forçado/ Ar Natural
OFAF	Óleo Forçado/ Ar Forçado
ODAN	Óleo Dirigido/ Ar Natural
ODAF	Óleo Dirigido/ Ar Forçado
OFWF	Óleo Forçado/ Água Forçada
ODWF	Óleo Dirigido/ Água Forçada

Fonte: Adaptado de Barth et al. (2020), Medeiros (2023)

Figura 8 – Sistemas de dissipação de calor: ONAN (a), OFAF (b) e ODAF (c)



Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2022).

3.3 USO DE CFD EM TRANSFORMADORES

Recentemente, tem havido um foco crescente na melhoria da vida útil dos transformadores. O uso de métodos analíticos e empíricos tem sido comum para analisar a distribuição de temperatura e identificar pontos críticos de calor. No entanto, com o avanço do poder computacional, soluções numéricas mais detalhadas têm sido empregadas para compreender o comportamento térmico em transformadores de potência. As técnicas numéricas mais prevalentes incluem os Modelos de Rede Térmica (TNM), que incorporam parcialmente equações analíticas para avaliar perdas e coeficientes de transferência de calor, e a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), que se baseia na solução das equações fundamentais (Navier-Stokes), derivadas da conservação de massa, momento e energia para o escoamento de fluidos. Embora o uso do CFD seja mais dispendioso e demorado computacionalmente em comparação com o TNM

e os métodos analíticos, é possível caracterizar detalhadamente os campos de pressão, velocidade e temperatura em todo o domínio computacional, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos fenômenos fluidos que ocorrem nos transformadores (TORRIANO; PICHER; CHAABAN, 2012).

A maioria dos estudos em CFD em transformadores de potência é conduzida em modelos bidimensionais (2D) axissimétricos, reduzindo significativamente o tempo de simulação devido à redução do número de células no domínio computacional. Por exemplo, Wang et al. (2024) utilizou um modelo axissimétrico em CFD para um estudo comparativo com a modelagem termo-hidráulica, focando no escoamento e temperatura do óleo. Enquanto isso, estudos como o de Tan et al. (2023) realizaram um estudo bidimensional 2D axissimétrico para investigar o comportamento do escoamento do óleo utilizando diferentes posicionamentos dos desvios de óleos autoblocantes. Além disso, estudos como Rodrigues et al. (2023) e Zhang et al. (2020) estabeleceram correlações para a transferência de calor nos enrolamentos de um transformador tipo disco para os modos de circulação OD e ON.

No entanto, estudos utilizando simulações em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) em um arranjo de discos têm buscado detalhar os canais de óleo entre os discos. Essas pesquisas avaliaram a influência das condições de contorno, variações geométricas e simplificações, revelando diferenças significativas nos resultados entre simulações 2D e 3D (TORRIANO; PICHER; CHAABAN, 2012). Além disso, comparações entre modelos 2D e 3D revelaram que o gradiente de temperatura e a compreensão do comportamento do óleo se aproximam mais da realidade com a modelagem 3D (TENBOHLEN et al., 2017). Estudos como o de Kebriti e Hossieni (2022) demonstraram que o CFD é uma excelente ferramenta para determinar a temperatura do óleo, incluindo pontos críticos de calor, e facilitar a compreensão do comportamento do óleo dentro dos transformadores, especialmente quando aplicado em modelos 3D em transformadores ONAN.

4 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste capítulo foram descritos equipamentos utilizados durante os estudos.

4.1 TRANSFORMADOR ELEVADOR TRIFÁSICO

O transformador utilizado nos ensaios térmicos, que serviu de base para as simulações, é o Transformador Elevador Trifásico, com uma relação de 13,8 kV para 230 kV, de potência nominal de 70 MVA, (Figura 9). Este transformador é um protótipo operacional que utiliza óleo vegetal e papel híbrido (kraft com revestimento de polímero) como isolantes, tornando-o não convencional, uma vez que a maioria dos transformadores utiliza óleo mineral. Seu sistema de dissipação de calor opera através de um método de óleo vegetal dirigido e água forçada (ODAF). Segundo a empresa parceira, conforme mencionado por Copel (2023), como parte de um Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D ANEEL 06491-0421/2016) da UFSM para a construção deste transformador, ele está atualmente em operação na Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza, em Antonina (PR).

Figura 9 – Transformador elevador trifásico



Fonte: Copel (2023).

O transformador é projetado com um núcleo envolvido por três colunas e enrolamentos concêntricos de alta e baixa tensão. O enrolamento de alta tensão é do tipo disco, com apenas uma camada, composto por 132 discos em cada coluna, cada um contendo 20 espiras. Por

outro lado, o enrolamento de baixa tensão é do tipo helicoidal, com duas camadas, totalizando 124 voltas em cada coluna, com uma espira por volta. As características construtivas, elétricas e operacionais do transformador, incluindo as especificações detalhadas dessas bobinas, são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do transformador

Parâmetro	Descrição
Potência nominal	70MVA
Circulação óleo	Óleo dirigido
Circulação de água	Água forçada
Núcleo	3 colunas
Enrolamento AT	Disco (132 discos/coluna)
Enrolamento BT	Helicoidal (2 camadas de 124voltas/coluna)
Tensão nominal	230kV/ 13,8kV

Fonte: Adaptado de Medeiros (2023).

4.2 CONFIGURAÇÃO DO COMPUTADOR UTILIZADO

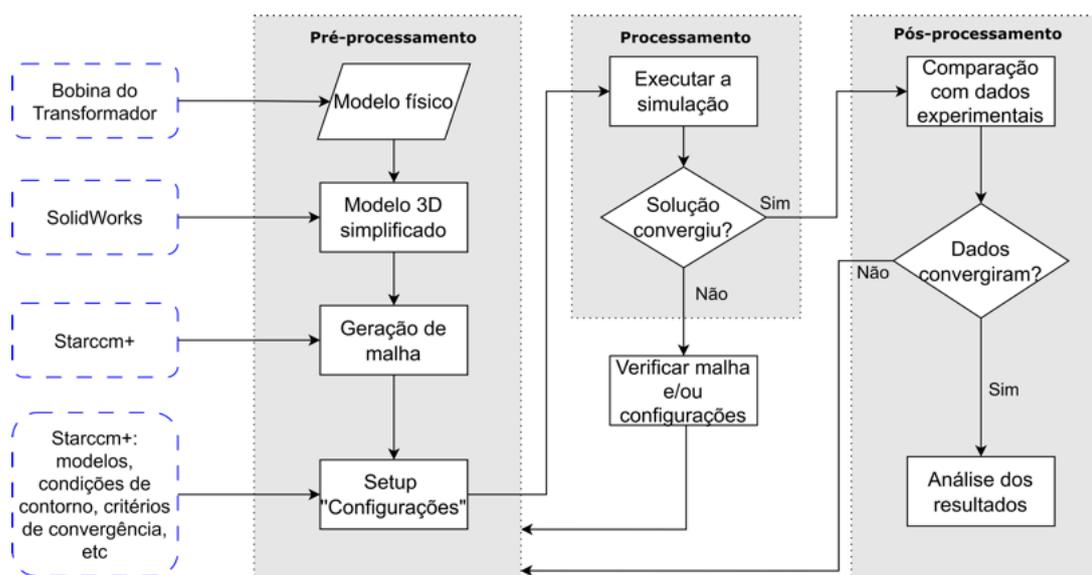
O computador utilizado é a Workstation PRD com dois processadores Intel Xeon Silver 4216, memória RAM 128GB DDR4 e placa de vídeo RTX 5000 16GB 1792. Esse computador encontra-se no laboratório assistido por computador (LabCAE), presente no Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e foi utilizado não só para a modelagem geométrica (CAD) mas também para a modelagem computacional de fluidos (CFD) em volumes finitos.

5 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica empregada neste estudo envolve o uso de ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) para avaliar o escoamento do óleo e a distribuição de temperatura do óleo nos enrolamentos, sendo numericamente resolvida pelo software comercial StarCCM+ 2310, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). Esta abordagem metodológica, detalhada na Figura 10, segue um modelo de três etapas:

- Pré-processamento: Identificação e construção do domínio computacional. Este processo inclui a realização de todas as simplificações geométricas necessárias para permitir a discretização do domínio computacional (criação de malhas). Adicionalmente, nesta etapa, são configurados os parâmetros para a resolução do problema;
- Processamento: Solução dos problemas definidos na etapa de pré-processamento, utilizando a leitura do domínio já configurado. Isso é realizado por meio da aplicação das equações governantes que direcionam as análises de fluidodinâmica computacional;
- Pós-processamento: Após a execução das simulações, os resultados obtidos são comparados com dados experimentais. Essa comparação é feita para validar o modelo computacional e para aprofundar a compreensão sobre o comportamento dos fenômenos físicos investigados.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2023).

Este método computacional fundamenta-se na solução das equações governantes de Navier-Stokes, que estabelecem a conservação da massa, do momento e da energia para um fluido. Essas equações podem ser escritas da seguinte forma (SIEMENS, 2024):

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dV + \oint_A \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{da} = \int_V \mathbf{S}_u \, dV \quad (5.1)$$

Equação do momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} \, dV + \oint_A \rho \mathbf{v} \times \mathbf{v} \cdot \mathbf{da} = - \oint_A \rho \mathbf{I} \cdot \mathbf{da} + \oint_A \mathbf{T} \cdot \mathbf{da} + \int_V \mathbf{f}_b \, dV + \int_V \mathbf{S}_u \, dV \quad (5.2)$$

Equação da energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{E} \, dV + \oint_A \rho \mathbf{H} \mathbf{v} \cdot \mathbf{da} = - \oint_A \mathbf{q} \cdot \mathbf{da} + \oint_A \mathbf{T} \cdot \mathbf{v} \, \mathbf{da} + \int_V \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} \, dV + \int_V \mathbf{S}_u \, dV \quad (5.3)$$

Onde:

- t é o tempo;
- V é o volume;
- a é a área;
- ρ é a densidade;
- \mathbf{v} é a velocidade;
- \mathbf{S}_u é o termo fonte especificado pelo usuário;
- \mathbf{T} é o tensor de tensão;
- \mathbf{f}_b é o vetor de força de corpo;
- E é a energia total;
- H é a entalpia total;
- q é o fluxo de calor.

As simulações tratam do escoamento tridimensional do óleo, incorporando simetria no plano central. Para alcançar o regime permanente, foi empregada uma marcha no tempo. O Método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) foi utilizado para o acoplamento entre pressão e velocidade. Nesse contexto, adotou-se uma abordagem de modelagem baseada em pressão, com precisão espacial de segunda ordem e um critério de convergência de precisão da ordem de magnitude de 10^{-5} . Essa estrutura de modelagem é particularmente adequada para análises de fluidos incompressíveis. Além disso, considerou-se que o escoamento é

laminar, ou seja, quando o número de Reynolds é suficientemente baixo para evitar a transição para a turbulência.

Este capítulo está organizado em quatro seções técnicas. A primeira seção aborda o domínio do problema e as simplificações aplicadas na modelagem do transformador, destacando as escolhas para reduzir erros numéricos e manter a viabilidade computacional das simulações. A segunda seção detalha as propriedades térmicas dos óleos utilizados nas simulações, fornecendo dados essenciais para a análise da transferência de calor. A terceira seção descreve as condições iniciais e de contorno impostas na simulação, incluindo vazões, temperaturas e simplificações térmicas adotadas. A última seção apresenta a distribuição das perdas térmicas nas bobinas, discutindo a aplicação do fluxo de calor nas superfícies dos discos e a variação dessas perdas ao longo dos diferentes componentes do transformador.

5.1 DOMÍNIO DO PROBLEMA E SIMPLIFICAÇÕES

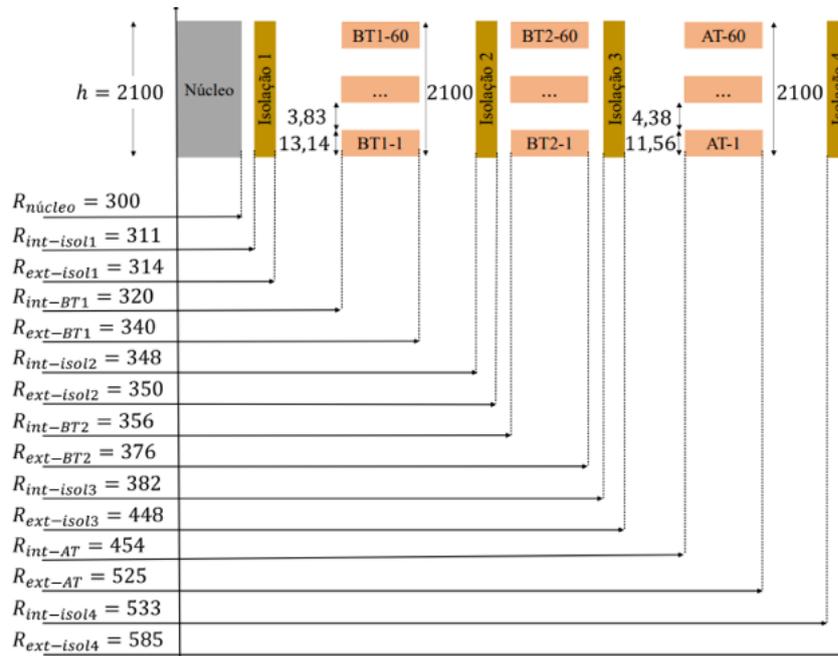
Na modelagem do transformador, foram implementadas simplificações geométricas com o intuito de reduzir o domínio do problema, assegurando a viabilidade computacional do modelo e minimizando o tempo de preparação na etapa de pré-processamento. Durante este processo, definiram-se os limites do domínio computacional, optando-se por ignorar as estecas e cilindros entre as bobinas para simplificação. Assim, a simulação do óleo foi realizada através dos enrolamentos de uma única coluna do transformador.

Para efeitos comparativos e aprofundamento da compreensão, foram aplicadas simplificações similares às de Medeiros (2023) ao analisar a construção dos enrolamentos de baixa tensão (BT). Adotou-se o formato "disco" para ambos os enrolamentos, em conformidade com o utilizado para o enrolamento de alta tensão (AT), embora, na prática, sua configuração seja helicoidal, como detalhado na Tabela 1. As três fases do transformador são idênticas em termos de dimensões construtivas.

A Figura 11 apresenta as dimensões do projeto do núcleo, as camadas 1 (BT1.1) e 2 (BT1.2) do enrolamento de baixa tensão, e a camada única do enrolamento de alta tensão, destacando os raios interno e externo do núcleo, os enrolamentos e os cilindros de isolamento, bem como os espaçamentos radiais e axiais dos canais de óleo, as espessuras e alturas totais de cada componente. Os enrolamentos de alta tensão contam com treze guias, sendo sete internos (discos 01, 27, 49, 67, 85, 107 e 132) e seis externos (nos discos 14, 38, 58, 76, 96 e 120). Já os enrolamentos de baixa tensão possuem nove guias em cada camada, com cinco nos canais axiais internos dos discos 01, 31, 64, 96 e 124, e quatro nos canais axiais externos dos discos 16, 49, 79 e 111.

Além disso, o transformador foi equipado com 13 sensores de fibra óptica MSENSE, distribuídos ao longo dos enrolamentos. Esses sensores foram posicionados dentro de espaçadores de papel, os quais foram, por sua vez, inseridos nos canais radiais entre os discos, de

Figura 11 – Dimensões construtivas



Fonte: Medeiros (2023).

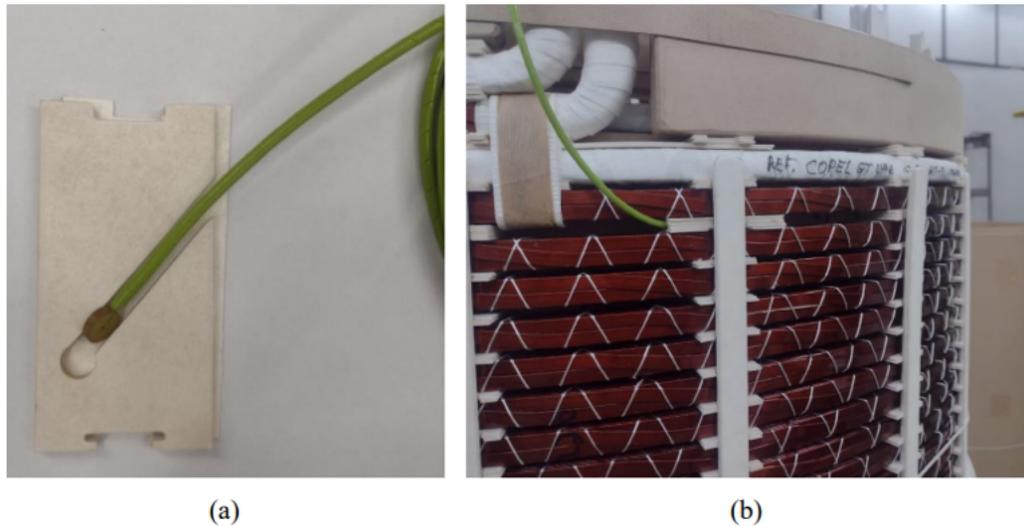
maneira que permitam o monitoramento da temperatura da face inferior de cada disco. Os sensores estão localizados nos discos 02, 66 e 132 da alta tensão (AT), e nos discos 02 e 123 da baixa tensão (BT1.2). Não foram realizadas medições na bobina BT1.1. Cada sensor possui uma precisão aproximada de $\pm 1^\circ\text{C}$. A Figura 12 apresenta dois registros fotográficos da instalação dos sensores de fibra óptica durante a fabricação e montagem do transformador. A Figura 12 (a) mostra a colocação da fibra na ranhura do espaçador de papel, enquanto a Figura 12 (b) ilustra a inserção do espaçador no canal radial entre dois discos.

Todos os enrolamentos do transformador foram considerados do tipo disco como na Figura 13 (a). Neste estudo, cada disco foi modelado como um bloco sólido, considerando os trabalhos anteriores de Tan et al. (2023), Zhang et al. (2020) e Yatsevsky (2014), que adotaram uma abordagem similar devido às espiras serem retangulares. A altura dos discos (H_d) foi uniformizada em todo o estudo, ignorando variações nos tamanhos dos taps e tratando cada seção dos discos como um único bloco sólido.

Além disso, o espaçamento entre os discos (H_e) foi mantido constante ao longo da bobina para simplificar a análise e os desvios (guias) de óleo, ou "washers", foram modelados com a mesma altura (H_d) dos discos, facilitando um escoamento uniforme do óleo. Esta simplificação foi baseada em estudos anteriores, incluindo o de Zhang et al. (2017), permitindo realizar análises eficientes sobre a perda de carga nas bobinas. A disposição e o comportamento do modelo são ilustrados na Figura 13 (b).

Na simulação, para a viabilidade do processamento, a modelagem concentrou-se apenas no fluido (óleo), representando os outros componentes, como discos e espaçadores, como vazios. Esta abordagem, usada anteriormente por Rodrigues et al. (2023), é visualizada na Figura

Figura 12 – Medições de temperatura: Instalação fibra óptica (a); Construtivo de uma coluna (b)



Fonte: Medeiros (2023).

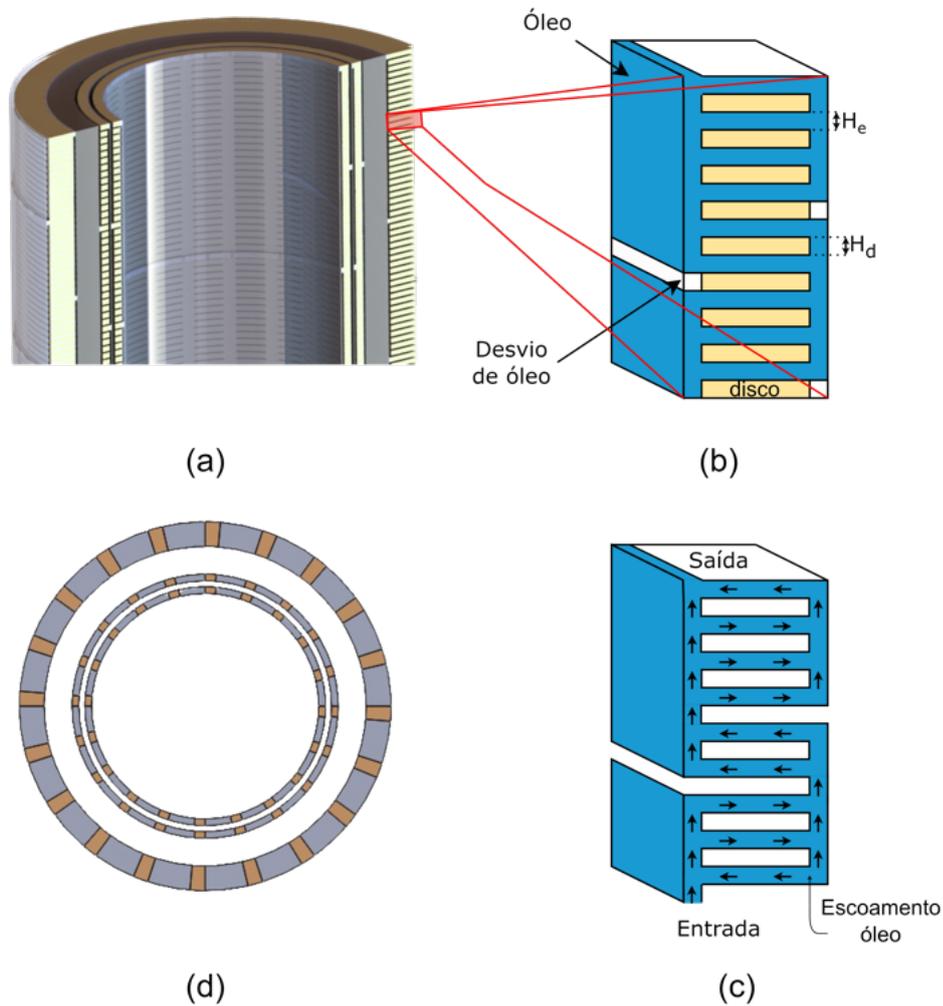
13 (c) que mostra o domínio de simulação e o escoamento do óleo.

Para a modelagem dos espaçadores, cada um foi considerado idêntico em tamanho e uniformemente distribuído ao longo da bobina, com uma contagem de 20 espaçadores entre os discos. Ajustou-se a dimensão desses espaçadores de modo que eles se alinhasssem com as dimensões dos discos, mantendo constante a área total, como mostrado na Figura 13 (d). Essa estratégia simplificada, previamente adotada por Smolka (2013), minimiza a necessidade de uma malha complexa para a simulação, o que poderia prolongar o tempo de processamento. É relevante notar que, enquanto Smolka aplicou essa técnica a espaçadores entre enrolamentos, a presente pesquisa foca nos espaçadores entre discos e bobinas, destacando a versatilidade da técnica de simplificação em diferentes aplicações no campo dos transformadores elétricos.

Com a aplicação de simplificações geométricas, foi identificada uma simetria circunferencial na disposição dos componentes do transformador, possibilitando a sua subdivisão em seções simétricas. Como resultado, propôs-se a inclusão de um plano de simetria no ponto médio exato do transformador, coincidindo com a metade do espaçador da bobina AT. Estudos anteriores apresentaram uma abordagem simplificada semelhante (TENBOHLEN et al., 2017). A Figura 14 apresenta uma representação tridimensional dos enrolamentos em formato de disco. A ampliação demonstra que os canais de circulação do óleo horizontal são formados pela abertura dos espaçadores entre os discos, além de mostrar os discos consecutivos e o plano de simetria na metade do transformador, exatamente no meio do espaçador. Por questões de clareza, os cilindros externos são exibidos parcialmente transparentes. Este plano de simetria representa um plano imaginário na simulação, utilizado para reduzir o domínio de análise, nesta situação sendo a metade, em áreas onde a geometria e o fluxo são simétricos (SIEMENS, 2024).

Com o intuito de proporcionar uma visualização e compreensão detalhada do percurso do óleo na coluna do transformador, foi elaborado um desenho assistido por computador (CAD)

Figura 13 – Simplificações: (a) Enrolamentos do tipo disco, (b) Espaçamento e guias de óleo, (c) Modelagem do fluido (Óleo), e (d) Distribuição dos espaçadores

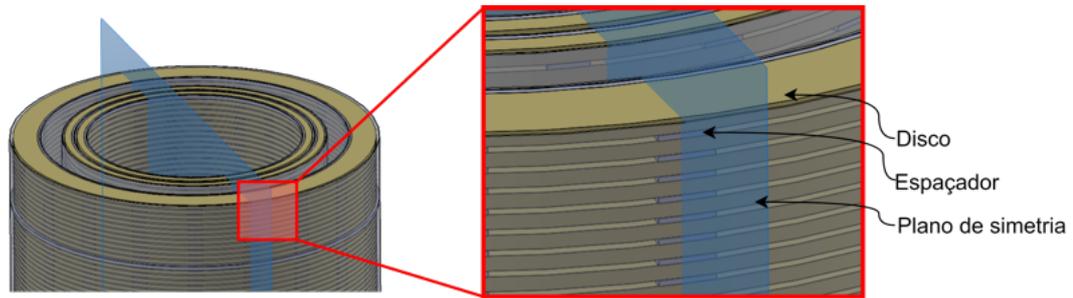


Fonte: Autor.

utilizando o software SolidWorks 2020 (Figura 15). Este desenho permitiu identificar não apenas os discos das bobinas AT, BT1.1 e BT1.2, mas também os desvios de óleo e a disposição dos espaçadores, que estão precisamente alinhados e espaçados entre si. Para melhorar a visualização, os cilindros externos foram renderizados parcialmente transparentes. Esta perspectiva permite a observação de todas as simplificações propostas, como a representação dos discos como um bloco sólido, o alinhamento dos espaçadores conforme as dimensões dos discos, a manutenção da mesma área ocupada, os desvios de óleo seguindo a altura dos discos e o espaçamento constante entre eles. A análise visual facilitada pelo CAD, com a implementação das simplificações, permitiu um entendimento mais eficaz dos conceitos de design, no qual contribuiu para o desenvolvimento da geometria subsequente do domínio do problema, ou seja, somente o óleo.

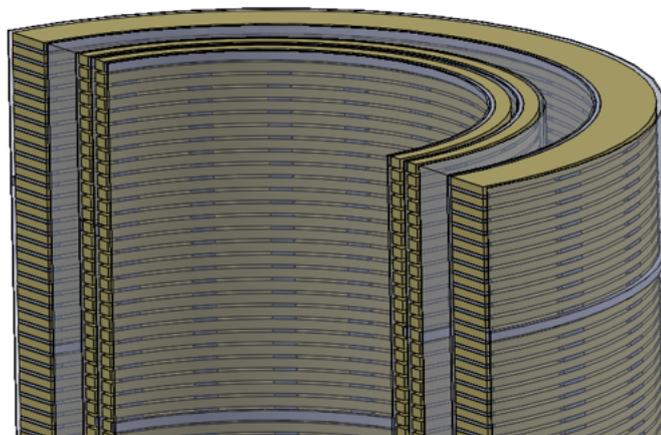
A partir da modelagem CAD, foi realizada a modelagem assistida por computador (CAE) utilizando o software StarCCM+ 2310, com foco exclusivo no volume de controle, isto

Figura 14 – Plano de simetria



Fonte: Autor.

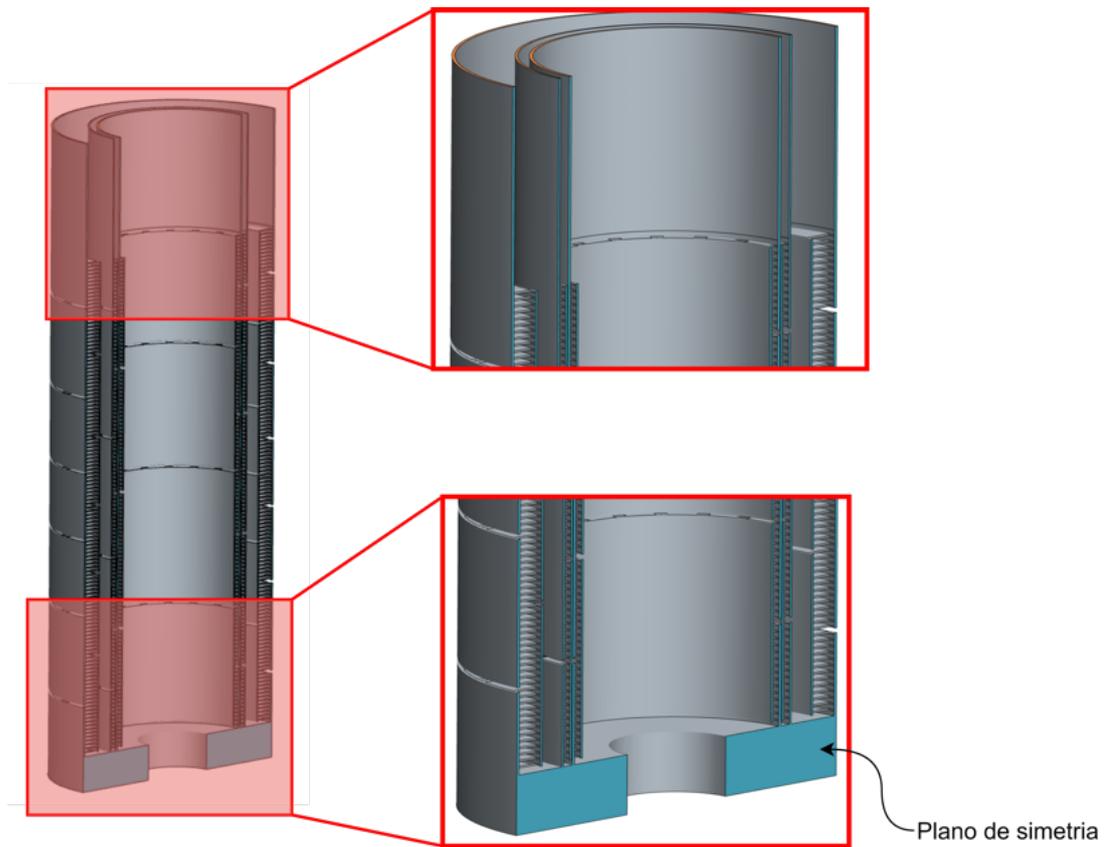
Figura 15 – Geometria simplificada



Fonte: Autor.

é, o percurso percorrido pelo óleo na coluna do transformador, conforme ilustrado na Figura 16. Nesta fase, foram introduzidas simplificações adicionais, tais como a inclusão de um reservatório situado abaixo das bobinas para facilitar a análise da perda de carga (a), e a implementação de uma extensão na região de saída para assegurar a adequada convergência do sistema (b). A área ampliada destaca uma porção da geometria em cor azul, indicando a região onde ocorre o plano de simetria. Além disso, é possível visualizar o tanque de entrada proposto, que auxilia na distribuição do óleo para cada bobina, e a extensão da saída, projetada para mitigar erros numéricos e favorecer a convergência dos dados. Com essas simplificações, a simulação computacional de dinâmica de fluidos (CFD) realizada com o StarCCM+ 2310 foi empregada para prever o comportamento do escoamento de óleo, avaliar a eficiência da transferência de calor e identificar áreas de potencial acúmulo de calor, que podem comprometer o desempenho e a vida útil do transformador.

Figura 16 – Domínio da simulação no StarCCM+ 2310: (a) Reservatório inferior e (b) Extensão na região de saída



Fonte: Autor.

5.2 CARACTERÍSTICAS DOS ÓLEOS

As propriedades do óleo utilizado nas simulações estão detalhadas na Tabela 2, fornecida pelo fabricante. Esta tabela descreve o óleo mineral Hyvolt II e o óleo vegetal Biovolt. Nota-se que essas propriedades são representadas por funções que variam em função da temperatura (T), o que aprimora a precisão das simulações de transferência de calor.

Tabela 2 – Propriedades térmicas dos óleos

Propriedade	Óleo Mineral	Óleo Vegetal
Viscosidade dinâmica ($\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$)	$2,42 \cdot 10^{-3} + 1,3 \cdot 10^6 \cdot T(K) \cdot e^{-0,07985 \cdot T(K)}$	$5,11 \cdot 10^{-3} + 22498 \cdot e^{-0,0438 \cdot T(K)}$
Densidade ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	$894,26 - 0,623 \cdot T(^{\circ}\text{C})$	$928,1 - 0,485 \cdot T(^{\circ}\text{C})$
Calor específico ($\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$)	$1773,2 + 4,34 \cdot T(^{\circ}\text{C})$	$1784,7 + 7,07 \cdot T(^{\circ}\text{C})$
Condutividade térmica ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$)	$0,1273 - 6,4 \cdot 10^{-5} \cdot T(^{\circ}\text{C})$	$0,1713 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot T(^{\circ}\text{C})$

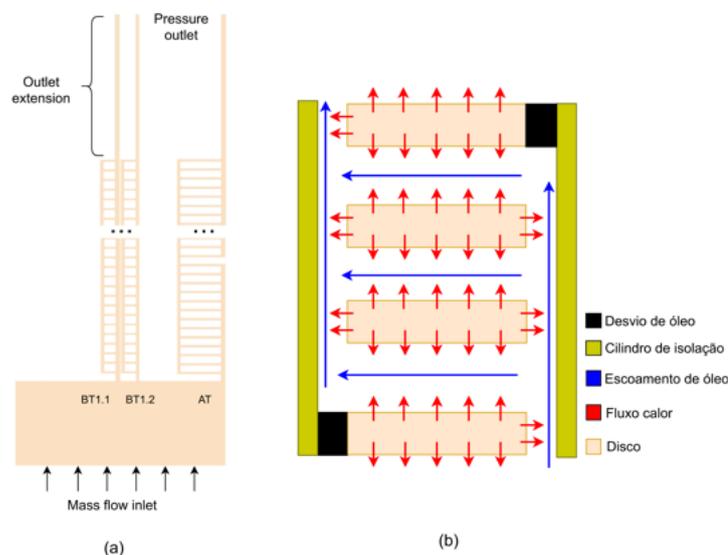
Fonte: Autor

5.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Para realizar a simulação do óleo nos enrolamentos de uma coluna do transformador, uma vazão massica de entrada de $3,829\text{ kg/s}$ à uma temperatura medida na saída do trocador de calor de $53,3^\circ\text{C}$ foi aplicada, gerada pelas bombas, assumindo-se ausência de perdas devido ao direcionamento do óleo. Devido à presença de três colunas no transformador em questão, a vazão total foi dividida por 3 e aplicado em um reservatório abaixo da bobina para auxiliar em análises de perda de carga nas bobinas do transformador. Na saída, foi imposta uma pressão manométrica de 0 Pa , além de uma extensão e separação da saída de cada bobina, visando à estabilização e à convergência do sistema (Figura 17 (a)). Embora essa simplificação na região de saída impossibilite algumas análises de temperatura na região de óleo acima das bobinas, conhecida como região de topo de óleo, ela permite a realização de análises isoladas da temperatura de saída de cada bobina.

Considerando as simplificações adotadas, tais como a modelagem do disco inteiro como uma unidade, foi estabelecido um fluxo de calor nas paredes dos discos que entram em contato com a circulação do óleo, permitindo a troca térmica. As paredes dos outros componentes, como os espaçadores e o desvio de óleo, foram tratadas como adiabáticas. A Figura 17 (b) ilustra o percurso do óleo, delimitado pela presença dos discos até o cilindro de isolamento no sentido axial. Devido ao tratamento adiabático das paredes do cilindro de isolamento, o óleo troca calor apenas com as regiões laterais dos discos. Durante seu percurso, o óleo também encontra o desvio de óleo, que contribui para a sua mudança de direção. Embora as paredes do desvio de óleo sejam consideradas adiabáticas, isso permite que o óleo circule no sentido radial, trocando calor nas regiões inferiores e superiores dos discos.

Figura 17 – Aplicação das condições de contorno: Região de entrada e saída (a); Região da parte ativa dos enrolamentos (b)

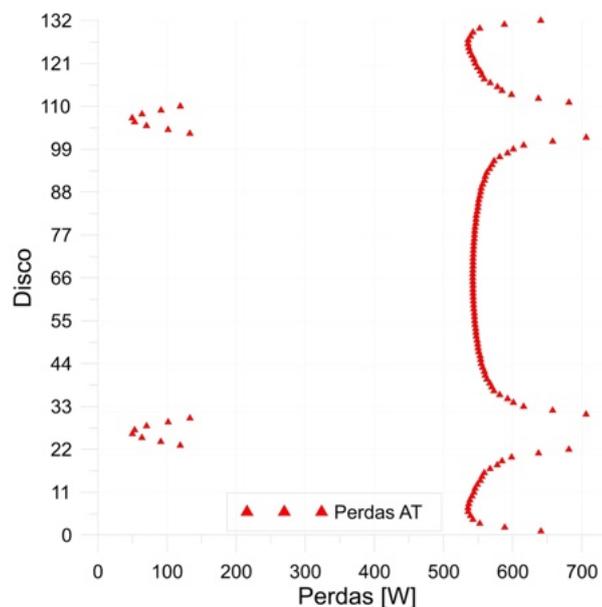


Fonte: Autor.

5.4 PERDAS TÉRMICAS NAS BOBINAS

O fluxo de calor aplicado nas paredes dos discos decorre das perdas do transformador, que incluem tanto o efeito Joule quanto as correntes parasitas na região ativa dos enrolamentos. Inicialmente, adotou-se uma abordagem que considerava uma distribuição homogênea ou uniforme das perdas em todos os discos, ou seja, um fluxo de calor médio e constante na superfície de todos os discos. Para o enrolamento de alta tensão (AT), foi considerado 1306 W/m^2 na condição de TAP 5, para o enrolamento de baixa tensão (BT1.1) foi de 1643 W/m^2 , e para BT1.2 foi de 1629 W/m^2 . Contudo, as perdas variam ao longo dos discos, especialmente na bobina de alta tensão (AT), onde foi observada uma variação significativa das perdas nos discos das extremidades da coluna do transformador e, principalmente, nos discos que são taps e nos discos próximos aos taps, conforme ilustrado no Gráfico 1, que apresenta as perdas disco a disco da bobina AT.

Gráfico 1 – Distribuição de perdas nos discos da bobina AT



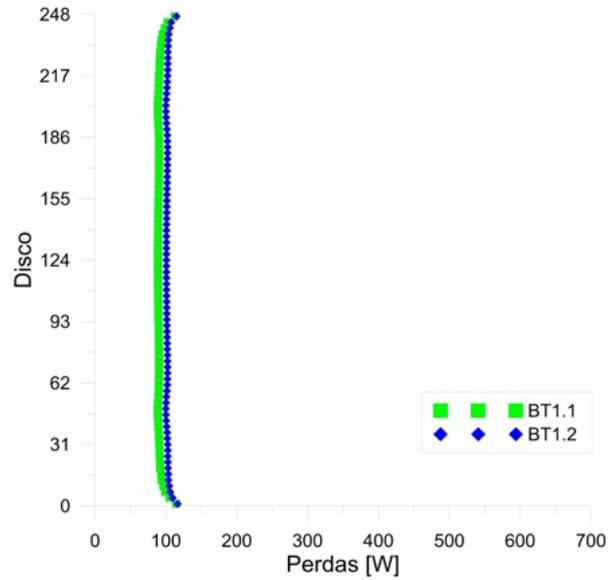
Fonte: Autor.

Nas bobinas de baixa tensão (BT), as perdas não apresentam variações significativas de disco para disco, principalmente devido à ausência de taps, conforme ilustrado no Gráfico 2. Por esse motivo, neste trabalho, manteve-se a distribuição uniforme das perdas para a bobina BT. Em contrapartida, para fins comparativos, foi proposta uma distribuição não homogênea das perdas nos discos da bobina de alta tensão (AT), onde o fluxo de calor não é constante de disco para disco, resultando em uma distribuição de fluxo de calor não uniforme ao longo do enrolamento AT. Nesse sentido, o fluxo de calor foi aplicado individualmente nas superfícies dos discos com maior variação das perdas, ou seja, nos taps que correspondem aos discos 23 a 30 e 103 a 110, além dos discos 1, 2, 21, 22, 31, 32, 66, 101, 102, 111, 112, 131 e 132.

Para os demais discos, de 03 a 20, de 33 a 65, de 67 a 100 e de 113 a 130, foi realizada

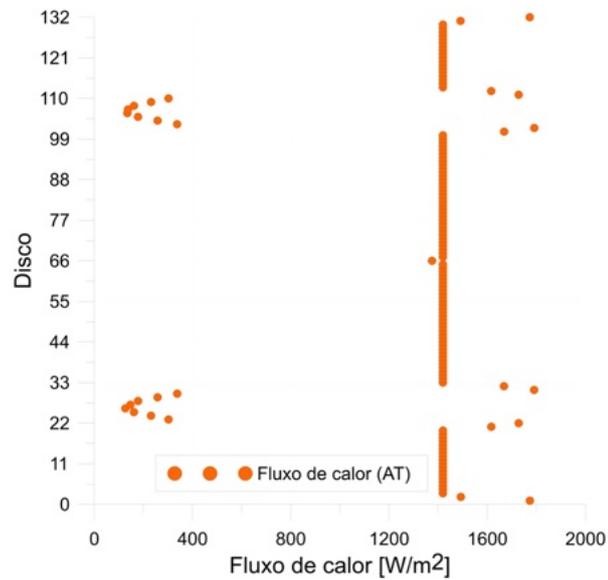
uma média das perdas, resultando em um fluxo de calor médio, considerando a variação de perda pouco significativa, conforme os valores apresentados no Gráfico 3, que demonstra quão pequeno é o fluxo de calor nos discos com tap em comparação aos demais discos.

Gráfico 2 – Distribuição de perdas nos discos da bobina BT



Fonte: Autor.

Gráfico 3 – Distribuição não uniforme do fluxo de calor nos discos da bobina AT



Fonte: Autor.

6 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

A geometria foi importada para o software StarCCM+ no formato STEP 203. A superfície da malha foi gerada utilizando a função *Surface Remesher*, a qual retriangula a superfície enquanto preserva os limites de triangulação original da malha importada. Para a geração do volume da malha, empregou-se a função *Trimmed Cell Mesher*, a qual produz uma malha de volume ao cortar uma malha de modelo hexaédrica com a superfície geométrica. Esse tipo de volume possui a capacidade de refinar a malha em regiões que exigem maior precisão. Adicionalmente, utilizou-se a função *Prism Layer Mesher* para adicionar camadas prismáticas próximas aos limites da parede, visando aprimorar a precisão do fluxo de calor nos discos (SIEMENS, 2024).

No entanto, para o método de volumes finitos, conforme discutido por Patankar (2018) e Maliska (2023), o domínio de cálculo é discretizado em um número finito de volumes de controle elementares. Essa discretização transforma as equações diferenciais governantes do fenômeno em um sistema linear de equações algébricas, o qual é resolvido de forma iterativa. Isso ocorre devido à substituição de diferenças infinitesimais por diferenças finitas nas equações diferenciais. Os valores calculados das variáveis são atribuídos aos centroides de cada volume. Portanto, a solução também é discreta e depende do número de volumes elementares presentes no domínio de cálculo. Assim, é necessário minimizar a influência da discretização nos resultados. Para isso, foram ajustados parâmetros de refinamento, como a quantidade de camadas prismáticas e o tamanho base das células.

Os parâmetros indicativos de que a malha refinada é independente do número de células para a precisão dos resultados foram a temperatura média nos discos 131, 66 e 02 da bobina AT, nos quais foram alocadas fibras ópticas para coleta de dados experimentais, assim como as vazões mássicas nas bobinas, nas quais os resultados da simulação se mantiveram estabilizados. Isso sugere que o refinamento adicional da malha não influenciou significativamente os resultados, conforme descrito na Tabela 3, que demonstra que o refinamento mínimo possível, devido às características geométricas (principalmente o espaçamento entre discos ser por volta de 3 a 4 mm), resultou em um número significativo de células. Nesse sentido, os resultados obtidos com a malha mais fina mostraram-se semelhantes aos da malha mais grossa. Embora haja uma diferença significativa no tempo de simulação entre as duas malhas, essa diferença não é relevante para os objetivos do presente trabalho. Diante disso, optou-se por utilizar a malha mais fina, pois ela oferece maior resolução e precisão sem comprometer a viabilidade do estudo.

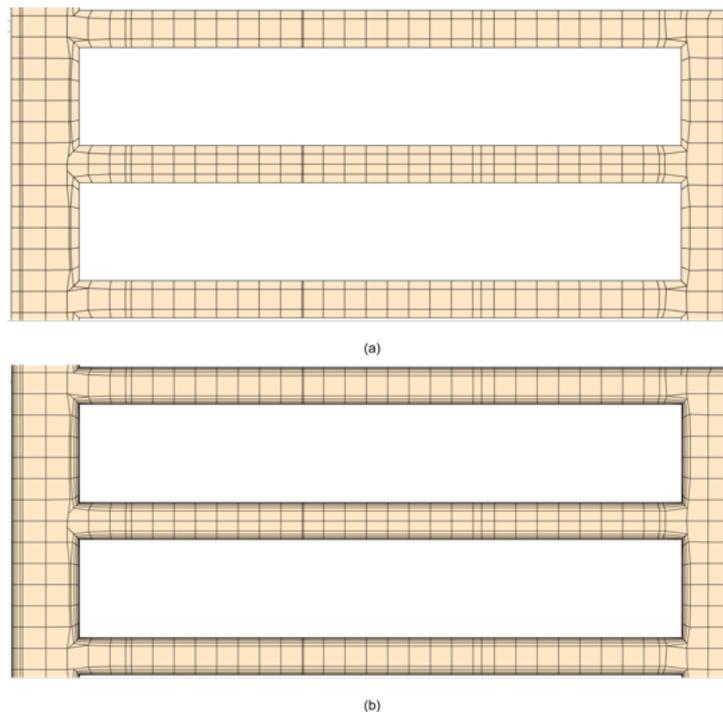
Ao analisar um corte transversal da estrutura da malha, conforme mostrado na Figura 18, é possível observar um refinamento mais acentuado nas proximidades das paredes, especialmente na região em que o óleo entra em contato com a área geradora de calor (parte ativa), onde a taxa de transferência de calor é mais significativa. Na região central, a malha é mais simplificada, devido à ausência de fenômenos que demandem maior detalhamento. Este refina-

Tabela 3 – Verificação dos resultados

Quantidade de célula	Temperatura média (K) AT			Distribuição de vazão		
	Disco 131	Disco 66	Disco 02	AT	BT1.1	BT1.2
21162385	342,08	336,84	332,63	42,45%	32,85%	24,70%
31515458	341,69	336,32	332,48	42,45%	32,85%	24,70%
62484275	342,05	336,67	332,69	42,42%	32,82%	24,76%

mento diferencial é essencial para equilibrar a precisão e o custo computacional da simulação. A Figura 18 (a) apresenta a malha inicial aplicada, composta por 21.162.385 células, referentes aos discos 130 e 129. Já a Figura 18 (b) ilustra a malha final, contendo 62.484.275 células. Estes números significativos de células desde a malha inicial até a final reflete a complexibilidade para capturar com precisão os fenômenos físicos envolvidos, especialmente nas regiões de alta complexidade geométrica e térmica.

Figura 18 – Representação bidimensional da malha (2D): (a) Malha inicial; (b) Malha final

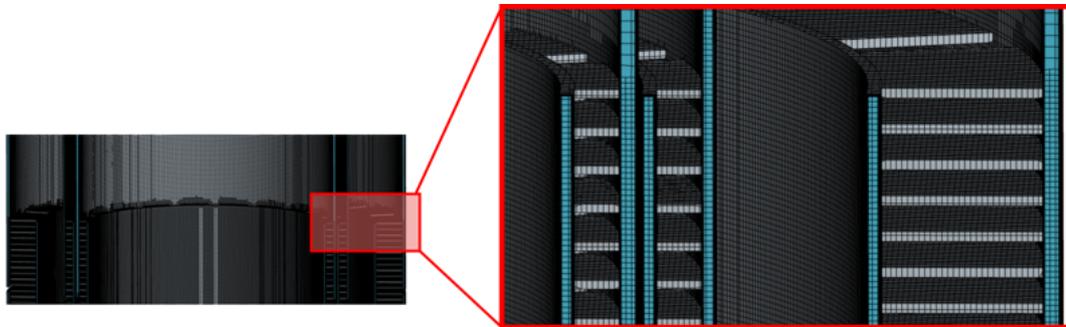


Fonte: Autor.

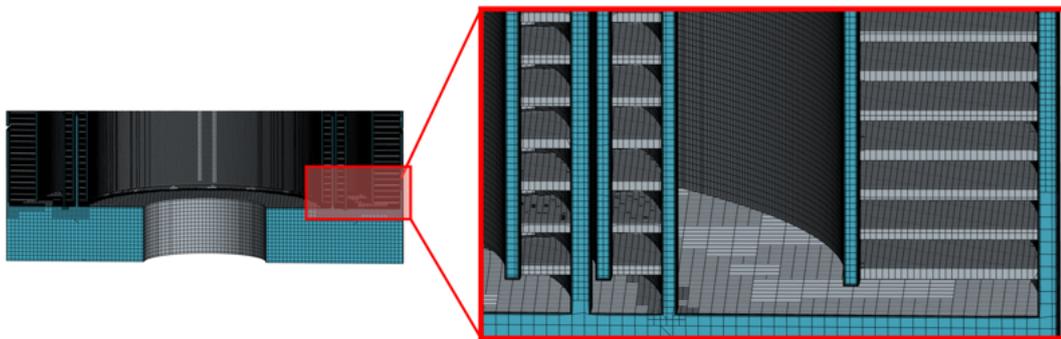
Em uma perspectiva tridimensional, a malha final empregada nas simulações é apresentada na Figura 19, com a região superior do domínio ilustrada na parte (a) e a região inferior na parte (b). Esta figura ressalta o nível de detalhamento alcançado por meio das ferramentas do software StarCCM+ 2310, destacando, em particular, as camadas adjacentes às superfícies e os volumes hexaédricos. A utilização de volumes hexaédricos, juntamente com a aplicação de camadas refinadas próximas às superfícies, permite a captura com maior precisão dos gradientes

térmicos e de velocidade nas regiões de interesse.

Figura 19 – Representação tridimensional da malha (3D): (a) Região superior do domínio; (b) Região inferior do domínio



(a)



(b)

Fonte: Autor.

A validação deste modelo consiste na comparação dos resultados obtidos na simulação CFD, utilizando tanto a distribuição uniforme quanto a não uniforme das perdas, com os dados calculados pelo modelo analítico proposto por Medeiros (2023) e resultados experimentais, utilizando óleo vegetal. Em um primeira análise, foram comparados os dados de temperatura entre discos da bobina AT, mais especificamente entre os discos 130 e 131, 65 e 66, e 01 e 02, utilizando uma distribuição uniforme e não uniforme das perdas, conforme descrito na Tabela 4.

A análise dos resultados revela uma proximidade significativa entre os resultados da simulação CFD e os dados analíticos na temperatura entre discos do modelo analítico termo-hidráulico de Medeiros (2023). Essa comparação mostrou uma boa concordância nos resultados, principalmente no disco 131 que teve um diferença relativa abaixo de 1%.

Entretanto, observam-se algumas discrepâncias nos discos 66 e 2, onde as diferenças relativas atingiram até 10,21%. Essas discrepâncias podem ser atribuídas a vários fatores, incluindo a simplificação dos modelos geométricos e físicos, e as condições de contorno aplicadas na simulação. Além disso, variações nas propriedades térmicas do óleo e do papel isolante não completamente modeladas podem influenciar os resultados.

Tabela 4 – Temperaturas médias entre discos para a AT

Disco	Modelo analítico (°C)	CFD uniforme (°C)	CFD não uniforme (°C)	Diferença relativa (%)	
				Não uniforme	Uniforme
131	68,1	68,37	68,43	-0,48	-0,39
66	61	63,25	63,37	-3,88	-3,69
2	55,3	59,48	60,95	-10,21	-7,6

Adicionalmente, em uma segunda análise, foram comparados os resultados da simulação CFD com os dados calculados pelo modelo analítico proposto por Medeiros (2023) e com os ensaios realizados em fábrica para as três fases. Foram analisados os dados de temperatura nos discos das bobinas AT e BT1.2, tanto os medidos nos testes (discos 131, 66 e 02 para a bobina AT, e discos 123 e 02 para a bobina BT1.2), quanto os calculados pelo método analítico e pelo modelo de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) desenvolvido neste estudo, utilizando somente a distribuição não uniforme das perdas.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5 e 6, onde se observa que os resultados do modelo analítico e do CFD são consistentes, uma vez que ambos consideram as três colunas do transformador idênticas. Já os resultados experimentais apresentam variações de temperatura em cada fase, principalmente devido às incertezas associadas, especialmente a vazão mássica em cada coluna, que não foi considerada nos modelos. Nesse sentido, no modelo CFD, a temperatura média do óleo na superfície dos discos foi utilizada para fins de comparação, considerando que as medições foram realizadas nos espaçadores, ou seja, na região de papel, conforme indicado por Medeiros (2023), e não necessariamente nos pontos de óleo mais quentes das bobinas.

Em uma comparação mais detalhada da temperatura média do óleo na superfície do disco, proposta neste trabalho, com a temperatura experimental e do modelo analítico de Medeiros (2023), observam-se erros mais significativos. Isso ocorre porque a medição experimental é feita por fibra óptica no espaçador, uma região de papel, enquanto a simulação considera apenas o fluido de trabalho, ou seja, o óleo. Dessa forma, não é possível determinar com precisão a temperatura do espaçador na simulação.

Contudo, no estudo de Medeiros (2023), foi relatado que a temperatura do papel tende a ser mais alta que a do óleo. Estudos como o de Torriano, Picher e Chaaban (2012) indicaram que pode existir um gradiente de temperatura entre o espaçador e o óleo de até 8°C. Esses resultados corroboram a validade dos dados obtidos na simulação, que estão muito próximos dos resultados experimentais.

A precisão dos resultados do modelo CFD em relação aos dados de referência foi avaliada através das diferenças relativas. As menores diferenças observadas no disco 131 indicam uma alta precisão do modelo nas regiões de maior interesse térmico. Contudo, as maiores di-

Tabela 5 – Temperaturas experimentais, calculadas e estimadas para a AT

Disco	Experimental (°C)	Modelo analítico (°C)	CFD (°C)	Diferença relativa (%)	
				Experimental	Analítico
Fase A					
131	75,9	77,61	68,45	9,81	11,80
66	72,9	68,87	63,27	13,20	8,12
2	75,5	64,82	60,35	20,07	6,90
Fase B					
131	82,4	77,61	68,45	16,93	11,80
66	74,5	68,87	63,27	15,07	8,12
2	75,2	64,82	60,35	19,75	6,90
Fase C					
131	76,9	77,61	68,45	10,98	11,80
66	70,5	68,87	63,27	10,25	8,12
2	72,2	64,82	60,35	16,41	6,90

Tabela 6 – Temperaturas medidas, calculadas e estimadas para a BT1.2

Disco	Experimental (°C)	Modelo analítico (°C)	CFD (°C)	Diferença relativa (%)	
				Experimental	Analítico
Fase A					
123	71,3	63,53	64,07	10,14	-0,85
2	-	57,59	57,61	-	-0,55
Fase B					
123	67,5	63,53	64,07	5,08	-0,85
2	59,4	57,29	57,61	3,02	-0,55
Fase C					
123	72,9	63,53	64,07	12,11	-0,85
2	-	57,59	57,61	-	-0,55

ferências em discos como o 66 e o 2 sugerem que há áreas onde o modelo pode ser melhorado. Esses resultados são consistentes com a literatura, onde gradientes térmicos elevados e a complexidade da geometria dos enrolamentos podem levar a maiores incertezas.

Apesar das discrepâncias observadas, a confiabilidade do modelo para prever o comportamento real do sistema é sustentada pela proximidade geral dos resultados CFD com os dados experimentais e analíticos. A validação cruzada com diferentes conjuntos de dados aumenta a confiança nos resultados do modelo CFD, que se mostrou capaz de capturar os principais fenômenos térmicos e de escoamento presentes no transformador.

Com base nos critérios estabelecidos e nos resultados obtidos, conclui-se que o modelo foi validado. A análise comparativa mostrou que, embora existam algumas discrepâncias, o modelo CFD oferece uma boa aproximação dos dados experimentais e analíticos, especialmente nas regiões críticas para a transferência de calor. Portanto, o modelo pode ser considerado confiável para a simulação e estudo do comportamento térmico e de escoamento do óleo em transformadores trifásicos.

Adicionalmente, a simulação em 3D proposta permite uma análise detalhada do campo de temperatura em toda a coluna do transformador, possibilitando a identificação de fatores construtivos que afetam o aquecimento do óleo, bem como a influência do tipo e vazão do óleo na transferência de calor da parte ativa do transformador.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia, acompanhados das discussões pertinentes.

Na primeira seção, foi feita uma comparação entre a utilização do óleo mineral (OM) e do óleo vegetal (OV) nas condições iniciais propostas. Primeiramente, foram realizadas análises isoladas nos discos onde foram alocadas as fibras ópticas do transformador, mostrando as diferenças de temperatura que o óleo apresenta ao longo dos discos. Em seguida, comparando lado a lado os óleos vegetal e mineral, foram feitas análises nas bobinas de alta tensão (AT), com distribuição uniforme e não uniforme das perdas, analisando a localização do disco de hotspot. Por fim, foi realizada uma análise das bobinas de baixa tensão (BT), com discussões dos resultados à luz da bibliografia, destacando as qualidades térmicas e hidráulicas do óleo vegetal e as dificuldades encontradas quando se substitui o OM pelo OV.

Na segunda seção, foi realizada uma análise da distribuição das perdas nas bobinas, com distribuição uniforme e não uniforme, mostrando as principais diferenças no perfil térmico em todo o domínio computacional, utilizando tanto óleo vegetal quanto óleo mineral. Foram feitas comparações isoladas nos discos 131 da bobina AT e 123 das bobinas BT, evidenciando os pontos de aquecimento dos discos.

Na terceira seção, foi analisada a influência da vazão mássica de entrada nas bobinas, realizando análises do perfil de temperatura do óleo ao longo da coluna do transformador. Foram avaliados o impacto na magnitude da temperatura máxima dos discos, a posição do disco de temperatura máxima e o perfil de temperatura do disco de temperatura máxima. Além disso, foram realizadas análises da distribuição de óleo para cada bobina com a alteração da vazão de entrada e seu efeito na temperatura média de saída.

Na última seção de resultados, foi realizada uma análise detalhada do comportamento do óleo e suas limitações. Inicialmente, foram examinados os aspectos construtivos que influenciam o escoamento do óleo, incluindo o tamanho dos canais, a presença de desvios de óleo e os espaçadores. Foi investigado como essas características construtivas podem impactar o perfil de temperatura dos discos, especialmente em relação ao disco onde ocorre o hotspot.

7.1 COMPARAÇÃO ENTRES O ÓLEO MINERAL E VEGETAL

Nesta seção, são apresentados os resultados comparativos entre o óleo mineral (OM) e o óleo vegetal (OV) em termos de desempenho térmico dentro do transformador. A análise abrange os discos 131, 66 e 02 da bobina de alta tensão (AT), bem como os discos 123 e 02 das bobinas de baixa tensão (BTs), onde foram instaladas as fibras ópticas para monitoramento. Os resultados das temperaturas obtidas sob a condição de distribuição uniforme das perdas es-

tão apresentados na Tabela 7, enquanto a Tabela 8 mostra os resultados para a condição de distribuição não uniforme das perdas. A análise dos dados revela que, em geral, as temperaturas registradas do óleo na superfície dos discos são semelhantes para ambos os tipos de óleo, evidenciando uma proximidade nos valores térmicos entre o OM e o OV.

Uma análise detalhada das tabelas revela que, apesar das semelhanças nas temperaturas médias e mínimas entre os óleos mineral e vegetal, as temperaturas máximas exibem variações mais significativas. Por exemplo, na Tabela 7, o disco 131 da bobina AT apresenta uma temperatura máxima ligeiramente superior com óleo vegetal (78,85 °C) em comparação com o óleo mineral (77,92 °C). Essas variações, embora pequenas, podem ter implicações importantes para a longevidade e desempenho dos transformadores, uma vez que temperaturas mais elevadas podem acelerar o envelhecimento do isolamento e outros componentes internos.

Constata-se que as temperaturas máximas registradas com óleo mineral são próximas das obtidas com óleo vegetal nos discos analisados. No entanto, ao considerar a temperatura do *hotspot*, observa-se uma diferença: para a distribuição uniforme das perdas, a temperatura máxima com óleo vegetal ocorre no disco 129, enquanto para o óleo mineral, o *hotspot* localiza-se no disco 111. Isso evidencia que a temperatura máxima na coluna é maior quando se utiliza óleo mineral em comparação com o óleo vegetal, sob as mesmas condições iniciais.

Tabela 7 – Temperaturas com distribuição uniforme com óleo mineral e vegetal

Disco	Temperatura (°C) Óleo Mineral			Temperatura (°C) Óleo Vegetal		
	Mín	Média	Máx	Min	Média	Máx
AT						
131	62,99	68,02	77,92	62,99	68,49	78,85
66	58,40	62,76	71,74	58,78	63,34	71,59
2	53,85	61,25	68,72	53,83	59,48	65,59
BT1.1						
123	58,05	61,99	70,08	58,54	63,12	71,43
2	53,95	58,90	66,13	53,93	57,92	62,92
BT1.2						
123	59,34	63,42	71,33	60,19	64,07	73,28
2	53,90	58,31	65,47	53,83	57,61	62,40

Ademais, a Tabela 8 demonstra que a distribuição não uniforme das perdas tende a aumentar as temperaturas máximas em ambos os tipos de óleo, mas especialmente no óleo mineral. O disco 131 na bobina AT, por exemplo, atinge 79,17 °C com óleo mineral em comparação com 78,27 °C com óleo vegetal. Esta observação sugere que o óleo vegetal pode ser mais eficaz na mitigação de picos de temperatura em condições de distribuição de perdas não uniforme,

possivelmente devido ao seu maior calor específico.

Adicionalmente, estudos anteriores conduzidos por Medeiros (2023), que empregaram simulações analíticas no mesmo transformador, demonstraram que o *hotspot* no papel isolante ocorre no disco 111 quando aplicada uma distribuição não uniforme das perdas de disco a disco. A metodologia empregada no presente estudo, que considerou fluxos de calor localizados em discos que se afastavam da média total e uma média separada para os discos próximos à média total (Gráfico 3), também resultou na identificação do *hotspot* no disco 111 tanto para o óleo mineral (OM) quanto para o óleo vegetal (OV) em condições de distribuição não uniforme das perdas. Essa correspondência metodológica reforça a validade dos resultados obtidos e sublinha a importância da metodologia adotada na identificação precisa da localização do *hotspot*. Este comportamento é corroborado pelo estudo de Yu et al. (2023), que também evidenciou a variação da posição do *hotspot* em função da distribuição das perdas, indicando que a distribuição não uniforme das perdas tende a aumentar a temperatura máxima da coluna.

Além disso, este estudo, apesar de focar apenas no comportamento térmico do óleo dentro da coluna do transformador, contribui significativamente para o design e instrumentação de transformadores de potência. A identificação precisa da posição do *hotspot* é crucial para a correta colocação de sensores de fibra óptica, melhorando a monitorização térmica e a eficiência operacional do transformador. A metodologia empregada pode servir como base para futuras pesquisas e aplicações práticas, visando otimizar o desempenho térmico e prolongar a vida útil dos transformadores.

Nesse contexto, as implicações práticas dessas observações são significativas para a escolha do óleo isolante em transformadores. A utilização de óleo vegetal pode não apenas proporcionar um melhor controle das temperaturas máximas em cenários de distribuição de perdas não uniforme, mas também contribuir para a sustentabilidade ambiental, dado que o óleo vegetal é biodegradável e menos poluente em comparação ao óleo mineral. Portanto, a decisão de utilizar óleo vegetal pode resultar em um desempenho mais estável e sustentável dos transformadores, especialmente em ambientes operacionais desafiadores.

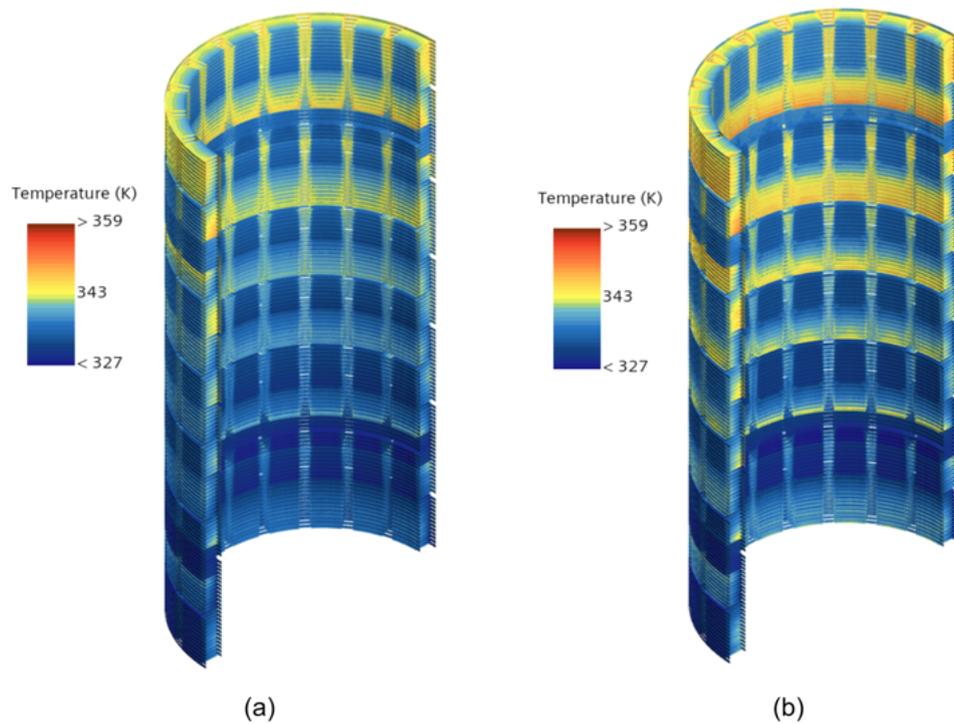
Um estudo mais detalhado da bobina de alta tensão (AT) revela diferenças significativas na distribuição de temperatura entre óleo mineral e óleo vegetal. A Figura 20 compara a temperatura da bobina AT com distribuição não uniforme, sendo a Figura 20 (a) para óleo vegetal e a Figura 20 (b) para óleo mineral, com escalas fixas de 359K de máxima e 327K de mínima. Da mesma forma, a distribuição uniforme das perdas é analisada, com a Figura 21 (a) utilizando óleo vegetal e a Figura 21 (b) utilizando óleo mineral.

Nota-se que o óleo mineral apresenta um gradiente de temperatura superior ao do óleo vegetal, tanto com distribuição uniforme quanto com distribuição não uniforme das perdas. Além disso, os desvios de óleo são agravantes para o aumento de temperatura, independentemente do tipo de óleo utilizado. Na distribuição uniforme das perdas, o óleo ao passar pelos desvios fica mais tempo com temperatura elevada, enquanto na distribuição não uniforme são criadas regiões de temperatura mais elevadas, mas por menos tempo.

Tabela 8 – Temperaturas com distribuição não uniforme com óleo mineral e vegetal

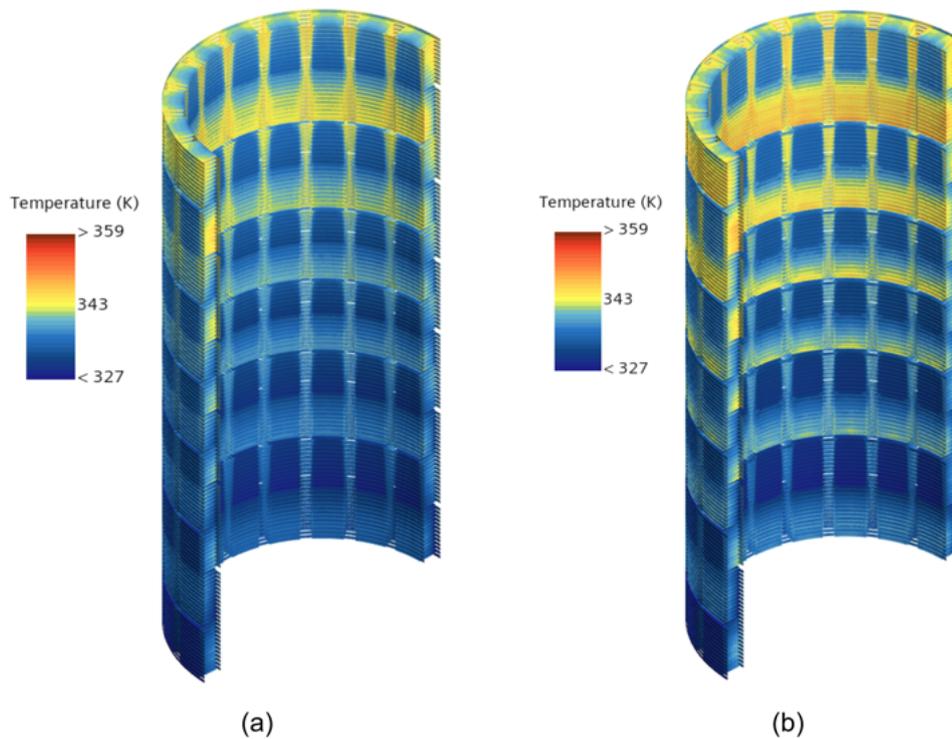
Disco	Temperatura (°C) Óleo Mineral			Temperatura (°C) Óleo Vegetal		
	Mín	Média	Máx	Min	Média	Máx
AT						
131	62,91	68,36	79,17	62,67	68,45	78,27
66	58,29	62,83	71,71	58,65	63,27	71,51
2	53,93	62,83	70,38	53,91	60,35	67,38
BT1.1						
123	58,04	61,99	70,07	58,54	63,11	71,42
2	53,95	58,91	66,13	53,92	57,92	62,91
BT1.2						
123	59,34	63,41	71,32	60,18	64,07	73,28
2	53,90	58,31	65,47	53,83	57,60	62,40

Figura 20 – Comparação da temperatura da bobina AT com distribuição não uniforme: óleo vegetal (a) e óleo mineral (b)



Fonte: Autor.

Figura 21 – Comparação da temperatura da bobina AT com distribuição uniforme: óleo vegetal (a) e óleo mineral (b)



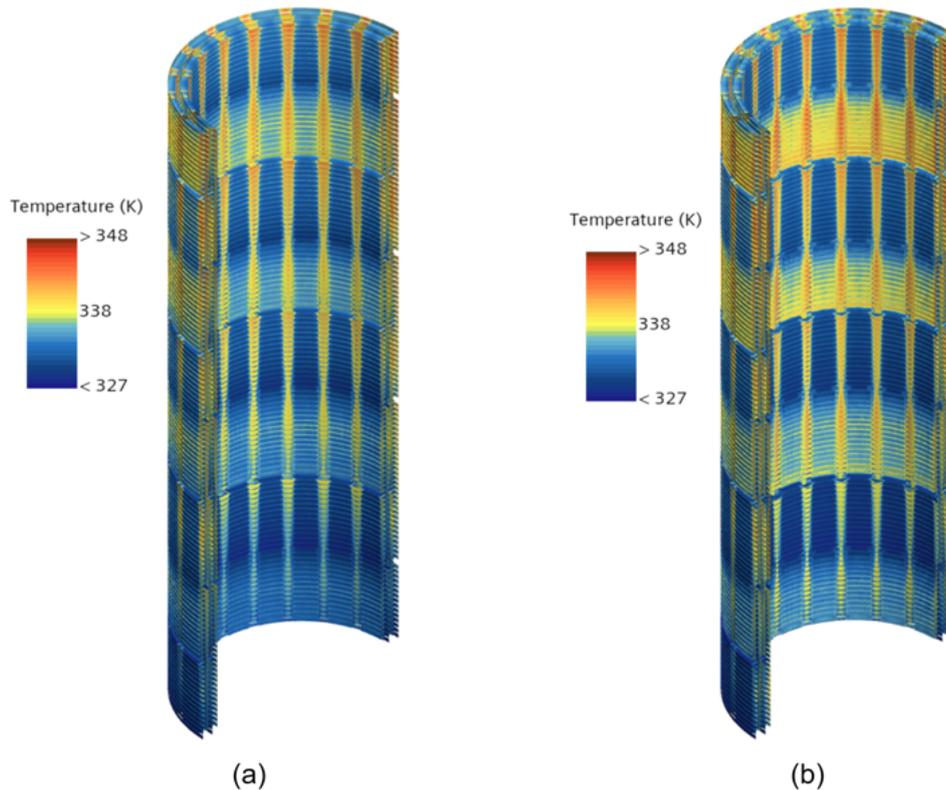
Fonte: Autor.

Em um estudo mais detalhado nas bobinas de baixa tensão (BT) com a distribuição uniforme das perdas, foi possível observar uma temperatura do óleo inferior em comparação com o óleo que percorre a bobina de AT. Entretanto, na Figura 22, com escalas fixas de 348 K de máxima e 327 K de mínima, observou-se um aquecimento similar nas regiões com desvios de óleo. Contudo, nota-se uma maior aquecimento na região onde está os espaçadores do óleo mineral (Figura 22 (b)) em comparação com o óleo vegetal (Figura 22 (a)). Também, o óleo mineral teve regiões mais quentes em comparação com o óleo vegetal ao longo da bobina.

Os resultados indicam vantagens térmicas do óleo vegetal sobre o óleo mineral, evidenciadas por menores aumentos de temperatura. Todavia, a metodologia manteve constantes as condições iniciais, impondo a vazão mássica e a temperatura inicial. Considerando que o calor específico do óleo mineral é inferior ao do óleo vegetal (Tabela 2) e que a geometria do sistema é constante, o gradiente de temperatura tende a ser maior para o óleo mineral, em visto do calor específico ser a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura (CENGEL, 2003).

Na prática, a substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal no mesmo transformador pode produzir resultados diferentes. Estudos de Liang et al. (2024) e Araujo, Martins e Silva (2006) indicam que o uso de óleo vegetal pode elevar a temperatura do transformador. Especificamente, Rafiq et al. (2015) observa que essa elevação pode chegar a até 3 °C. Isso é atribuído à maior viscosidade do óleo vegetal em comparação com o óleo mineral, que altera a vazão mássica com uma mesma bomba. A maior viscosidade impede que o fluido circule eficiente-

Figura 22 – Comparação da temperatura das bobinas BTs: óleo vegetal (a) e óleo mineral (b)



Fonte: Autor.

mente pelos canais de circulação do óleo dos enrolamentos, resultando em sobreaquecimento e possível decomposição das ligações moleculares.

Portanto, uma solução é considerar a utilização de canais de refrigeração mais largos em transformadores projetados para óleo vegetal (SIMONE et al., 2017; CENGEL, 2003). Isso torna-se evidente ao analisar as perdas de carga na bobina AT, que são de 25711,70 Pa para o óleo vegetal (OV) e 23709,48 Pa para o óleo mineral (OM), demonstrando que o OV apresenta uma perda hidráulica superior de quase 8%. Esse fator deve ser considerado na substituição do fluido isolante do transformador, sendo necessário ajustar a vazão da bomba.

Além disso, a substituição do fluido isolante exige outros cuidados, como na drenagem, pois resíduos de óleo mineral podem degradar as propriedades térmicas do óleo vegetal, como o ponto de combustão e o ponto de fulgor (ARAUJO; MARTINS; SILVA, 2006). Entretanto, estudos como o de Yang et al. (2011) sugerem que o óleo vegetal pode prolongar a vida útil do transformador, devido à degradação mais lenta do papel isolante. Além disso, pesquisas de Marulanda et al. (2008) indicam que, sob condições de sobrecarga, o óleo vegetal é mais adequado, pois testes de envelhecimento mostram que 14 horas de sobrecarga representam um ano de vida útil para transformadores com óleo mineral, enquanto para aqueles com óleo vegetal, 20 horas equivalem a um ano de vida útil.

Portanto, apesar de alguns estudos sugerirem que o aumento da temperatura do óleo vegetal pode reduzir a vida útil do transformador, a menor taxa de degradação do papel isolante

com óleo vegetal pode resultar em uma durabilidade igual ou superior em comparação aos transformadores com óleo mineral. Isso sugere a possibilidade de sobrecarregar transformadores que utilizam óleo vegetal sem comprometer significativamente sua durabilidade (FERNANDO-NAVAS; ECHEVERRY-IBARRA; CADAVID-RAMÍREZ, 2012).

Comparando os resultados obtidos com diferentes tipos de óleo, nota-se que as propriedades térmicas do óleo utilizado têm um impacto substancial no campo de temperatura e na temperatura de *hotspot*. Isso sugere que a escolha do fluido isolante deve ser cuidadosamente considerada durante o processo de design do transformador, levando em conta as características térmicas específicas de cada óleo e da bomba utilizada.

7.2 ANÁLISE DAS PERDAS: DISTRIBUIÇÃO UNIFORME VS DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME

O conhecimento da geração de calor nos enrolamentos é essencial para a modelagem térmica. Entretanto, a análise das perdas nos enrolamentos do transformador nem sempre é viável. O calor gerado nos enrolamentos advém principalmente de dois fenômenos: perdas por efeito Joule (ou perdas resistivas) e perdas por correntes parasitas (ou perdas de correntes de Foucault). As perdas por efeito Joule ocorrem quando a corrente de carga atravessa os enrolamentos, sendo geradas devido à resistência do fio de cobre, o que facilita sua determinação. Em contraste, a determinação das perdas parasitas é mais complexa, pois essas perdas, embora geralmente concentradas e responsáveis por regiões de temperaturas mais elevadas, variam ao longo dos discos devido às correntes induzidas nos condutores e materiais ferromagnéticos do transformador pela variação do campo magnético. Para tal avaliação, empregam-se métodos de elementos finitos (FEM), que podem demandar um tempo significativo, ou métodos analíticos para uma análise mais rápida, mas com precisão suficiente para auxiliar o projetista na tomada de decisões informadas (RIES, 2007; KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Dada a complexidade na determinação das perdas disco a disco, muitos estudos optam por utilizar uma distribuição uniforme das perdas (YU et al., 2023; RODRIGUES et al., 2023). Nesse sentido, esta seção visa analisar a influência da distribuição das perdas nos discos sobre o campo de temperatura da coluna do transformador, considerando as variações específicas de cada disco.

7.2.1 Simulação com óleo vegetal

As simulações realizadas utilizando óleo vegetal permitiram uma análise detalhada do campo de temperatura nos enrolamentos em uma coluna de transformador. A Figura 23 ilustra a distribuição de temperatura do óleo vegetal em duas situações distintas: a Figura 23 (a)

apresenta a distribuição uniforme das perdas, enquanto a Figura 23 (b) exhibe a distribuição não uniforme das perdas. Estas figuras foram geradas utilizando a função *isosurface* do software STAR-CCM+, que constrói superfícies tridimensionais representando pontos no domínio onde a temperatura atinge um valor específico, facilitando a visualização e análise da distribuição térmica (SIEMENS, 2024).

Em ambas as condições, utilizando o autorange de temperatura para uma melhor visualização, observa-se que, no caso do óleo mineral, a temperatura de saída do óleo é superior à de entrada, devido à transferência de calor das perdas nos discos para o óleo. Adicionalmente, na região de saída, verifica-se um aumento de temperatura nas áreas onde os espaçadores estão presentes, formando diversas "linhas" de escoamento com temperaturas mais elevadas. É também notável que os desvios de óleo auxiliam no escoamento radial; contudo, acima da guia de óleo, há uma área com temperatura mais elevada, enquanto abaixo da guia, observam-se regiões com temperaturas mais baixas.

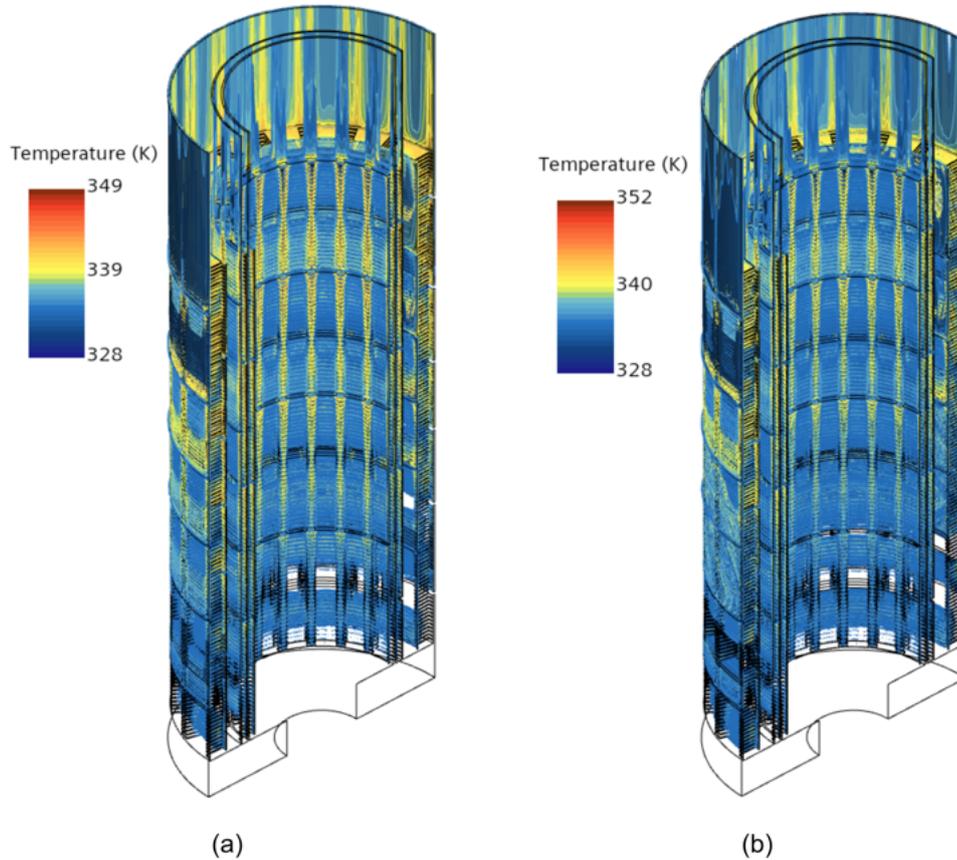
Na condição de distribuição uniforme das perdas, a temperatura do óleo é geralmente mais elevada, uma vez que a média do fluxo de calor nas superfícies é constante em todos os discos, resultando em um aumento contínuo da temperatura do óleo. Em contraste, na condição de distribuição não uniforme das perdas, observa-se uma redução da temperatura média, uma vez que as perdas nos discos com taps são significativamente menores que a média da distribuição uniforme. Contudo, a distribuição não uniforme das perdas resulta na formação de regiões pontuais com temperaturas mais elevadas.

A distribuição das perdas térmicas exerce um impacto significativo no perfil de temperatura ao longo de toda a coluna do transformador. Observa-se que a distribuição não homogênea das perdas tende a gerar regiões localizadas de temperaturas mais elevadas e pontos de aquecimento máximo ou *hotspots* mais significativos. Estudos, como os de Paramane et al. (2016), corroboram esta observação, demonstrando que a distribuição não uniforme das perdas favorece a formação de pontos quentes locais.

Na análise dos discos 131 da bobina de alta tensão (AT) e dos discos 123 das duas bobinas de baixa tensão (BT), nos quais foram alocadas fibras ópticas para coleta de dados experimentais, observou-se o campo de temperatura do óleo vegetal tanto com a distribuição uniforme das perdas (Figura 24 (a)) quanto com a distribuição não uniforme das perdas (Figura 24 (b)). Constatou-se que, em ambas as distribuições, a temperatura do disco da bobina AT é significativamente superior à dos discos das bobinas BT, embora o comportamento do óleo na presença dos espaçadores seja similar. Em todos os discos, há um aumento de temperatura no contorno dos espaçadores, evidenciando os espaços vazios ocupados por estes. Esse fenômeno ocorre porque os espaçadores dificultam o escoamento do óleo, criando pontos de calor que contribuem para a formação de linhas de temperatura mais elevada na região de saída.

Ao analisar exclusivamente o disco 131 da AT e os discos 123 das duas BTs, não se observou uma diferença significativa no campo de temperatura ao comparar as distribuições uniforme e não uniforme das perdas. Contudo, com a distribuição uniforme das perdas, os dis-

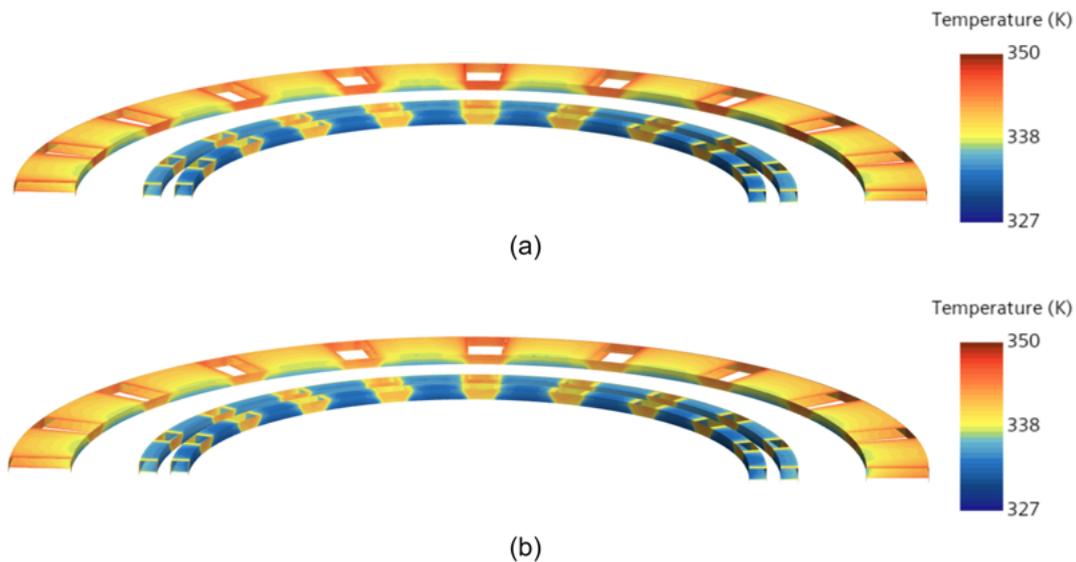
Figura 23 – Campo de temperatura do óleo vegetal: distribuição uniforme de perdas (a) e distribuição não uniforme (b)



Fonte: Autor.

cos apresentam um aumento contínuo na temperatura do óleo ao longo da coluna. Em contraste, com a distribuição não uniforme das perdas, os discos exibem maior variação de temperatura, uma vez que o óleo chega mais frio aos discos de maior fluxo de calor. Mesmo que, na distribuição não uniforme, o disco 131 da bobina AT apresente um fluxo de calor superior à média da distribuição uniforme, a variação de temperatura é mais pronunciada, aproximando as temperaturas desses discos.

Figura 24 – Campo de temperatura do disco 131 da bobina AT e do disco 123 das BTs: distribuição uniforme (a) e distribuição não uniforme (b)



Fonte: Autor.

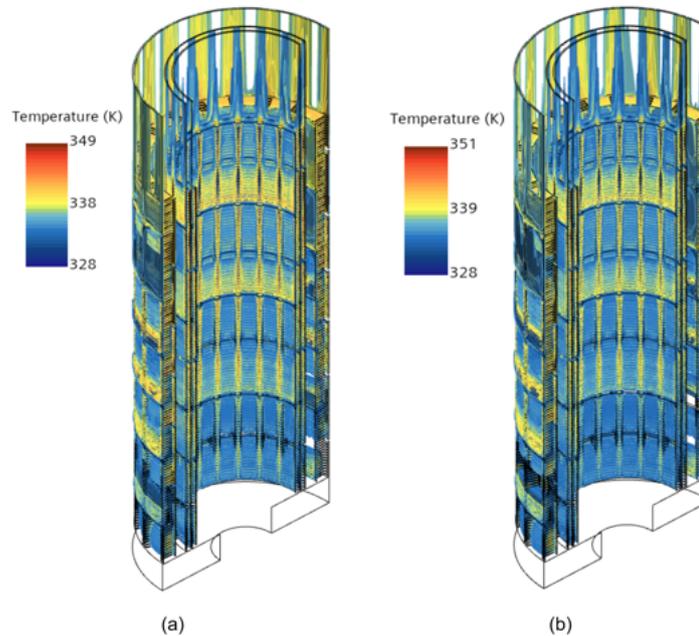
7.2.2 Simulação com óleo mineral

Analogamente às simulações realizadas com óleo vegetal, foi conduzida uma análise do campo de temperatura em uma coluna de transformador utilizando óleo mineral. Também foi utilizada a função *isosurface* do software STAR-CCM+ para gerar as superfícies isotérmicas exibidas nas Figuras 25 (a), que apresenta a distribuição uniforme das perdas, e 25 (b), que ilustra a distribuição não uniforme das perdas. Essas figuras foram geradas com escalas independentes e mantidas em autorange para uma avaliação precisa do comportamento térmico do óleo mineral. A vazão mássica de entrada foi mantida em 3,829kg/s a uma temperatura de 53,3°C para fins de comparação. Observa-se que, semelhante ao óleo vegetal, a temperatura de saída do óleo mineral é maior do que a temperatura de entrada em ambos os casos, indicando a transferência de calor das superfícies dos discos para o óleo. Além disso, nota-se um aumento de temperatura nas áreas onde estão presentes os espaçadores em ambos os casos, criando várias "linhas" de escoamento com temperaturas mais elevadas, similar ao observado com o uso do óleo vegetal. Essa similaridade é atribuída à utilização da mesma geometria de referência, na qual o escoamento do óleo tende a se comportar de maneira semelhante.

Em contraste, a temperatura do óleo mineral aumentou o gradiente de temperatura em várias regiões quando comparada ao óleo vegetal. Este fenômeno é corroborado pela análise das características do óleo na Tabela 2, onde se observa que o calor específico do óleo mineral tende a ser inferior ao do óleo vegetal. Além disso, com a distribuição não uniforme das perdas no óleo mineral, a temperatura diminuiu em grande parte do domínio. No entanto, similarmente ao observado com o óleo vegetal, foram criadas regiões de temperatura ainda mais elevada.

Ao analisar o disco 131 da bobina de alta tensão (AT) e os discos 123 das bobinas de

Figura 25 – Campo de temperatura do óleo mineral: distribuição uniforme das perdas (a) e distribuição não uniforme das perdas (b)

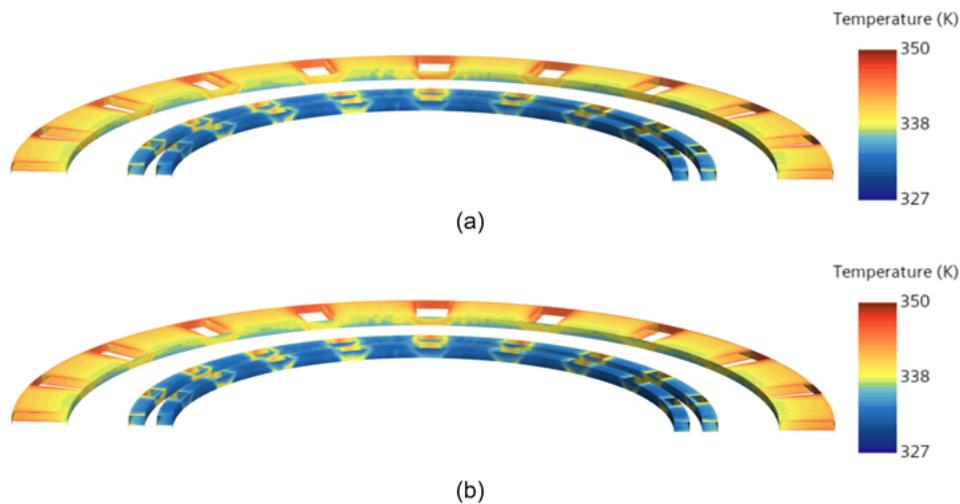


Fonte: Autor.

baixa tensão (BT) com a utilização de óleo mineral e distribuição uniforme de perdas (Figura 26 (a)) e distribuição não uniforme de perdas (Figura 26 (b)), observou-se um aumento de temperatura menos acentuado no contorno da região dos espaçadores em todos os discos, quando comparado ao óleo vegetal, especialmente nas BTs. A temperatura do disco da AT é significativamente superior à dos discos das BTs, similar ao observado com o óleo vegetal.

A metodologia empregada permitiu a análise detalhada do comportamento térmico dos óleos em uma coluna de transformador, e pode ser replicada para qualquer transformador imerso em óleo. Embora comparações com dados experimentais sejam dificultadas neste trabalho pelas medições geralmente realizadas nos espaçadores, conforme descrito por Medeiros (2023). Contudo, foi observado que, tanto com o uso de óleo vegetal quanto mineral, as temperaturas médias dos discos são semelhantes. No entanto, na bobina de alta tensão (AT) e nas bobinas de baixa tensão (BT), o óleo mineral mostrou um aumento significativo de temperatura em todo o transformador. Isso indica que a comparação isolada dos discos não reflete adequadamente o comportamento térmico na coluna do transformador como um todo.

Figura 26 – Campo de temperatura do óleo mineral do disco 131 da bobina AT e do disco 123 das BTs: distribuição uniforme (a) e distribuição não uniforme (b)



Fonte: Autor.

7.3 INFLUÊNCIA DA VAZÃO MÁSSICA NO COMPORTAMENTO TERMO-HIDRÁULICO DO TRANSFORMADOR

Com o objetivo de identificar a influência da vazão na temperatura máxima da coluna do transformador, foram realizadas simulações alterando a vazão de entrada em incrementos de 30%, 20% e 10%, e reduções de 30%, 20% e 10% em comparação com as condições iniciais de 3,829 kg/s a uma temperatura fixa medida de 53,3°C. Propôs-se realizar essas alterações na vazão de entrada com a distribuição não uniforme do óleo vegetal (Tabela 9) e do óleo mineral (Tabela 10).

Os resultados mostraram que a localização do disco onde ocorre a temperatura de *hotspot* permaneceu constante, no disco 111, para ambos os óleos em todas as vazões testadas. No entanto, ao aumentar a vazão de entrada, a temperatura máxima da bobina diminuiu. Embora a distribuição percentual da vazão mássica para cada bobina não seja significativamente alterada com a mudança da vazão de entrada ou do tipo de óleo, há uma tendência de diminuição da vazão de entrada na bobina de alta tensão, podendo ser um agravante para a temperatura máxima da coluna do transformador.

Ademais, a análise revelou que, embora a variação da vazão mássica de entrada para os óleos vegetal e mineral não altere a localização do disco onde ocorre o *hotspot*, ela influencia significativamente a magnitude da temperatura máxima do óleo. O óleo mineral (OM) tende a apresentar temperaturas mais elevadas em comparação ao óleo vegetal (OV) nas condições especificadas na Tabela 2.

Tabela 9 – Influência da vazão mássica no temperatura *hotspot* com óleo vegetal e distribuição não uniforme

Inlet (kg/s)	Temperatura <i>hotspot</i> (°C)		Distribuição de vazão (%)		
	Disco	OV	AT	BT1.1	BT1.2
2,680	111	86,65	43,39	32,22	24,38
3,063	111	84,62	42,95	32,53	24,52
3,446	111	82,94	42,61	32,74	24,65
3,829	111	81,51	42,33	32,89	24,78
4,212	111	80,29	42,10	33,00	24,91
4,595	111	79,23	41,90	33,07	25,03
4,978	111	78,31	41,72	33,12	25,16

Tabela 10 – Influência da vazão no temperatura *hotspot* com óleo mineral e distribuição não uniforme

Inlet (kg/s)	Temperatura <i>hotspot</i> (°C)		Distribuição de vazão (%)		
	Disco	OM	AT	BT1.1	BT1.2
2,680	111	90,18	43,49	30,26	26,25
3,063	111	88,49	42,54	30,81	26,65
3,446	111	87,07	41,84	31,16	27,00
3,829	111	85,96	41,31	31,39	27,30
4,212	111	84,95	40,89	31,54	27,57
4,595	111	84,01	40,56	31,64	27,80
4,978	111	83,20	40,30	31,71	28,00

A vazão mássica exerce um impacto significativo na transferência de calor, onde seu aumento tende a reduzir a temperatura geral da coluna do transformador. Além disso, a modificação da vazão de entrada influencia diretamente a temperatura máxima da coluna, com o óleo mineral mostrando maior sensibilidade a essas variações. No entanto, essa alteração não afeta a localização do disco onde ocorre o *hotspot*; a vazão mássica de entrada determina a magnitude da temperatura máxima, mas não a posição do disco de aquecimento máximo. Nesse contexto, a vazão mássica de entrada é um fator crucial no projeto térmico de transformadores, influenciando tanto a temperatura média quanto a temperatura máxima.

Entretanto, a vazão mássica de entrada apresenta limitações, devido ao atrito do óleo com componentes dielétricos, podendo causar descargas elétricas, conhecidas como eletrificação estática em transformadores. Esse fenômeno torna-se um desafio, pois transformadores de maior potência requerem taxas de escoamento mais elevadas para o controle de temperatura (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Além disso, a distribuição percentual da vazão mássica para cada bobina é mais afetada pelo aumento da vazão no caso do óleo mineral. Contudo, esse impacto não é significativo, indicando que a distribuição da vazão é determinada principalmente por características construtivas, como a perda hidráulica de cada bobina.

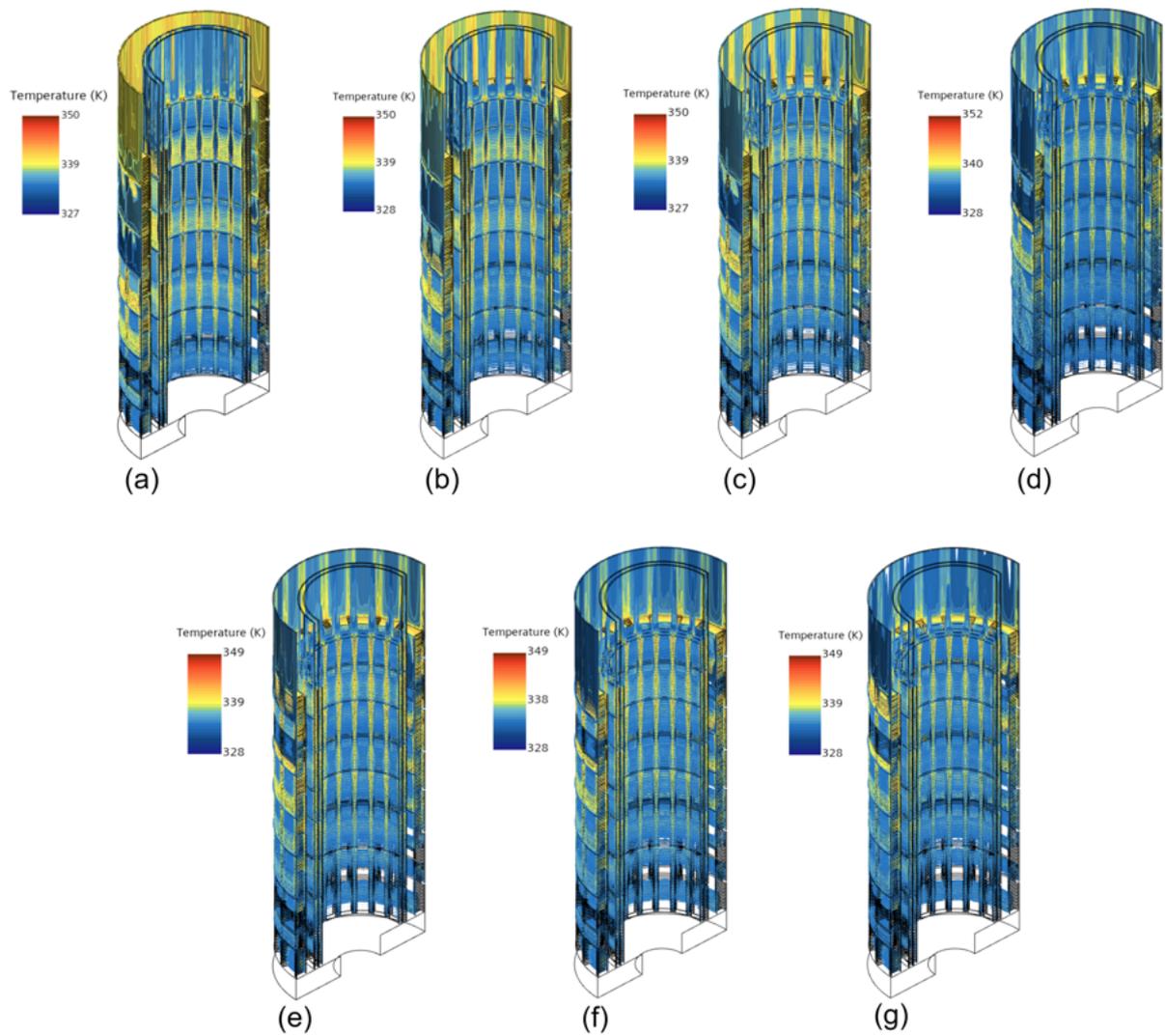
A temperatura ao longo da coluna também é influenciada pela vazão mássica de entrada, tanto para o óleo vegetal (Figura 27) quanto para o óleo mineral (Figura 28), com escala independente para melhor visualização. Observou-se que o aumento da vazão mássica resulta na diminuição das regiões de pontos quentes. Em contrapartida, a redução da vazão mássica torna os desvios de óleo e os espaçadores mais impactantes no aumento da temperatura. No entanto, as tendências de formação de pontos quentes permanecem constantes, ou seja, a temperatura continua mais elevada nos locais onde estão presentes os espaçadores e os desvios de óleo.

Em uma análise do disco no qual ocorre o *hotspot*, isto é, o disco 111 da bobina AT, observa-se que o ponto mais quente do óleo localiza-se na região onde está presente o espaçador, enfatizando novamente que o espaçador possui um efeito significativo na transferência de calor do óleo. Nas Figuras 29 e 30, com escalas fixas de temperatura, foi possível verificar a influência da vazão mássica no disco em que o óleo atinge a temperatura mais elevada. Destaca-se que, embora a temperatura diminua com o aumento da vazão mássica de entrada na coluna, as tendências de aquecimento do óleo são também determinadas por questões construtivas, como o posicionamento e a quantidade de espaçadores presentes.

Além disso, foi observado um deslocamento da região de maior temperatura do disco, onde ocorre o *hotspot*, movendo-se em direção ao interior da bobina. Esse fenômeno possivelmente resulta de características construtivas, como a menor dimensão do canal interior da bobina AT em comparação ao canal exterior, o fluxo de calor no disco e o desvio do óleo, em especial, o desvio do óleo interno no disco 107.

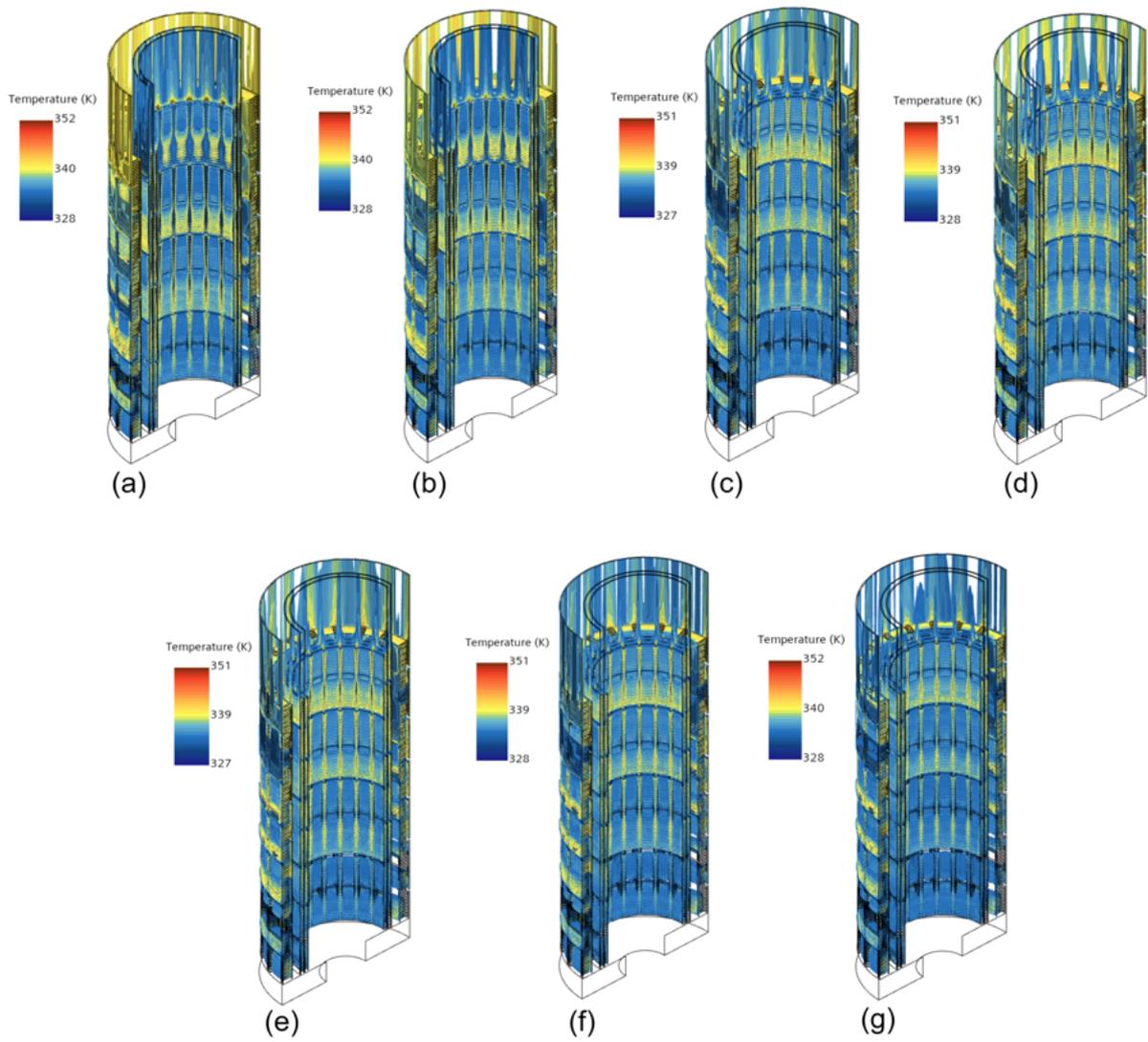
Já, em uma análise da influência da vazão mássica de entrada na temperatura média de saída de cada bobina da coluna do transformador, nota-se que o aumento na vazão mássica na

Figura 27 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo vegetal : -30% (a), -20% (b), -10% (c), 0% (d) +10% (e), +20% (f), +30% (g)



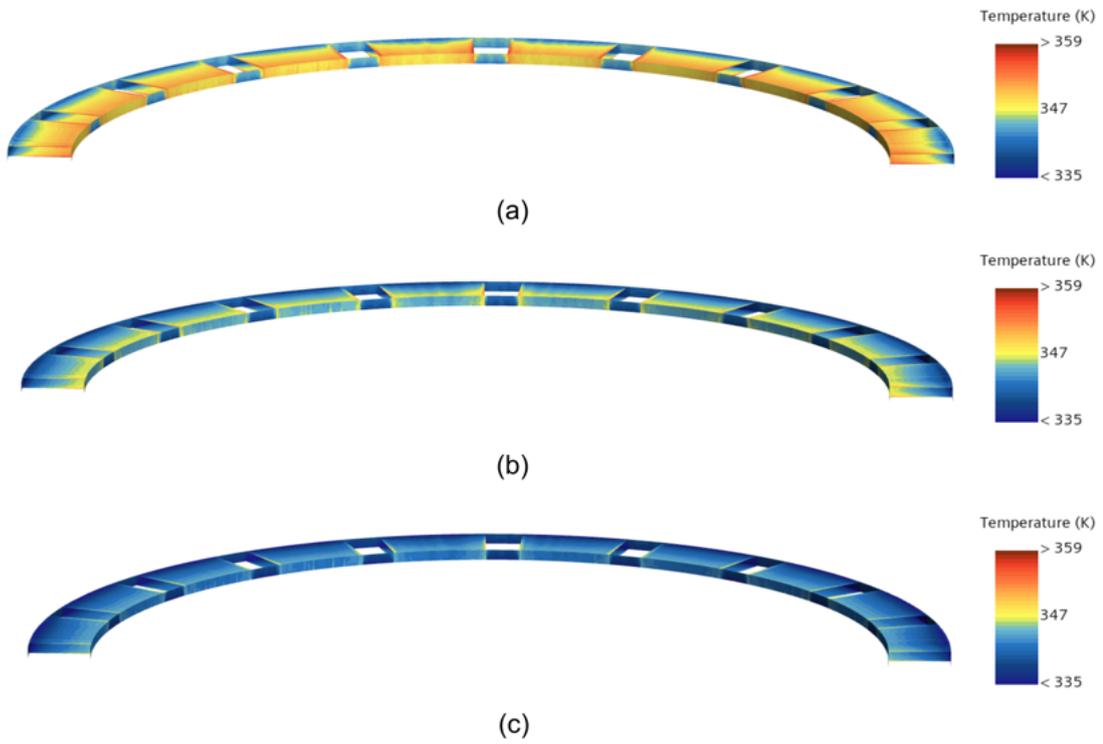
Fonte: Autor.

Figura 28 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo mineral : -30% (a), -20% (b), -10% (c), 0% (d) +10% (e), +20% (f), +30% (g)



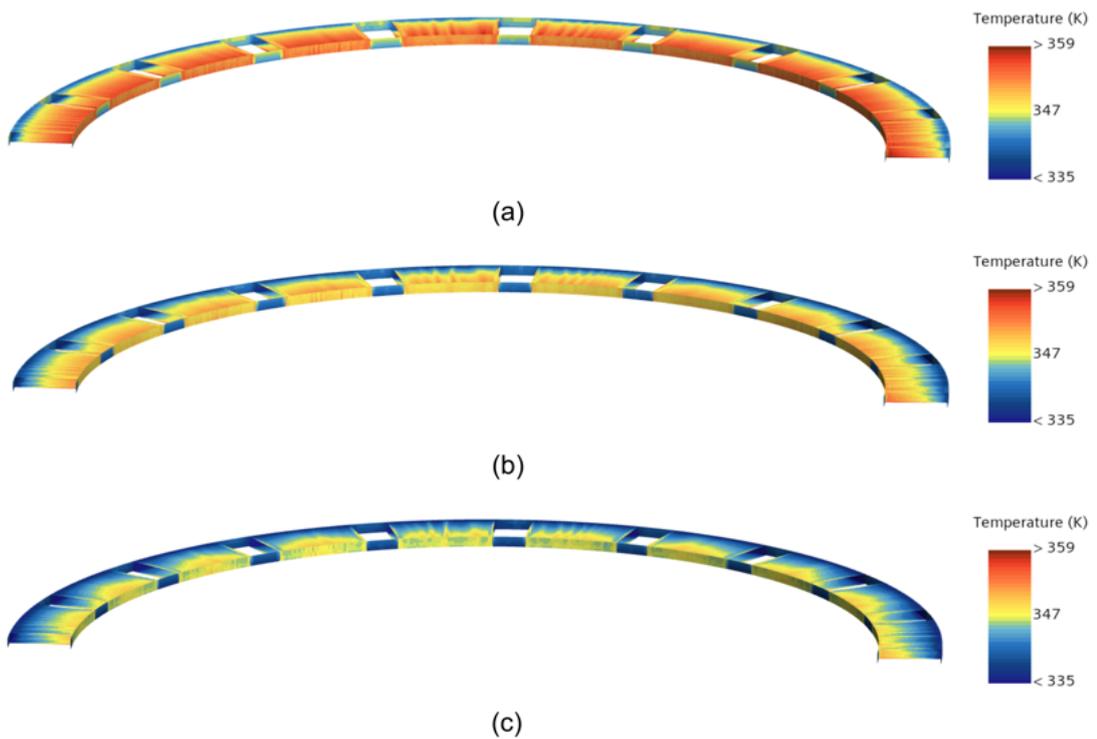
Fonte: Autor.

Figura 29 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo vegetal no disco 111: -30% (a), 0% (b), +30% (c)



Fonte: Autor.

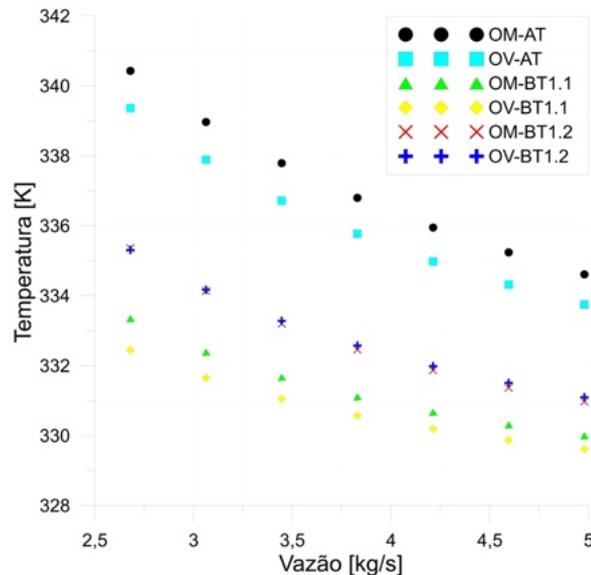
Figura 30 – Influência da vazão mássica campo de temperatura do óleo mineral no disco 111: -30% (a), 0% (b), +30% (c)



Fonte: Autor.

entrada está inversamente relacionado às temperaturas de saída das bobinas, conforme ilustrado no Gráfico 4. Para a bobina BT1.2, o comportamento da temperatura de saída com o aumento da vazão foi quase equivalente tanto para o óleo mineral quanto para o vegetal. Por outro lado, para as bobinas AT e BT1.1, a temperatura de saída apresentou um comportamento similar, contudo, o óleo mineral exibiu um desvio, com temperaturas superiores às do óleo vegetal em todas as condições de vazão analisadas.

Gráfico 4 – Temperatura média de saída das bobinas



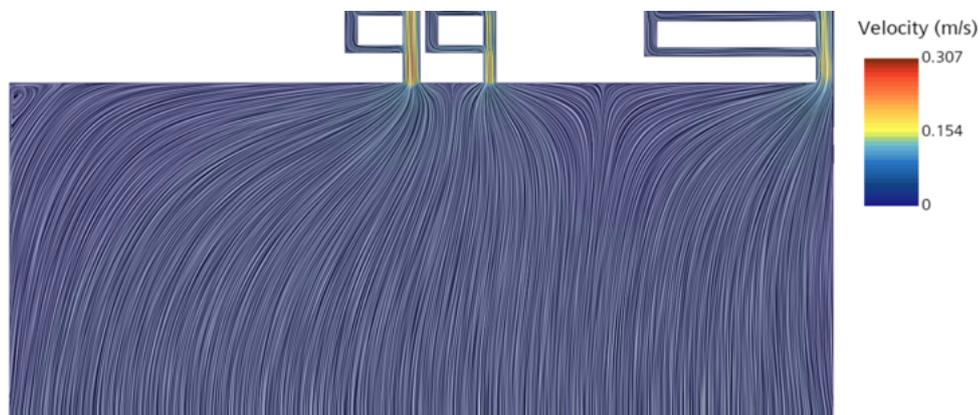
Fonte: Autor.

É importante salientar que, nas simulações conduzidas, a temperatura de entrada foi mantida constante, sendo apenas a vazão mássica de entrada variada. Essa variação resultou na diminuição das temperaturas com o aumento da vazão mássica. No entanto, na prática, o óleo ao atravessar pelas bobinas passa por um trocador de calor, retornando com uma temperatura de entrada diferente. Esse processo conduz a um novo equilíbrio térmico no sistema, o qual não foi contemplado no presente estudo.

7.4 ESCOAMENTO DO ÓLEO

A circulação do óleo dentro da coluna do transformador enfrenta diversas restrições, notadamente os espaçadores e os desvios de óleo, conforme discutido neste estudo. Nesse sentido, foi investigado o escoamento do óleo vegetal com distribuição não uniforme de perdas na entrada da coluna do transformador por meio de um reservatório de óleo simplificado proposto neste trabalho. A Figura 31 ilustra como a velocidade do óleo é influenciada por considerações geométricas, onde a bobina BT1.1 e a bobina AT apresentaram velocidades superiores devido ao maior canal axial comparado à bobina BT1.2. O canal axial é delimitada pelo disco até o cilindro de isolamento. Esses cilindros são dimensionadas principalmente por eventos eletromagnéticos e não por critérios térmicos, o que limita a vazão de óleo nesse sentido.

Figura 31 – Escoamento do óleo na entrada da coluna

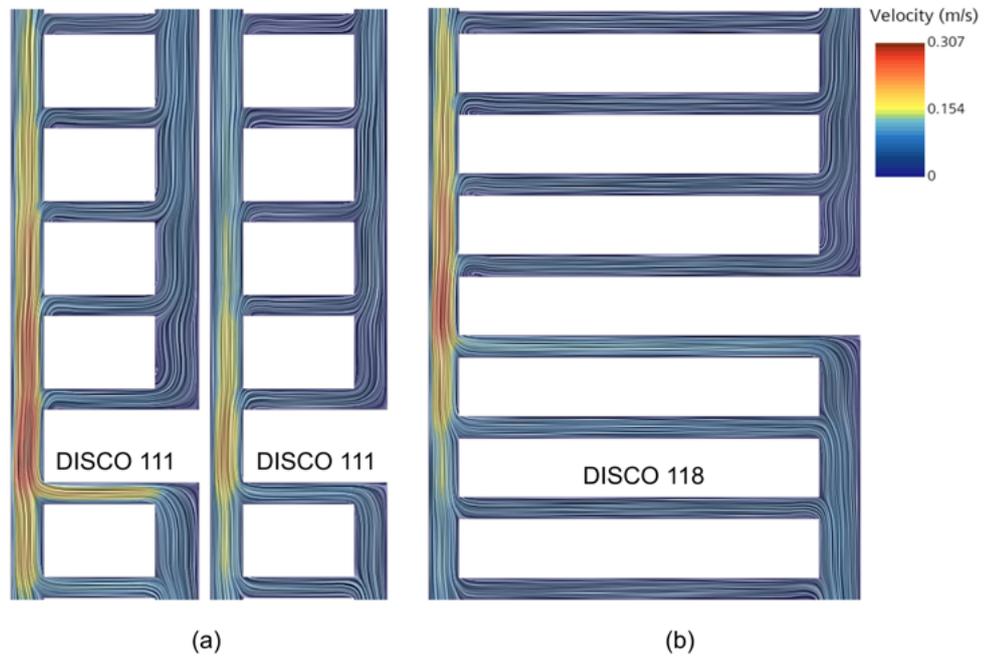


Fonte: Autor.

Por outro lado, observou-se que os desvios de óleo contribuem para o escoamento radial. A Figura 32 fornece uma análise detalhada do comportamento do desvio de óleo externo nos discos 120 da bobina de alta tensão (Figura 32(b)) e 111 das bobinas de baixa tensão (Figura 32(a)), visualizados sob uma perspectiva bidimensional, revela que a velocidade de escoamento aumenta abaixo do desvio de óleo, direcionando-se para o interior da bobina, enquanto acima do desvio ocorre uma drástica redução na velocidade, possivelmente contribuindo para regiões mais quentes acima do desvio de óleo e para o deslocamento da região quente do disco onde ocorre o *hotspot* do óleo.

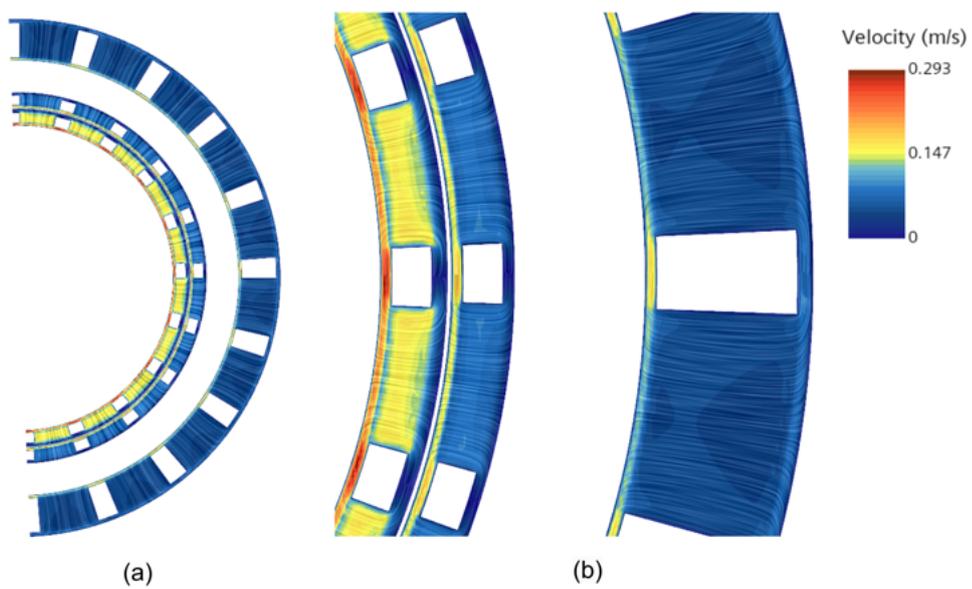
Além disso, os espaçadores atuam como restrições ao escoamento radial do óleo. A Figura 33 (a), que apresenta uma vista 2D de um corte abaixo do disco 118 da alta tensão (AT) e do disco 111 das baixas tensões (BTs), evidencia uma maior velocidade no canal interno da bobina AT, a qual é ainda mais intensificada nas BTs, em virtude da presença de desvios externos de óleo nos discos externos, especificamente no disco 120 da AT e no disco 111 da BT, o que aumenta a velocidade em direção ao interior da bobina. A Figura 33 (b), uma ampliação da Figura 33 (a), demonstra que o contorno dos espaçadores reduz a velocidade do escoamento, contribuindo para a formação de pontos quentes mencionados neste estudo.

Figura 32 – Análise do desvio de óleo externo: Escoamento de óleo nas BTs (a); Escoamento de óleo na AT (b)



Fonte: Autor.

Figura 33 – Escoamento do óleo no espaçador: (a) Vista 2D de um corte abaixo dos discos 118 (AT) e 111 (BT); (b) Ampliação da Figura 33 (a)



Fonte: Autor.

Por meio das observações relativas à velocidade de escoamento, verifica-se que os espaçadores restringem o escoamento radial do óleo, enquanto os desvios de óleo impõem uma limitação ao escoamento axial. Tais fatores evidenciam que as características construtivas exercem influência direta sobre o tempo de permanência do óleo nas bobinas, podendo resultar em maior aquecimento para óleos mais viscosos devido ao prolongado tempo de contato com o fluxo de calor. Estudos anteriores, como Tan et al. (2023), indicam que o tipo e a posição dos desvios de óleo afetam significativamente o escoamento do óleo e, conseqüentemente, a formação de pontos quentes.

Além disso, estudos como Cotas et al. (2020), que analisam o escoamento em regime permanente com perturbações na entrada da coluna, destacam que as propriedades do fluido, os efeitos viscosos e as características geométricas, como os canais radiais e os desvios de óleo, têm um impacto crucial no comportamento térmico do óleo nos enrolamentos do transformador.

Adicionalmente, embora os espaçadores sejam essenciais para a estabilidade mecânica, eles podem interferir no escoamento do óleo refrigerante, potencialmente causando superaquecimento Medeiros (2020). Este estudo ressalta que os pontos quentes frequentemente se localizam ao redor dos espaçadores em todas as simulações de bobinas, indicando que, apesar de sua contribuição para a estabilidade mecânica, os espaçadores podem comprometer o desempenho térmico do transformador.

Portanto, a análise detalhada do comportamento do óleo em relação aos espaçadores e desvios de óleo é crucial para entender e mitigar problemas de temperatura nos transformadores, impactando diretamente na eficiência e na vida útil dos equipamentos.

8 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi proposto uma avaliação da performance térmica do óleo vegetal e do mineral nos enrolamentos de uma coluna de transformador de potência em operação na Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza, em Antonina (PR). Foi empregada uma modelagem tridimensional em CFD com várias simplificações para viabilizar as análises. A metodologia adotada mostrou-se eficiente tanto na determinação do perfil de temperatura e do escoamento do óleo quanto na comparação da performance térmica entre os óleos, resultando nas seguintes conclusões:

- O modelo CFD com as simplificações propostas foi eficaz para avaliar a performance térmica dos óleos nos enrolamentos;
- Estudos com distribuição uniforme são fundamentais para compreender o comportamento do óleo, identificando fatores como a presença de espaçadores que influenciam no aquecimento. No entanto, é importante notar que a distribuição uniforme pode resultar em temperaturas médias mais altas ao longo da coluna devido à ausência de ajustes como os taps, não refletindo completamente as condições práticas;
- A distribuição das perdas nos discos exerce um impacto significativo no perfil de temperatura ao longo de toda a coluna do transformador podendo influenciar em qual disco ocorre o "hotspot" de temperatura mais alta. Observa-se que a distribuição não uniforme das perdas tende a criar áreas localizadas com temperaturas mais elevadas e pontos de máximo aquecimento, conhecidos como "hotspots", que são mais pronunciados;
- A bobina de alta tensão apresentou uma temperatura superior à da bobina de baixa tensão, tanto com a distribuição uniforme quanto com a distribuição não uniforme das perdas, devido ao fato de as perdas na bobina de alta tensão serem maiores em ambos os casos. No entanto, as tendências de aquecimento do óleo próximo à região dos espaçadores e nos desvios de óleo foram semelhantes. A única variação observada ocorreu com a mudança do tipo de óleo, sendo que o óleo mineral apresentou regiões de temperaturas significativamente mais elevadas;
- A avaliação individual do perfil térmico ao longo do disco permite a análise de características que influenciam o aquecimento do óleo, como os espaçadores. No entanto, essa avaliação não reflete necessariamente o perfil térmico ao longo da coluna, uma vez que as temperaturas mínima, média e máxima foram semelhantes em alguns discos;
- O óleo vegetal demonstrou maior eficiência térmica nas condições estabelecidas, resultando em temperaturas inferiores ao longo da coluna do transformador tanto com distribuição uniforme quanto não uniforme das perdas. Isso pode ser atribuído às propriedades

térmicas distintas de cada fluido, onde o óleo mineral possui um calor específico menor, o que tende a gerar um gradiente de temperatura maior em comparação ao óleo vegetal;

- A perda hidráulica com óleo vegetal é aproximadamente 8% maior em comparação ao uso de óleo mineral, justificando o aumento de temperatura observado quando o óleo mineral é substituído pelo óleo vegetal na mesma bomba. Na prática, o óleo vegetal tende a aquecer mais. Esse fenômeno é evidente ao se avaliar as propriedades térmicas de cada óleo, com a viscosidade do óleo vegetal sendo maior, resultando em uma alteração da vazão de entrada da coluna conforme o tipo de óleo utilizado. No entanto, neste estudo, a vazão de entrada foi mantida constante e, nesse contexto, o óleo vegetal demonstrou maior eficiência, com uma menor elevação de temperatura ao longo da coluna. Assim, o tipo de óleo utilizado influencia o desempenho térmico, sendo que o óleo vegetal apresentou melhores resultados sob condições similares. No entanto, as diferentes propriedades físicas dos óleos, como a viscosidade, impactam a vazão mássica, devendo-se considerar a capacidade das bombas para manter a mesma vazão;
- A vazão mássica de entrada no transformador influencia diretamente a temperatura máxima (*hotspot*) da coluna do transformador, de maneira inversamente proporcional. Ou seja, a diminuição da vazão mássica de entrada aumenta a temperatura máxima do óleo na coluna do transformador. Observou-se que o óleo mineral apresentou temperaturas máximas mais elevadas para as mesmas vazões propostas em comparação com o óleo vegetal. No entanto, o disco onde ocorre a temperatura máxima não foi alterado pela variação da vazão mássica de entrada, apenas a magnitude da temperatura máxima foi afetada. Nesse contexto, aumentar a vazão mássica pode reduzir a temperatura, mas isso apresenta desafios relacionados à eletrificação do óleo, que requerem análises adicionais;
- As características geométricas do transformador, como a posição dos cilindros de proteção e dos desvios de óleo, têm um impacto significativo no escoamento de óleo para as bobinas no determina a perda hidráulica de cada uma. Embora a vazão mássica de entrada afete diretamente a temperatura ao longo do transformador e a temperatura média de saída de cada bobina, no qual tende a diminuir com o aumento da vazão. A distribuição percentual do óleo em cada bobina não tem alteração significativa, demonstrando que a otimização dessas geometrias é crucial para o projeto térmico de transformadores de potência.
- A velocidade de escoamento abaixo do desvio de óleo é elevada, o que contribui para o escoamento do óleo no sentido radial. Contudo, na região acima do desvio de óleo, o escoamento é limitado, fazendo com que a temperatura se eleve nessas áreas. Assim, a utilização dos desvios de óleo auxilia na troca térmica, mas a restrição do óleo no sentido axial pode contribuir para um aumento da perda de carga na coluna como um todo e para a formação de regiões de temperaturas mais elevadas. Portanto, a utilização dos desvios

de óleo é um parâmetro importante no projeto térmico de transformadores de potência;

- Os espaçadores são componentes do transformador que contribuem para a estabilidade mecânica, separando o contato direto entre os discos. Contudo, sua utilização restringe o escoamento do óleo no sentido radial, e a velocidade de escoamento no contorno do espaçador é limitada, criando regiões com temperaturas mais elevadas, o que pode impactar negativamente na eficiência térmica e no desempenho global do transformador. Portanto, é crucial considerar o design e a colocação dos espaçadores para minimizar esses efeitos e otimizar a dissipação de calor.

Em suma, as simulações computacionais permitiram uma análise detalhada dos padrões de escoamento de óleo e da distribuição térmica, proporcionando insights valiosos para o aprimoramento do design de transferência de calor dos transformadores. Futuras investigações poderiam explorar diferentes localizações de sensores de temperatura para uma avaliação mais abrangente das temperaturas de *hotspot*. No entanto, há espaço para melhorias, especialmente com a inclusão de espaçadores que permitiriam comparações diretas com dados experimentais obtidos por meio de sensores de fibra óptica posicionados nos espaçadores.

Além disso, a suposição de que a vazão da bomba é igual à vazão de entrada nas bobinas e que a temperatura de saída do radiador é constante até chegar às bobinas pode introduzir imprecisões no modelo. Para aumentar a precisão, é recomendável instalar sensores de vazão na entrada de cada bobina, levando em conta as perdas associadas e a distribuição real do escoamento de óleo. Além disso, sensores de temperatura do óleo ao longo das bobinas seriam benéficos para uma monitoração e comparação mais precisa das condições térmicas locais.

9 TRABALHOS FUTUROS

- Conduzir estudos sob diferentes configurações de taps para validar a robustez do modelo em variadas condições operacionais.
- Explorar abordagens tridimensionais que incorporam estecas e espaçadores, em contraste com simulações tradicionais focadas apenas no óleo dielétrico, representa uma linha de pesquisa promissora.
- Para futuras investigações, uma análise em duas dimensões do transformador poderia ser conduzida, otimizando componentes como espaçadores e estecas, a fim de comparar os resultados com o modelo tridimensional atual.
- Considerar o impacto das estecas na transferência de calor, integrando esses estudos ao escopo da pesquisa.
- Ampliar o modelo para incluir o sistema de troca térmica e o tanque do transformador seria uma extensão valiosa para compreender o desempenho global do sistema.
- Integrar dados de perdas do transformador em campo ao modelo permitiria investigar áreas potenciais de alta temperatura, complementando os resultados obtidos em ensaios de fábrica.
- Explorar uma variedade mais ampla de óleos dielétricos e avaliar suas características térmicas no contexto do modelo desenvolvido poderia fornecer insights adicionais sobre opções mais eficientes para aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

AHMED, M. R.; ISLM, M. S.; KARMAKER, A. K. Experimental investigation of electrical and thermal properties of vegetable oils for used in transformer. In: IEEE. **2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)**. [S.l.], 2021. p. 1–4.

ALMEIDA, L. S.; MUNIZ, P. R. Economic analysis of vegetable-oil-filled power transformers in brazilian energy distribution systems compared to mineral-oil-filled ones. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Springer, v. 32, n. 4, p. 1063–1070, 2021.

ALMEIDA, V. F. d. et al. Estudo numérico da convecção natural em um banco de tubos elípticos verticais. Universidade Federal de Santa Maria, 2023.

ARAUJO, D. C.; MARTINS, A. J.; SILVA, N. A. As vantagens da revitalização de transformadores de potência utilizando repotenciação e óleo vegetal. **Anais do Seminário Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE**, 2006.

AREATECNOLOGIA. **Interior Transformador Trifásico**. 2024. Disponível em: <<https://www.areatecnologia.com/electricidad/transformador-trifasico.html>>. Acesso em: 20 de abril de 2024.

AZEVEDO, A. C. d. et al. Estresse eletromecânico em transformadores causado por curtos-circuitos passantes e correntes de energização. Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

BARTH, N. D. et al. Metodologia de análise térmica e hidráulica em transformadores de potência. Universidade Federal de Santa Maria, 2020.

CALIL, W. V.; COSTA, E. C. M. d.; SALLES, M. B. d. C. **Methodology for specification of generator step-up transformers in photovoltaic power plants based on real loading profile**. 2020. Tese (Doutorado) — Doctoral thesis submitted to the Polytechnic School of the University of São , 2020.

CAMPELO, H. et al. Numerical thermofluid analysis of a power transformer disc-type winding. In: IEEE. **2016 IEEE electrical insulation conference (EIC)**. [S.l.], 2016. p. 362–365.

CENGEL, A. **Heht transfer**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 2003.

CHI, C. et al. A multi-scale thermal-fluid coupling model for onan transformer considering entire circulating oil systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 135, p. 107614, 2022.

CHRISTINA, A. et al. Causes of transformer failures and diagnostic methods—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 1442–1456, 2018.

CIGRE. Guide for transformer maintenance. **CIGRE GT A2.05**, 2013.

_____. Transformer thermal modelling. **CIGRE WG A2.38**, 2016.

CONTRI, M. W. et al. Estudo comparativo da suportabilidade dielétrica de isolantes sólidos a base de celulose e aramida para aplicação em transformadores de potência. Universidade Federal de Santa Maria, 2024.

COPEL. **Transformador com tecnologia inovadora é instalado na usina GPS.** 2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/posts/copel_transformador-com-tecnologia-inovadora-%C3%A9-atividade-7130168868987109376-6NW2>. Acesso em: 06 de abril de 2024.

COTAS, C. et al. Numerical study of transient flow dynamics in a core-type transformer windings. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 187, p. 106423, 2020.

CZERNORUCKI, M. V. et al. Multi-objective design optimization for hvdc-lcc converter transformers: Analytical and fea-based comparison. **IEEE Access**, IEEE, v. 11, p. 23032–23045, 2023.

ELMASHTOLY, A. M.; CHANG, C.-K. Prognostics health management system for power transformer with iec61850 and internet of things. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, Springer, v. 15, n. 2, p. 673–683, 2020.

FERNANDO-NAVAS, D.; ECHEVERRY-IBARRA, D. F.; CADAVID-RAMÍREZ, H. Evaluation of the use of a vegetable oil in distribution transformers. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, Universidad de Tarapacá, v. 20, n. 2, p. 185–190, 2012.

FOFANA, I. 50 years in the development of insulating liquids. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, IEEE, v. 29, n. 5, p. 13–25, 2013.

GORGAN, B. et al. Calculation of the remaining lifetime of power transformers paper insulation. In: IEEE. **2012 13th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM)**. [S.l.], 2012. p. 293–300.

IEEE. Guide for loading mineral-oil-immersed transformers. **IEEE Standard**, v. 57, p. 91–1995, 1995.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. [S.l.]: Wiley New York, 1996. v. 6.

ISLAM, M. M.; LEE, G.; HETTIWATTE, S. N. A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. **Electrical Engineering**, Springer, v. 100, p. 581–605, 2018.

JAHROMI, A. et al. An approach to power transformer asset management using health index. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, IEEE, v. 25, n. 2, p. 20–34, 2009.

JIA, X. et al. Electromagnetic and thermal characteristics simulation for three-phase three-limb transformers under dc magnetic bias. **Heat Transfer Research**, Begel House Inc., v. 54, n. 12, 2023.

JÚNIOR, G. C. D. N. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2011.

KEBRITI, R.; HOSSIENI, S. H. 3d modeling of winding hot spot temperature in oil-immersed transformers. **Electrical Engineering**, Springer, v. 104, n. 5, p. 3325–3338, 2022.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. **Transformer engineering**. [S.l.]: Marcel Dekker New York, 2004. v. 1.

LIANG, S. et al. Comparative analysis of multi-physical fields of vegetable and mineral insulating oil power transformer. **Cogent Engineering**, Taylor & Francis, v. 11, n. 1, p. 2323802, 2024.

MALISKA, C. R. **Fundamentals of computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Springer Nature, 2023. v. 135.

MARULANDA, A. et al. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. In: IEEE. **2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**. [S.l.], 2008. p. 1–6.

MATHARAGE, S.; LIU, Q.; WANG, Z. Aging assessment of kraft paper insulation through methanol in oil measurement. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1589–1596, 2016.

MCSHANE, C. et al. Aging of kraft paper in natural ester dielectric fluid. In: IEEE. **Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL 2002 (Cat. No. 02CH37319)**. [S.l.], 2002. p. 173–177.

MEDEIROS, L. H. Metodologia baseada em simulações para determinação dos esforços eletromecânicos em transformadores de potência. Universidade Federal de Santa Maria, 2020.

MEDEIROS, L. H. **Modelo termo-hidráulico em regime permanente para parte ativa de transformadores de potência validado por instrumentação óptica**. 2023. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2023.

MELLO, J. C. de O.; NEVES, E. Avaliação do modelo de expansão da transmissão de energia elétrica adotado no brasil desafios e oportunidades de aprimoramento. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 41184–41198, 2022.

NASSAR, Y.; AISSA, K.; ALSADI, S. Air pollution sources in libya. *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2017.

NOGUEIRA, G. C. et al. Thermal analysis of power transformers with different cooling systems using computational fluid dynamics. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Springer, v. 33, p. 359–368, 2022.

ONS. **Extensão das Linhas de Transmissão**. 2024. https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/extensao_linhastransmissao.aspx. Acesso em: 23 de abril de 2024.

PARAMANE, S. B. et al. Effects of oil leakage on thermal hydraulic characteristics and performance of a disc-type transformer winding. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 98, p. 1130–1139, 2016.

PASTERNAK, B.; ROZGA, P. Influence of dielectric liquid type on partial-discharge inception voltage in oil-wedge-type insulating system under ac stress. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 2, p. 1005, 2023.

PATANKAR, S. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [S.l.]: CRC press, 2018.

PORTELLA, M. G. et al. Estudo comparativo do envelhecimento químico acelerado de papel kraft termoestabilizado e convencional. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)**. [S.l.: s.n.], 2011.

PRESS, C. **Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers**. [S.l.]: CRC Press, 2001.

RAFIQ, M. et al. Use of vegetable oils as transformer oils—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 52, p. 308–324, 2015.

RIES, W. Transformadores—fundamentos para o projeto e cálculo. **Porto Alegre: EDIPUCRS**, 2007.

ROBBA, E. J. et al. **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.

RODRIGUES, T. F. et al. Evaluation of power transformer thermal performance and optical sensor positioning using cfd simulations and temperature rise test. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 72, p. 1–11, 2023.

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**, IEEE, v. 7, p. 174651–174661, 2019.

SIEMENS. **Simcenter STAR-CCM+ 2310 User Guide: Theory**. [S.l.], 2024.

SIMONE, G. et al. O uso de óleo vegetal em transformadores de distribuição de energia elétrica. 2017.

SMOLKA, J. Cfd-based 3-d optimization of the mutual coil configuration for the effective cooling of an electrical transformer. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 124–133, 2013.

TAN, Y. et al. Improving the flow and thermal uniformities of transformer disc-type windings using a self-blocking oil circuit. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 148, p. 107083, 2023.

TENBOHLEN, S. et al. Investigation of thermal behavior of an oil-directed cooled transformer winding. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 33, n. 3, p. 1091–1098, 2017.

TORRIANO, F.; PICHER, P.; CHAABAN, M. Numerical investigation of 3d flow and thermal effects in a disc-type transformer winding. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 40, p. 121–131, 2012.

VEKEN, W. Van der et al. Increased efficiency of thermal calculations via the development of a full thermohydraulic radiator model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 31, n. 4, p. 1473–1481, 2015.

WANG, C. et al. A combined computational fluid dynamics and thermal–hydraulic modeling approach for improving the thermal performance of corrugated tank transformers: A comparative study. **Energies**, MDPI, v. 17, n. 8, p. 1802, 2024.

WEG. **Transformador de potência - Catálogo**. 2024. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h78/h36/WEG-transformador-de-potencia-catalogo-espanol.pdf>>. Acesso em: 06 de abril de 2024.

WILHELM, H.; FERNANDES, P. Apresentação e caracterização de novo papel isolante: papel híbrido. **XVI ERIAC, Puerto Iguazu, Iguazú, Argentina**, 2015.

YANG, L. et al. Influence of vegetable oil on the thermal aging of transformer paper and its mechanism. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, IEEE, v. 18, n. 3, p. 692–700, 2011.

YATSEVSKY, V. A. Hydrodynamics and heat transfer in cooling channels of oil-filled power transformers with multicoil windings. **Applied thermal engineering**, Elsevier, v. 63, n. 1, p. 347–353, 2014.

YU, X. et al. Thermal analysis and optimization on a transformer winding based on non-uniform loss distribution. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 226, p. 120296, 2023.

YUAN, F. T. et al. Thermal optimization research of oil-immersed transformer winding based on the support machine response surface. **Thermal Science**, v. 26, n. 4 Part B, p. 3427–3440, 2022.

ZHANG, C. et al. Transformer fault diagnosis method using iot based monitoring system and ensemble machine learning. **Future generation computer systems**, Elsevier, v. 108, p. 533–545, 2020.

ZHANG, X. **Dimensional Analysis Based CFD Modelling for Power Transformers**. [S.l.]: The University of Manchester (United Kingdom), 2017.

ZHANG, X. et al. Experimental verification of dimensional analysis results on flow distribution and pressure drop for disc-type windings in od cooling modes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 33, n. 4, p. 1647–1656, 2017.

_____. Flow and temperature distributions in a disc type winding-part ii: Natural cooling modes. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 165, p. 114616, 2020.

ZIOMEK, W. et al. High voltage power transformer insulation design. In: IEEE. **2011 Electrical Insulation Conference (EIC)**. [S.l.], 2011. p. 211–215.

NUP: 23081.077385/2024-21

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
10	Trabalho de conclusão de curso	TCC_DOUGLAS_CARVALHO_VF2.pdf

Assinaturas

05/08/2024 10:58:57

DOUGLAS MACHADO CARVALHO (Aluno de Graduação - Aluno Regular)
07.09.03.01.0.0 - Engenharia Mecânica - 120379



Código Verificador: 4428920

Código CRC: 468faa60

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

