



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ENGENHARIA MECÂNICA

LUCIENE MARTINS MOURA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO POR ÓLEO DIRIGIDO DE UM  
TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA MÓVEL POR MEIO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS  
COMPUTACIONAL**

Belo Horizonte

2022

LUCIENE MARTINS MOURA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO A ÓLEO DIRIGIDO DE UM  
TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA MÓVEL POR MEIO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS  
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Vinícius Trevizoli

Coorientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner

Belo Horizonte

R696a

Rodrigues, Luciene Martins Moura.

Avaliação do sistema de arrefecimento por óleo dirigido de um transformador de potência móvel por meio de dinâmica dos fluidos computacional [recurso eletrônico] / Luciene Martins Moura Rodrigues. - 2022.

1 recurso online (134f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Paulo Vinícius Trevizoli.

Coorientador: Rudolf Huebner.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 129-134.

Bibliografia: f. 120-128.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fluidodinâmica Computacional - Teses. 3. Transformadores Elétricos – Teses. I. Trevizoli, Paulo Vinícius. II. Huebner, Rudolf. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

*AValiação DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO A ÓLEO DIRIGIDO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA  
MÓVEL POR MEIO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL*

**LUCIENE MARTINS MOURA RODRIGUES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Paulo Vinicius Trevizoli (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Rudolf Huebner (Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marcio Fonte Boa Cortez (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Guilherme de Souza Papini (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Energia e Sustentabilidade".

Dissertação aprovada no dia 03 de junho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por Paulo Vinicius Trevizoli, Professor do Magistério Superior, em 30/06/2022, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Rudolf Huebner, Professor do Magistério Superior, em 01/07/2022, às 18:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Marcio Fonte Boa Cortez, Professor do Magistério Superior, em 04/07/2022, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Guilherme de Souza Papini, Membro, em 08/07/2022, às 12:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 1556139 e o código CRC E81CED39.

*“A curiosidade é uma plantinha delicada que, além de estímulo, precisa principalmente de liberdade”.* (Albert Einstein Autobiographical Notes, 1949).

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por estar comigo e fazer deste projeto o meu cajado, o meu cálice, restaurando-me o vigor pela vida, em tempos tão complexos para toda a humanidade.

Em especial à memória de meu pai Ulisses Moura, pelo exemplo de bondade e simplicidade. Ainda que sem qualquer formação acadêmica, me ensinou a mais importante lição: a humildade.

À memória de minha amada mãe Neuzita, pelo exemplo de resiliência e vontade de viver.

Aos meus irmãos, que hoje são meu esteio.

A minhas filhas Larissa e Alice, que foram minha inspiração e puderam compreender minha ausência, por vezes necessária, nos passeios, nas brincadeiras, mas sempre com ternura me renovavam as energias.

Ao meu esposo Kerlly Pascoal, pelo apoio incondicional, cuidando das nossas filhas, de mim e do nosso lar, durante as várias horas em que estive dedicada a esse trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Paulo Vinícius Trevizoli, pela dedicação, paciência e acessibilidade.

Ao coorientador Prof. Dr. Rudolf pelos conselhos e confiança na cessão dos recursos do Laboratório de Dinâmica dos fluidos computacional,

Jamais imaginei que teria oportunidade de trabalhar com duas tão renomadas personalidades acadêmicas. Uma honra!

A Marina, da secretaria do departamento de engenharia, que com muita competência me orientou em cada etapa até conclusão do trabalho, inclusive respondendo-me, por vezes, já tarde da noite e sempre com muita presteza.

A todos os funcionários do departamento de engenharia mecânica, CTM e UFMG que de alguma forma contribuíram para conclusão deste trabalho.

Agradeço à Companhia Energética de Minas Gerais que oportunizou meu acesso e inspeção nos ativos citados nesta pesquisa.

Sinto-me grata pela oportunidade e por ter conhecido cada um de vocês.

## RESUMO

Os transformadores de potência representam uma parte importante do investimento de capital em subestações de transmissão e distribuição. O arrefecimento dos enrolamentos (bobina elétrica) pode ser intensificado pela circulação forçada do óleo de arrefecimento através dos enrolamentos, bem como nos trocadores de calor externos. Uma troca de calor ineficaz entre o óleo de arrefecimento e os enrolamentos pode diminuir a vida útil do transformador ou até mesmo levar à sua falha repentina. O desenvolvimento da análise matemática, por meio de métodos numéricos, que contemple as equações de conservação da massa, energia e quantidade de movimento, vêm contribuir para a avaliação do comportamento fluidodinâmico, bem como para o aperfeiçoamento dos projetos de transformadores no sentido de prevenir e identificar eventuais problemas de fabricação ou montagem que podem impactar o desempenho térmico do seu sistema de arrefecimento. Desta forma, o presente trabalho propõe um estudo numérico do sistema de arrefecimento de enrolamentos de um Transformador Móvel de Potência de 138x69-34x13,8 kV 25 MVA (designado por TM1), que avaliará o desempenho térmico do sistema de troca de calor operando em condições nominais e sob condições irregulares de escoamento ou falhas geométricas. É proposto um modelo matemático bidimensional, em regime permanente, para simular o escoamento e a transferência de calor entre o óleo e os enrolamentos. Para obter as soluções numéricas, utilizou-se o software Ansys-Fluent®. A validação da análise matemática e computacional é primeiramente embasada em resultados experimentais obtidos na literatura. Após a validação, parte-se para o estudo específico do comportamento fluidodinâmico em TM1, sendo inicialmente inseridos os valores nominais de vazões de óleo, temperaturas e potência dissipada. Posteriormente, algumas restrições/imperfeições em relação aos parâmetros de entrada e/ou geométricos são artificialmente impostas no modelo, e os seus resultados permitem avaliar o seu impacto sobre o desempenho térmico do TM1. Dentre os casos simulados, verificou-se que alguns desvios geométricos e imperfeições secundárias do processo de manufatura podem afetar diretamente as distribuições de escoamento de óleo, o campo de temperaturas e a localização dos chamados *pontos quentes* no enrolamento, expondo determinadas áreas a temperaturas acima das admissíveis. Desse modo, para cada perturbação imposta obteve-se um mapeamento das possíveis vulnerabilidades do enrolamento.

**Palavras-chave:** Transformador de Potência, Sistema de Arrefecimento a Óleo, Sobreaquecimento, CFD.

## ABSTRACT

Power transformers represent an important part of capital investment in transmission and distribution substations. The cooling of the windings (electric coil) depends on the heat exchange, which can be intensified by the forced circulation of the cooling oil throughout the windings as well as in the external heat exchangers. An ineffective heat exchange between the cooling oil and the windings can shorten the lifespan of the transformer or even lead to its sudden failure due to overheating. The development of a mathematical model, and its solution throughout a numerical method, that involves the mass, momentum and energy conservation equations, contributes to the evaluation of the fluid dynamics behavior, as well to the improvement of the transformer's design in order to prevent and identify manufacturing and/or assembling issues that may impact on the cooling system performance. Thus, the present work proposes a numerical study of the winding cooling system of a 138x69-34x13.8 kV 25 MVA Mobile Power Transformer (named TM1), which will be allowed evaluating the thermal performance of the heat exchange system operating under rated conditions and under irregular flow conditions or geometric issues. A two-dimensional steady state mathematical model is proposed to simulate the fluid flow and heat transfer between the oil and the windings. To obtain the numerical solutions, the Ansys-Fluent® software was used. The validation of the mathematical and computational analysis is initially based on with experimental results obtained in the literature. After validation, the specific study of TM1 is started, initially considering the nominal values for oil flow rates, temperatures, and dissipated power/heart. Subsequently, some restrictions and imperfections in relation to the input and geometric parameters are artificially imposed to the model, and their results allow us to evaluate their impact on the thermal performance of the TM1. Among the simulated cases, it was found that some geometric deviations and secondary imperfections of the manufacturing process can directly affect the oil flow and temperature fields, as well the location of the so-called hot spots in the winding, exposing certain areas to temperatures above of the admissible. In this way, for each disturbance imposed, a mapping of the possible vulnerabilities of the winding is obtained.

**Keywords:** *Power Transformer, Oil Cooling System, Overheating, CFD.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estrutura básica do setor elétrico .....	16
Figura 2.1 - Estrutura característica de um transformador. ....	20
Figura 2.2 - Composição básica de uma subestação móvel. ....	21
Figura 2.3- Sistemas de Arrefecimento de Óleo do Transformador.....	23
Figura 2.4 - Desenhos esquemáticos de transformadores: (a) núcleo envolvido ; (b) núcleo envolvente.....	25
Figura 2.5 - Estrutura dos canais para escoamento em transformadores do tipo ODAF: a) vista dos dutos de óleo na armadura do núcleo; b) canais de óleo no núcleo.....	25
Figura 2.6 - Entrada de tubulação para conexão com o núcleo.....	26
Figura 2.7 - Detalhe enrolamento elétrico sobre o núcleo magnético laminado. ....	27
Figura 2.8 - Estrutura de enrolamentos: (a) enrolamento sem RAT, ilustrando os canais horizontais e verticais; (b) enrolamento com RAT. ....	28
Figura 2.9 - Estrutura típica: (a) transformador fixo; (b) transformador móvel.....	29
Figura 2.10 - Esquemas hidráulicos de trocadores de calor para ODAF. ....	31
Figura 2.11 - Diagrama de temperaturas do enrolamento e do óleo - Grandezas monitoradas e calculadas.....	34
Figura 2.12 - Estrutura enrolamento tipo disco. ....	37
Figura 2.13 - Esquema de medição por imagem térmica. ....	39
Figura 2.14 - Comportamento eletrostático para óleo tipo mineral.....	42
Figura 3.1 - Modelagem Tridimensional em CFD para Enrolamentos AT e BT .....	50
Figura 4.1 - Desenho esquemático do transformador móvel tipo ODAF.....	54
Figura 4.2 - Representação simplificada bidimensional dos enrolamentos transformado em estudo.....	55
Figura 4.3 - Representação simplificada bidimensional: a) especificação do volume de controle (VC); (b) apresentação de alguns elementos mais importantes do enrolamento de AT; (c) ilustração do escoamento ao longo do enrolamento de AT.; (d) apresentação de algumas dimensões importantes. ....	56
Figura 5.1 - Domínio computacional do enrolamento AT: à esquerda está o bloco inferior, e à direita o superior.....	65
Figura 6.1 - Diagrama esquemático do conjunto experimental.....	77

Figura 6.2 - Tipos de direcionadores: (a) guias alternadas e (b) guias internas/externas.....	78
Figura 7.1 - Representação do enrolamento usado no experimento: (a) distribuição de temperatura; (b) detalhe malha na interface dos discos x fluido; (c) detalhe malha interface regiões guias x fluido.....	81
Figura 7.2 - Comparação entre as malhas M2-M3-M4 e o resultado experimental ao longo dos diferentes discos e quadro de avaliação GCI para $\delta THS$ no primeiro disco .....	82
Figura 7.3 - Comparação dos valores de $\delta THS$ ao longo dos diferentes discos entre as malhas M1-M2-M3 e o resultado experimental.....	83
Figura 7.4 - Comparação elevações de temperatura nos discos, malha M2 e resultado experimental, $Ve = 0,3m/s$ e $Q=1pu$ : (a) $Te = 55^{\circ}C$ ; (b) $Te = 75^{\circ}C$ .....	84
Figura 7.5 - Comparação elevações de temperatura nos discos, malha M2 e resultado experimental, $Te = 60^{\circ}C$ e $Q = 1 pu$ : (a) $Ve = 0,2 m/s$ ; (b) $Ve = 0,3m/s$ .....	85
Figura 7.6 - Comparação elevações de temperatura nos discos, malha M2 e resultado experimental, $Te = 60^{\circ}C$ , $Ve = 0,3m/s$ : (a) $Q = 0.8 pu$ ; (b) $Q = 1,2 pu$ .....	85
Figura 7.7 - Detalhe malha M2 para TM1 e estatística dos elementos. ....	86
Figura 7.8 - Distribuição de temperatura para condições normais e $Ve = 0,4 m/s$ .....	87
Figura 7.9 - Traçado linhas de fluxo e vetores do escoamento: (a) detalhe base, $Ve = 0,4 m/s$ ; (b) topo, .....	88
Figura 7.10 - Distribuição de temperatura para condições normais e $Ve = 0,7 m/s$ .....	89
Figura 7.11 - Traçado linhas de fluxo do escoamento: (a) detalhe base com $Ve = 0,7 m/s$ ; (b) detalhe topo, .....	90
Figura 7.12 - Enrolamento AT de TM1 com guias de escoamento deformadas.....	91
Figura 7.13 - Deformação das dimensões das guias: (a) posicionamento correto; (b) guia deformada. ....	91
Figura 7.14 - Distribuição de temperatura – Cenário 1: $Ve=0,4m/s$ . ....	92
Figura 7.15 - Distribuição de temperatura – Cenário 1: $Ve = 0,7 m/s$ . ....	93
Figura 7.16 - Contorno temperatura de saída - Cenário 1: (a) $Ve = 0.4m/s$ ; (b) $Ve = 0.7m/s$ .93	
Figura 7.17 - Campos de velocidade Cenário 1: (a) $Ve = 0,4 m/s$ ; (b) $Ve = 0,7 m/s$ .....	94
Figura 7.18 - Fluxo reverso canal horizontal para velocidade $Ve = 0,4 m/s$ .....	95
Figura 7.19 - Esforços de compressão e expansão por efeito eletrodinâmicos. ....	96
Figura 7.20 - Bobina RAT em falha com deformação e curto-circuito entre espiras.....	98
Figura 7.21 - Alteração da geometria de TM1 com redução dos canais entre discos considerado no Cenário 2. ....	98

Figura 7.22 - Distribuição de temperatura – Cenário 2 - $V_e = 0,4$ m/s .....	99
Figura 7.23 - Distribuição de temperatura – Cenário 2 - $V_e = 0,7$ m/s .....	99
Figura 7.24 - Dutos de entrada de óleo e anéis prensagem inferiores. ....	100
Figura 7.25 - Distribuição de temperatura – Cenário 3 - $V_e = 0,4$ m/s. ....	101
Figura 7.26 - Distribuição de temperatura – Cenário 3 - $V_e = 0,7$ m/s. ....	101
Figura 7.27 - Distribuição de temperatura – Cenário 4 – $V_e = 0,4$ m/s. ....	102
Figura 7.28 - Distribuição de temperatura – Cenário 4 – $V_e = 0,7$ m/s.....	103
Figura 7.29 - Detalhe capa de proteção base da bobina AT- TM1 .....	104
Figura 7.30 - Deslocamento da capa base - Cenário 5: (a) posição original; (b) posição modificada .....	104
Figura 7.31 - Distribuição temperatura – Cenário 5 – $V_e = 0,4$ m/s. ....	105
Figura 7.32 - Distribuição temperatura – Cenário 5 – $V_e = 0,7$ m/s. ....	105
Figura 7.33 - Distribuição temperatura – Cenário 6 - $V_e = 0,3$ m/s. ....	106
Figura 7.34 - Distribuição temperatura – Cenário 7 - $V_e = 0,3$ m/s. ....	107
Figura 7.35 - Campos de velocidade para Cenário 7: (a) com domínio sólido; (b) sem domínio sólido com detalhe do direcionamento do óleo. ....	108
Figura 7.36 - Curto entre espiras discos 1 e 2 .....	109
Figura 7.37 - Detalhe componentes radiais de fluxo eletromagnético disperso.....	111
Figura 7.38 - Curva de corrente de curto circuito suportável ( $I \times t$ ) para o limite de capacidade térmica. ....	112
Figura 7.39 - Distribuição de temperatura - Cenário 8: $Q' = 5$ pu, $Q = 1$ pu, $V_e = 0,4$ m/s, $T_e = 77^\circ\text{C}$ .....	113
Figura 7.40 - Distribuição de temperatura - Cenário 8: $Q' = 5$ pu, $Q = 1$ pu, $V_e = 0,7$ m/s, $T_e = 77^\circ\text{C}$ .....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características do sistema de bombeamento hidráulico para o óleo direcional. ...	31
Tabela 2.2 - Limites de elevação de temperatura. ....	33
Tabela 2.3 - Temperatura limite (°C) – para temperatura ambiente de 40°C ou superior .....	36
Tabela 2.4 - Relação temperatura x Fator de perda vida útil.....	40
Tabela 4.1 - Dimensões dos discos e espaçamentos para o enrolamento de AT.....	57
Tabela 5.1 - Características construtivas, geométricas e operacionais do enrolamento AT. ...	66
Tabela 5.2 - Propriedades óleo naftênico. ....	69
Tabela 5.3 - Propriedades do cobre. ....	69
Tabela 5.4 - Propriedades dos sólidos isolantes. ....	69
Tabela 5.5 - Condições de operação nominais consideradas no estudo. ....	71
Tabela 5.6 - Configuração para os métodos de solução .....	72
Tabela 6.1 - Condições de operação na entrada do transformador do estudo experimental ....	77
Tabela 7.1 - Memorial de cálculo de suportabilidade a esforços por curto-circuito .....	97
Tabela 7.2 - Relações correntes x perdas aplicadas.....	113
Tabela 7.3 - Sumário dos resultados obtidos.....	115
Tabela A.1 – Características nominais .....	129

## NOMECLATURAS

$A$	Área de superfície do duto vertical de entrada de passagem do óleo ( $m^2$ )
$cp$	Calor específico ( $J/(kg \cdot K)$ )
$Dh$	Diâmetro hidráulico (m)
$g$	Média da diferença de temp. entre enrolamento e óleo ( $\frac{T_{am} - (T_{to} + T_{bo})}{2}$ ) (K).
$H$	Fator de ponto mais quente (fator de hot spot)
$I_{cc}$	Valor eficaz da corrente de curto-circuito (A)
$h$	Altura geométrica (m)
$It$	Corrente triboelétrica (A)
$k$	Condutividade térmica ( $W/(K \cdot m)$ )
$l$	Profundidade (m)
$n_1$	Número de passagens de óleo ao longo do enrolamento
$n_2$	Número de discos entre passagens de óleo
$Np$	Número de espiras enrolamento primário
$Ns$	Número de espiras enrolamento primário
$P_d$	Perímetro do duto vertical de entrada
$Pr$	Número Prandtl
$Q$	Perdas totais por unidade de volume ( $W/m^3$ )
$Q'_{enr}$	Perdas nos enrolamentos por unidade de área ( $W/m^2$ )
$Re$	Número Reynolds
$S$	Superfície de área da passagem do fluido pelo duto vertical ( $m^2$ )
$Se$	Termo Fonte ( $W/m^3$ )
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ ou K)

$t$	Tempo (min ou s)
$T^*$	Temperatura adimensional
$T'$	Coefficiente triboelétrico
$T_{am}$	Temperatura média do enrolamento (°C ou K)
$T_{bo}$	Temperatura inferior do óleo (°C ou K)
$T_e$	Temperatura na entrada do duto (°C ou K)
$T_{hs}$	Temperatura do ponto mais quente no sólido
$T'_{hs}$	Temperatura do ponto mais quente no óleo
$T_{to}$	Temperatura do topo do óleo (°C ou K)
$u$	Velocidade tangencial (m/s)
$u_m$	Velocidade média de entrada da passagem do enrolamento (m/s)
$V$	Velocidade do fluido (m/s)
$V_e$	Velocidade do óleo na entrada do duto (m/s)
$V_p$	Tensão enrolamento primário
$V_s$	Tensão enrolamento secundário
$\varepsilon_r$	Constante dielétrica do óleo
$\varepsilon_o$	Constante de permissividade elétrica no vácuo (8,854 pF/m)
$\mu$	Viscosidade dinâmica (Pa·s)
$\rho$	Densidade do fluido (kg / m <sup>3</sup> )
$\theta_h$	Temperatura do ponto mais quente, expressa em graus Celsius (°C ou K).

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
<b>1.1.</b>	<b>Objetivo Geral</b>	19
<b>1.2.</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	19
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	20
<b>2.1.</b>	<b>Aspectos Gerais do Transformador</b>	20
<b>2.2.</b>	<b>Princípios de Troca de Calor em Transformador e sua Classificação</b>	22
<b>2.3.</b>	<b>Partes Construtivas do Transformador</b>	23
2.3.1.	Parte Ativa	24
2.3.2.	Núcleo	24
2.3.3.	Enrolamentos	26
2.3.4.	Tanques Principal e de Expansão do Óleo	28
2.3.5.	Trocadores de Calor	29
<b>2.4.</b>	<b>Características do Arrefecimento do Transformador Móvel</b>	30
<b>2.5.</b>	<b>Limites de Elevação de Temperatura do Transformador</b>	32
2.5.1.	Ensaio de Elevação de Temperatura	33
2.5.2.	Fator de Ponto Mais Quente	36
2.5.3.	Método de Medição de Temperatura	38
2.5.4.	Envelhecimento Relativo e Vida Útil da Isolação	39
<b>2.6.</b>	<b>Limites de Velocidades e Fenômeno de Eletrificação do Óleo</b>	40
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	44
<b>4.</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSFORMADOR ODAF</b>	53
<b>4.1.</b>	<b>Hipóteses Simplificativas e Domínio de Análise</b>	53
4.1.1.	Equações de Conservação Simplificadas	57
4.1.2.	Adimensionalização das Equações de Conservação	58
<b>4.2.</b>	<b>Condições de contorno</b>	60
<b>5.</b>	<b>ABORDAGEM COMPUTACIONAL</b>	63
<b>5.1.</b>	<b>Domínio Computacional</b>	64
<b>5.2.</b>	<b>Implementação Numérica</b>	67
5.2.1.	Generalidades e Discretização no Tempo	67
5.2.2.	Propriedades dos Materiais	68
5.2.3.	Características dos Domínios	70

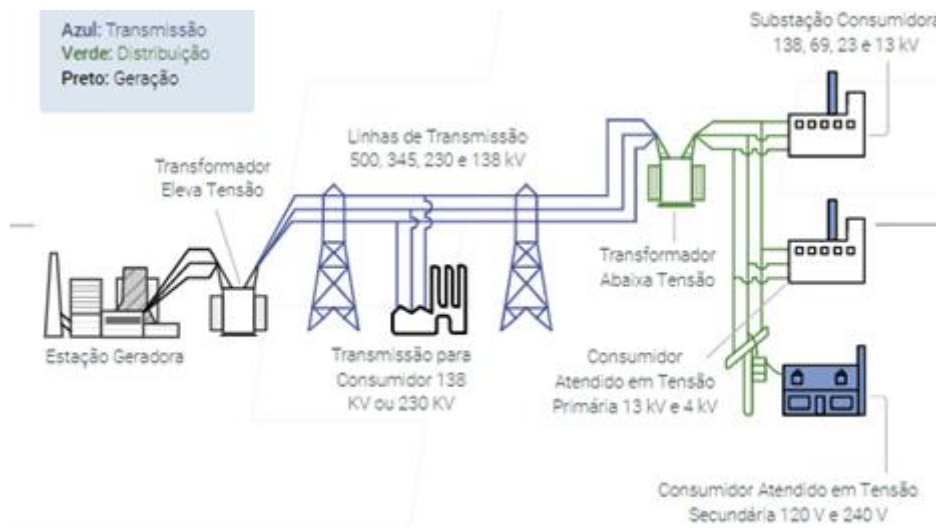
5.2.4.	Acoplamento Pressão Velocidade.....	70
5.2.5.	Esquemas de Discretização Espacial.....	70
5.2.6.	Condições de Operação e de Contorno .....	71
5.2.7.	Critérios de convergência.....	72
<b>5.3.</b>	<b>Malha Computacional.....</b>	<b>72</b>
5.3.1.	O Método Grid Convergence Index– GCI.....	73
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>76</b>
<b>6.1.</b>	<b>Estudo de Independência do Tamanho de Malha e Validação do Modelo Matemático.....</b>	<b>76</b>
<b>6.2.</b>	<b>Estudo das Condições Nominais de Operação.....</b>	<b>79</b>
<b>6.3.</b>	<b>Estudo da Condições Não-Nominais de Operação Impostas Artificialmente</b>	<b>79</b>
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
<b>7.1.</b>	<b>Independência do Tamanho de Malha e Validação do Modelo Matemático .</b>	<b>81</b>
<b>7.2.</b>	<b>Condições Nominais de Operação .....</b>	<b>87</b>
<b>7.3.</b>	<b>Condições Não-Nominais de Operação Impostas Artificialmente.....</b>	<b>90</b>
7.3.1.	Cenário 1 - Deformação das Guias de Óleo.....	90
7.3.2.	Cenário 2 - Deslocamento dos Discos.....	95
7.3.3.	Cenário 3 - Obstrução de Entrada .....	100
7.3.4.	Cenário 4 - Obstrução de Saída.....	102
7.3.5.	Cenário 5 – Deslocamento da Capa Base.....	103
7.3.6.	Cenário 6 – Efeitos Combinados: Deslocamento de Disco com Velocidade Reduzida .....	106
7.3.7.	Cenário 7 – Efeitos Combinados: Deslocamento de Capa Base com Velocidade Reduzida .....	107
7.3.8.	Cenário 8 - Perdas Não Uniformes .....	109
<b>7.4.</b>	<b>Discussões Gerais dos Resultados .....</b>	<b>115</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>118</b>
<b>8.1.</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>119</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE A – INSPEÇÃO INVESTIGATIVA SOBRE DE FALHA DE TRANSFORMADOR MÓVEL.....</b>	<b>129</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico nacional tem uma estrutura subdividida basicamente em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As suas principais funções são, respectivamente: transformar energia (mecânica ou solar) em elétrica, transportar e distribuir para os clientes finais – residências, comércio ou indústrias. Neste sistema, determinados processos intermediários são fundamentais para a transmissão e distribuição, reduzindo perdas e garantindo que a energia chegue ao consumidor em níveis estáveis e seguros. A Figura 1.1 apresenta o diagrama com a estrutura básica do sistema elétrico nacional, em que se destaca o papel dos transformadores. A jusante das estações geradoras há as unidades elevadoras, que elevam as tensões geradas em níveis de transmissão por meio das linhas, e em seguida, os transformadores abaixadores, que transformam os níveis de tensão em valores de distribuição para as redes e subestações consumidoras industriais. Nas redes são ainda instalados os transformadores de distribuição que reduzem novamente os níveis de tensões para consumo residencial, entre 110 e 240 Volts.

Figura 1.1 - Estrutura básica do setor elétrico



Fonte: (ANEEL, 2021)

Neste esquema, as subestações estão instaladas antes do fornecimento de energia para o consumidor final. Elas têm o importante papel de transformar a energia recebida da estação geradora (alta tensão) aos níveis de consumo final (baixa tensão) por meio de uma série de conjunto de equipamentos de manobras e conversão de energia. Os transformadores são os principais equipamentos presentes nas subestações de distribuição e transmissão de energia. Logo, interrupções nestes têm importante impacto técnico e econômico na operação do sistema

elétrico, devido aos custos de reparo, energia não transmitida e todos os transtornos associados para indústrias e sociedade.

Os transformadores de potência são máquinas elétricas estáticas que, por indução eletromagnética, transformam tensões alternadas entre dois enrolamentos, sem mudança de frequência, em diferentes níveis. Na sua concepção básica, o enrolamento é constituído por duas ou mais bobinas (primárias e secundárias) de fio de cobre enrolado em torno do núcleo de ferromagnético. Essas bobinas são acopladas por meio do fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. (Fitzgerald *et al*, 2014).

Normalmente, transformadores de altas potências têm seus enrolamentos e núcleo imersos em óleo isolante. O óleo mineral naftênico é o tipo de fluido mais comumente utilizado e tem a função combinada de dielétrico e de arrefecimento (Cheim, 2009). No processo de conversão, envolvendo a corrente elétrica e a tensão através do enrolamento primário para os enrolamentos secundários, parte da energia é dissipada na forma de calor, em grandes quantidades. A dissipação de calor (perdas térmicas) está intimamente relacionada à corrente circulante (em kA) no enrolamento secundário, que depende fundamentalmente da potência elétrica demandada pelas cargas conectadas ao secundário do transformador. Logo, uma das grandezas mais importantes que regem a expectativa de vida de um transformador é sua condição de operação sob carga, ou seja, a energia convertida e fornecida às cargas da concessionária, que afeta diretamente a temperatura do óleo de arrefecimento, enrolamentos e, conseqüentemente, os materiais isolantes que compõem sua parte ativa. Tanto o óleo quanto os isolantes sólidos, são materiais que possuem um limite de operação de temperatura, sob as quais suas características dielétricas não devem ficar comprometidas. Neste sentido, para controlar a temperatura do transformador emprega-se um sistema de resfriamento, de modo que o calor gerado (perdas térmicas) é removido por convecção, promovida pela circulação do óleo entre os enrolamentos e os trocadores de calor, seja por ação natural ou por circulação forçada, em que o óleo de arrefecimento retira calor dos enrolamentos rejeitando-o para o meio ambiente através de trocadores de calor (radiador ou aerotermo).

Dentre os diferentes tipos de transformadores, a presente dissertação releva uma classe específica de transformador móvel com sistema de arrefecimento do tipo ODAF. Nesta sigla OD (Óleo Direcional) significa que o fluido de arrefecimento é um óleo e que o escoamento interno ao transformador (em contato com os enrolamentos) ocorre de maneira forçada, por meio de bombas centrífugas associadas ao direcionamento em dutos no interior dos

enrolamentos. Por sua vez, AF (Ar Forçado) significa que o ar circula externamente pelos radiadores ou aerotermos, por meio de motoventiladores, de modo a forçar o escoamento de ar entre as aletas. Desse modo, a fase quente é o óleo de arrefecimento e a fase fria é o ar ambiente que escoar externamente, também de maneira forçada. Essa classe de transformadores móveis são geralmente unidades compactas, com restrições de peso e tamanho, montados sobre carretas. Normalmente são solicitados para atendimento de emergência no sistema elétrico, em caso de falha de transformadores fixos.

O dimensionamento incorreto e/ou problemas decorrentes, seja dos processos de montagem do sistema de resfriamento, seja por falta de manutenção, podem levar à uma troca de calor inefetiva acarretando a operação dos transformadores sob altas temperaturas, as quais aceleram a degradação do papel utilizado no isolamento dos enrolamentos. A operação contínua acima da temperatura recomendada pode diminuir o tempo de vida útil consideravelmente (Vita *et al* 2013), e conseqüentemente, levar à falha ou queima do transformador.

Recentemente, os esforços para melhorar os projetos térmicos têm se concentrado em melhorar a estimativa do chamado *ponto mais quente* ou *hot spot*, seja por meio de modelos matemáticos detalhados que levam em conta a distribuição pontual de perdas e resfriamento, ou pelo uso de sensores de fibra ótica para medir a temperatura no ponto mais quente na localização pressuposta pelos softwares. O *ponto mais quente* pode surgir no interior dos enrolamentos ou no núcleo magnético, assim, a localização e a medição desta temperatura podem ser realizada via experimentos, que são geralmente complexos, intrusivos, e que permitem medir apenas um número limitado de pontos discretos. Por outro lado, o uso da técnica de Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) - torna-se um método mais sofisticado e não invasivo na medida em que é possível se prever o comportamento fluidodinâmico do óleo e a distribuição de temperatura em diferentes condições, às quais os enrolamentos dos transformadores podem estar submetidos, fornecendo detalhes sobre a formação e localização dos pontos mais quentes ao longo do enrolamento.

Neste contexto, a presente dissertação propõe a modelagem matemática e a solução numérica do escoamento e da transferência de calor para avaliar o desempenho térmico do sistema de troca de calor de Transformador Móvel de Potência de 138x69-34,5x13,8 kV, 25 MVA (tipo ODAF), sendo aqui designado por TM1, operando em condições nominais e sob condições irregulares de escoamento ou desvios geométricos. A implementação numérica é realizada em um pacote comercial, Ansys Fluent®, o qual permite avaliar de forma robusta e

acurada os campos de velocidades e temperaturas, bem como a posição dos *pontos mais quentes* ao longo dos enrolamentos e a possível ocorrência de falhas.

Portanto, a partir da interpretação dos resultados obtidos para os diferentes cenários simulados – sob condições nominais ou imperfeições operacionais/geométricas impostas artificialmente - busca-se com esse trabalho um melhor entendimento das possíveis causas de falhas no sistema de arrefecimento em transformadores do tipo ODAF, que conseqüentemente afetam sua disponibilidade operacional e retorno de capital às concessionárias de energia.

### **1.1. Objetivo Geral**

O objetivo desta dissertação é a modelagem matemática, a implementação numérica e a realização de simulações do sistema de troca de calor tipo ODAF de Transformador Móvel de Potência de 138x69-34x13,8 kV 25 MVA, a fim de obter os perfis de velocidade e de temperatura, bem como a identificação e a intensidade da temperatura em *pontos mais quentes* que podem levar a falha precoce deste tipo de transformador.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, são identificados os seguintes objetivos específicos:

- a) Validar o modelo e a sua implementação numérica, bem como a malha espacial proposta, com base em dados experimentais disponíveis na literatura para transformadores similares ao do presente estudo;
- b) Avaliar o desempenho térmico do transformador em estudo sob condições nominais de operação.
- c) Elaborar cenários artificiais, com variações operacionais e/ou geométricas além das nominais, de modo a verificar os seus impactos sobre os campos de escoamento, de temperatura e se estes poderiam levar à formação de *pontos quentes* e à eventuais falhas prematuras.

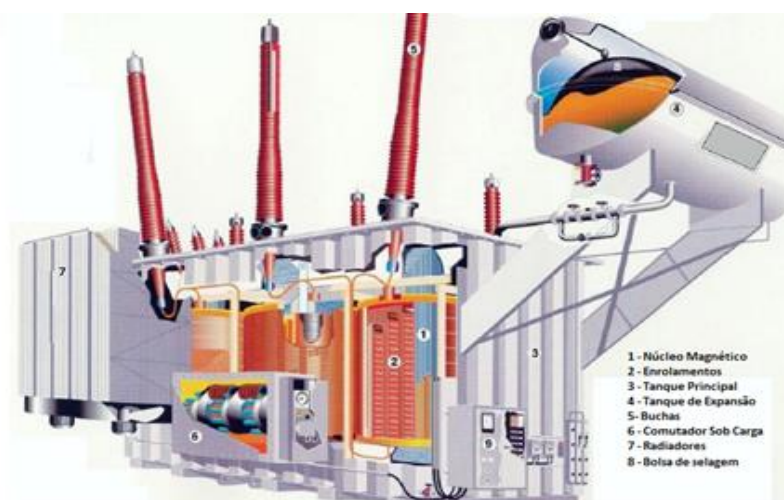
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Aspectos Gerais do Transformador

O transformador de potência é um equipamento fundamental no sistema elétrico. Utilizado no processo de transformação de energia para diferentes valores de tensão, integra o sistema de transmissão aos níveis de distribuição para os consumidores residenciais e industriais.

A eficiência do transformador está relacionada à sua perda técnica<sup>1</sup> e encontrar uma forma de reduzi-la é um desafio nas engenharias elétrica e mecânica. Nos enrolamentos ocorrem as dissipações por efeito Joule, enquanto no núcleo, as dissipações ocorrem por histerese magnética<sup>2</sup> ou circulação de correntes parasitas (correntes de *Foucault*) nas chapas de aço silício, grampos, parafusos de prensagem. Aumentar a eficiência térmica do transformador significa retirar tanto o calor produzido nos enrolamentos e conexões, quanto este produzido no núcleo magnético através da dissipação nos radiadores e tanque por meio da circulação do óleo isolante. As principais estruturas de um transformador podem ser observadas na Figura 2.1 em que é possível visualizar internamente os enrolamentos e o núcleo, externamente os radiadores, buchas e demais acessórios.

Figura 2.1 - Estrutura característica de um transformador.



Fonte: Lorencini (1999) – adaptado

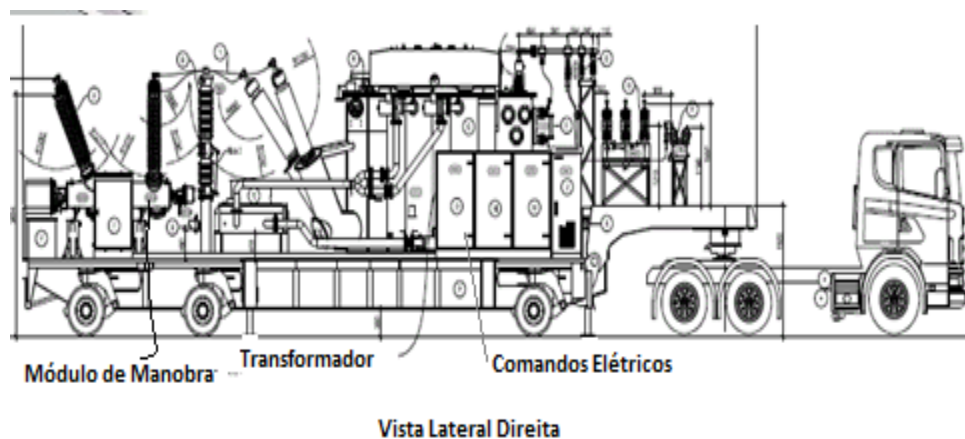
<sup>1</sup> As perdas técnicas de um transformador podem ser atribuídas à potência ativa dissipada no tempo pelos enrolamentos (perdas no cobre ou perdas ôhmicas) e pelo núcleo (perdas no “ferro”).

<sup>2</sup> Histerese magnética é a tendência que os materiais ferromagnéticos apresentam de conservar a magnetização adquirida por eles mediante a aplicação de um campo magnético externo.

As elevações de temperatura do óleo e do enrolamento são grandezas normalizadas e devem ser limitados para evitar a deterioração das propriedades do óleo e dos isolantes sólidos, utilizados nos enrolamentos e nas buchas. Dependendo da potência do transformador, e, portanto, de suas perdas, a área da superfície externa pode ser insuficiente para dissipar este calor. Aumentar as taxas de transferência de calor significa, muitas vezes, aumentar área de dissipação.

Esse aspecto, porém, torna-se um problema quando se trata de um projeto de transformador para montagem em subestações móveis, dada à mobilidade necessária para este equipamento e, portanto, restrições de peso e tamanho. Esse conjunto é essencialmente usado para garantir a continuidade no fornecimento de energia e reduzir o tempo de interrupções em casos de falhas ou manutenções de transformadores convencionais (fixos). Sua utilização amplia as possibilidades de intervenções rápidas no sistema, sejam elas de caráter preventivo ou corretivo. O chamado transformador móvel é então uma unidade de transformação projetada especificamente para um conjunto de semirreboque, módulos de manobras e comandos elétricos transportados em conjunto. A Figura 2.2 apresenta a composição básica de uma subestação móvel.

Figura 2.2 - Composição básica de uma subestação móvel.



Fonte: Manual do Fabricante-CGPOWER (2014, p.19), adaptado.

Por sua estrutura compacta, geralmente os transformadores móveis são projetados com sistemas de arrefecimento que devem promover taxas mais altas de transferência de calor e que ocupem menor espaço. Para tanto, o projeto de um sistema de troca de calor requer atenção especial pois tem impacto direto na taxa de disponibilidade e de extensão da vida útil do transformador.

## 2.2. Princípios de Troca de Calor em Transformador e sua Classificação

Os transformadores são providos de sistemas de troca de calor empregados para limitar a temperatura dos materiais isolantes a níveis adequados às suas classes térmicas, de forma a garantir uma vida útil longa ao equipamento. A norma ABNT NBR 5356:2 (ABNT, 2007) especifica estes limites e padroniza os ensaios empregados para se obter os níveis de elevação de temperatura que devem ser suportados pelos componentes do transformador ao durante sua operação em carga.

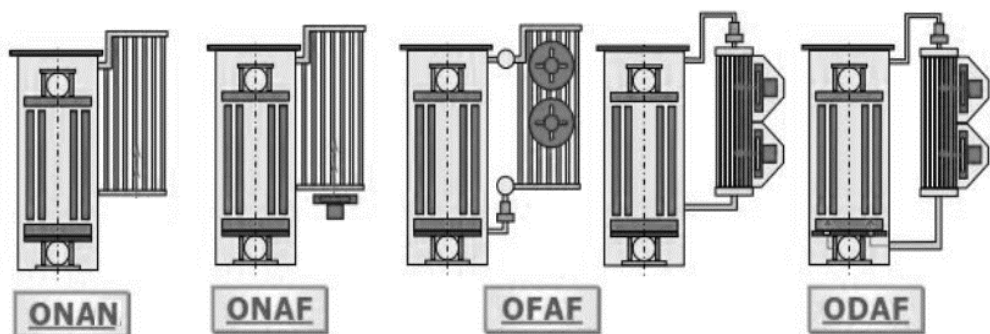
Internamente o transformador é composto de enrolamentos e núcleo, conjunto chamado de parte ativa, que produzem o calor (ou perdas); e de isolações e ferragens, sendo envolvida pelo fluido isolante (normalmente óleo mineral). O arrefecimento se processa pela transferência de calor da parte ativa ao óleo envolvente e deste ao meio ambiente através dos radiadores. O óleo realiza uma circulação ascendente, por convecção natural ou escoamento forçado, ao aumentar a temperatura em contato com a parte ativa e descendente ao diminuí-la em contato com a superfície interna dos radiadores.

Devido aos diferentes mecanismos de circulação de fluidos de trabalho, os transformadores podem ser classificados segundo uma nomenclatura com 4 letras. Os mais comumente utilizados, apresentados na Figura 2.3, são:

- ONAN – Óleo Natural, Ar Natural - neste tipo, o escoamento por convecção natural faz com que o óleo quente da parte inferior do tanque escoe para a parte superior, enquanto que o óleo frio escoe para a parte inferior. O óleo quente no lado superior dissipa o calor para a atmosfera por condução, convecção natural e radiação através de radiadores e tanque. Isso permite que o óleo no tanque circule continuamente quando o transformador está sob carga.
- ONAF – Óleo Natural, Ar Forçado - a dissipação de calor pode ser intensificada promovendo um escoamento de ar forçado na superfície de dissipação do radiador pelo uso de ventiladores. Assim, obtêm-se maiores taxas de transferência de calor do que o ar natural, de tal forma que o transformador pode ser submetido a maior carregamento em relação ao sistema ONAN, sem alterações significativas na estrutura. Este sistema pode ainda ser composto de diferentes grupos de ventilações a serem acionados de acordo com a demanda de carregamento do transformador.
- OFAF – Óleo Forçado, Ar Forçado - neste a dissipação de calor é intensificada pelo uso de ar forçado na superfície de dissipação, enquanto a circulação do óleo quente no tanque do transformador também é um escoamento forçado promovido por bombas conectadas às tubulações antes da entrada nos radiadores.

- ODAF – Óleo Dirigido, Ar Forçado - este tipo é uma derivação do OFAF, em que a circulação forçada de óleo é direcionada através de canais predeterminados no interior dos enrolamentos do transformador. Este tipo é geralmente usado em transformadores com restrições dimensionais ou altas demandas de carga. O óleo quente retirado dos enrolamentos, com o escoamento promovido pelas bombas centrífugas, é transferido para os radiadores ou aerotermos, onde ocorre a troca térmica com ar, que circula externamente, por convecção forçada.

Figura 2.3- Sistemas de Arrefecimento de Óleo do Transformador.



Fonte: Yamazaki (2017), adaptado.

Os transformadores móveis geralmente são providos de sistemas OFAF ou ODAF. Neste trabalho, o estudo está direcionado a um projeto do tipo ODAF que permite uma ocupação reduzida de espaço dos radiadores bem como de todo o dimensionamento do transformador, ainda que para altos carregamentos, o que contribui para sua melhor mobilidade. Nas sessões a seguir são descritos os principais componentes de um transformador e como estes estão correlacionados com os sistemas de resfriamentos.

### 2.3. Partes Construtivas do Transformador

O projeto do transformador é um processo complexo, que envolve diversas considerações elétricas, mecânicas e térmicas. A operação confiável e o atendimento da expectativa de vida útil dependem diretamente do cumprimento dos requisitos elétricos, térmicos e mecânicos dos materiais empregados em cada componente, dentre estes pode-se destacar aqueles que ficam em contato direto com o óleo isolante: parte ativa; tanques principal e de expansão e; trocadores de calor.

A partir de um dimensionamento adequado dos componentes é possível estabelecer a expectativa de vida útil do transformador. Atualmente a REN 674 (ANEEL, 2015) prevê que a



expectativa operacional é de 25 anos. No entanto, a ABNT NBR 5356-7 (ABNT, 2017), estabelece que o dimensionamento dos fabricantes deve ser para uma expectativa de 35 anos, de modo que, para fins de projeto térmico, deve-se considerar uma operação de 150.000 hs a 110°C em regime contínuo, para transformadores imersos em óleo mineral e com uso de papel termoestabilizado<sup>3</sup> em sua parte ativa, cuja estrutura é apresentada a seguir.

### 2.3.1. Parte Ativa

A parte ativa do transformador é basicamente o conjunto formado pelas bobinas e o núcleo com suas partes acessórias, tais como vigas do núcleo, comutador e conexões dos enrolamentos primários e secundários. O projeto mecânico da parte ativa deve considerar todos os esforços que serão aplicados ao núcleo e enrolamentos, principalmente os oriundos de um curto-circuito externo envolvendo fornecimento de altas correntes elétricas.

Uma das principais causas das falhas na parte ativa deve-se ao estresse térmico pelas perdas elétricas geradas dentro do transformador e ao seu sistema de arrefecimento inefetivo. A elevação de temperatura acima do admissível acelera o envelhecimento do transformador, deteriorando o sistema de isolamento, uma vez que, tanto o óleo quanto os materiais sólidos perdem suas características isolantes ideais. Os componentes da parte ativa podem sofrer variações dimensionais de acordo com as potências nominais e sistemas de arrefecimento projetado.

### 2.3.2. Núcleo

O núcleo laminado é responsável pela conexão magnética dos enrolamentos primário (lado da fonte) e secundário (lado da carga). É normalmente constituído de chapas planas de aço silício de grãos orientados, idealmente de alta permeabilidade magnética e baixas perdas. As lâminas são presas por uma estrutura em ferro e madeira densificada que serve como meio de centralizar e estabilizar o conjunto núcleo-bobina, de tal modo que não haja movimento deste em qualquer direção. Assim, garante-se a rigidez mecânica e evita-se vibrações, que por sua vez aumentam as perdas elétricas (por correntes parasitas) e geram sobreaquecimento local.

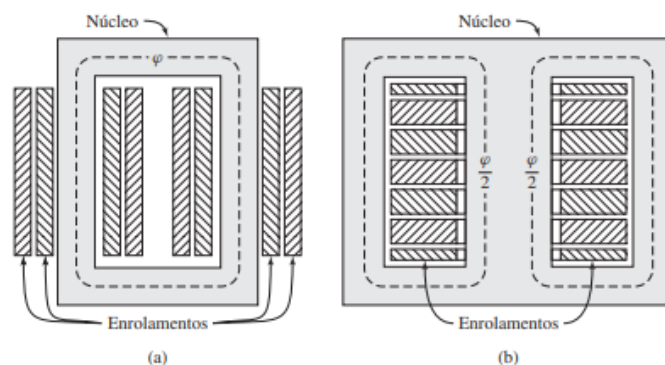
Há dois tipos de construção: o núcleo envolvido e núcleo envolvente. No tipo de núcleo envolvido (Figura 2.4a), os enrolamentos envolvem duas “pernas” de um núcleo magnético

---

<sup>3</sup> O processo de estabilização térmica do papel é obtido por meio de reações de acetilação da celulose ou pela adição de agentes químicos estabilizantes.

retangular, ao passo que no tipo de núcleo envolvente (Figura 2.4b), os enrolamentos envolvem a “perna” central de um núcleo de três “pernas” (Fitzgerald *et al*, 2014).

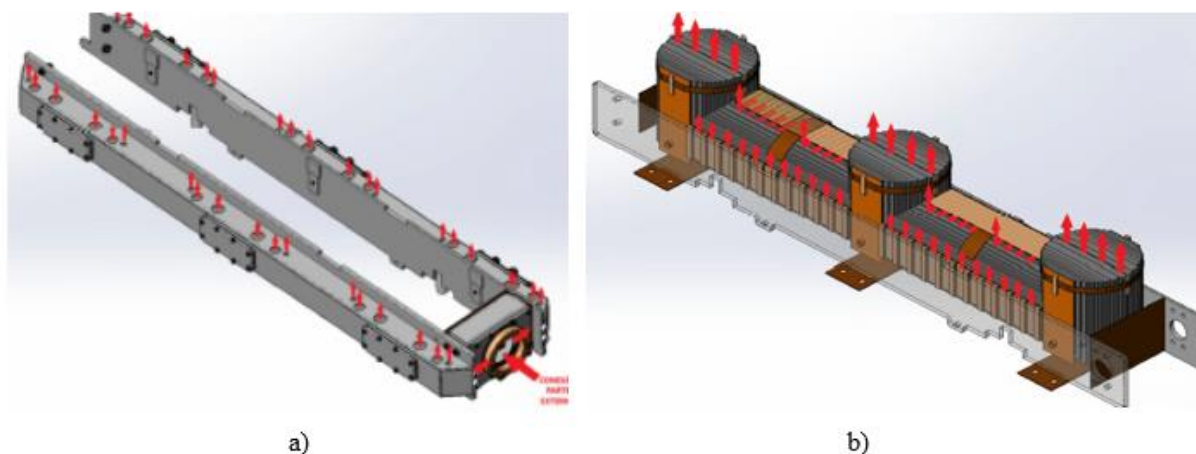
Figura 2.4 - Desenhos esquemáticos de transformadores: (a) núcleo envolvido ; (b) núcleo envolvente.



Fonte: Fitzgerald *et al* (2014, p.22)

Os transformadores com arrefecimento ODAF são do tipo núcleo envolvido, com uma estrutura de prensagem constituída de canais verticais para escoamento de fluido de arrefecimento, internos ao núcleo, de modo a resfriá-lo ao longo das três colunas do transformador trifásico. A Figura 2.5a ilustra um modelo para os dutos de escoamento de óleo na armadura do núcleo, enquanto a Figura 2.5b detalha os canais verticais para passagem de óleo internamente ao núcleo.

Figura 2.5 - Estrutura dos canais para escoamento em transformadores do tipo ODAF: a) vista dos dutos de óleo na armadura do núcleo; b) canais de óleo no núcleo.



Fonte: Catálogo Fabricante WEG (2020), adaptado.

Os canais na estrutura do núcleo são conectados ao meio externo por dutos e que, utilizando bombas centrífugas, levam o óleo até os trocadores de calor. No caso dos

transformadores ODAF, o ar ambiente escoar também de forma forçada para intensificar a troca de calor, com o uso de dois conjuntos de motoventiladores acoplados aos trocadores de calor. A Figura 2.6 destaca a entrada no núcleo para conexão dos tubos de ligação com o trocador de calor.

Figura 2.6 - Entrada de tubulação para conexão com o núcleo.



Fonte: autoria própria.

Normalmente, as perdas do núcleo têm parcelas bem menos significativas em relação às perdas totais do transformador, visto que a maior parte delas se referem àquelas por efeito Joule, devido às correntes circulantes nos enrolamentos. O núcleo apresenta temperaturas relativamente mais baixas do que outras partes, como o enrolamento de Baixa Tensão (BT) ou o enrolamento de Alta Tensão (AT), e por isso os limites de elevação de temperatura geralmente não são especificados para sua estrutura. No entanto, na norma ABNT NBR 5356-2 (ABNT, 2007) ressalta que o aumento da temperatura do núcleo não deve ser elevado a ponto de comprometer outros materiais internos ao transformador.

### 2.3.3. Enrolamentos

Basicamente um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo magnético alternado cuja amplitude dependerá da tensão aplicada, da frequência dessa tensão e do número de espiras nesse enrolamento. (Fitzgerald *et al*, 2014). Esse fluxo magnético induzirá no enrolamento secundário uma tensão proporcional ao número de espiras desse enrolamento. A Equação 2.1 estabelece a relação obtida, para um transformador ideal, entre os níveis de tensão e o número de espiras (Sen, 1997).

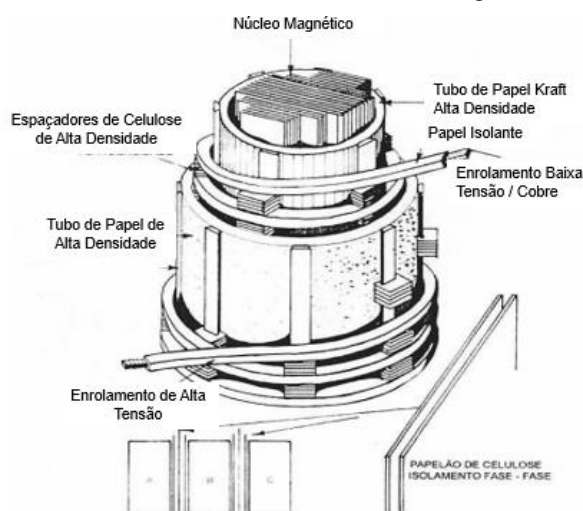
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.1)$$

em que,  $V_p$  é a tensão do enrolamento primário,  $V_s$  é a tensão do enrolamento secundário,  $N_p$  o número de espiras do enrolamento primário, e  $N_s$  o número de espiras do enrolamento secundário.

Uma estrutura de enrolamento mais comumente empregada em transformadores de altas potências é o enrolamento do tipo disco, que consiste em voltas (espiras) de cobre enroladas em volta do núcleo. Cada grupo de espiras, enroladas em uma série de cilindros, forma um disco, que sobrepostos envolvem toda a coluna do núcleo. Os discos por sua vez são separados por dutos de arrefecimento axiais e radiais.

O isolamento sólido nos enrolamentos é constituído, basicamente, por papel isolante, na forma de lâminas, aplicadas em finas camadas, ou prensado, na forma de espaçadores para estruturação dos discos, ou de tubos de alta densidade para acomodação das conexões entre fases. Em modelos de grandes transformadores, em que se requer resistência a altas temperaturas, emprega-se o papel termoestabilizado e papel Nomex® (poliamida), permitindo um isolamento compatível com as correntes elétricas aplicadas e as elevações de temperatura (D'almeida *et al*, 1994). A Figura 2.7 apresenta uso de papel em diferentes estruturas do enrolamento com o detalhamento de sua sobreposição no núcleo.

Figura 2.7 - Detalhe enrolamento elétrico sobre o núcleo magnético laminado.

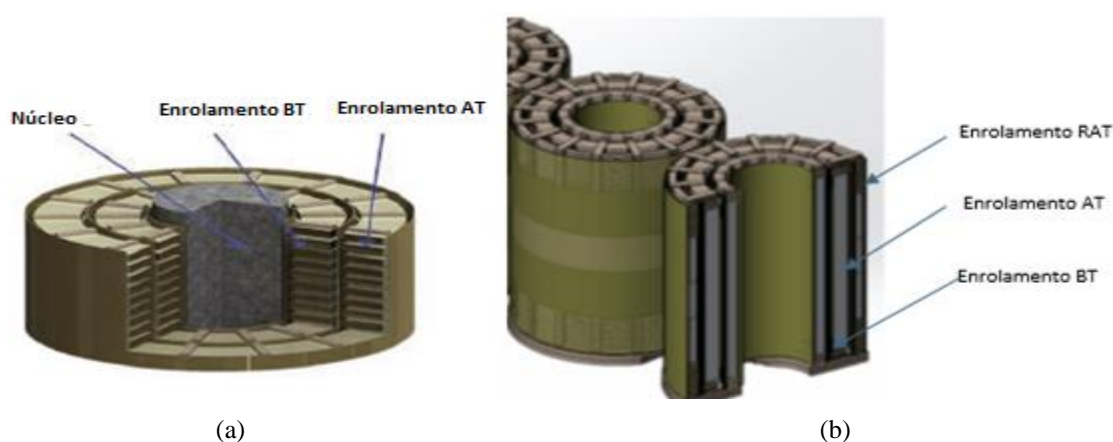


Fonte: D'almeida *et al* (1994, p.2), adaptado.

Os discos são separados por espaçadores em papel prensado para promover a formação dos canais para passagem do óleo, chamados de dutos de arrefecimento horizontais. Já os dutos

de arrefecimento verticais são projetados e colocados dentro do núcleo, no enrolamento Baixa tensão - BT e no enrolamento Alta tensão - AT (Figura 2.8a) de forma a criar uma distribuição do escoamento de óleo ao longo das colunas da parte ativa. Alguns transformadores, como o modelo aqui estudado (TM1), podem inclusive apresentar uma bobina adicional de Regulação Alta Tensão – RA, que é sobreposta à bobina de AT, para se obter diferentes derivações de tensão, como observado na Figura 2.8b.

Figura 2.8 - Estrutura de enrolamentos: (a) enrolamento sem RAT, ilustrando os canais horizontais e verticais; (b) enrolamento com RAT.



Fonte: Yaqoob (2013, p.02), adaptado.

As relações para os diversos níveis de tensão de operação podem ser obtidas por meio de derivações, a partir de um determinado número de espiras, e que podem ser alternadas com o uso dos chamados comutadores sem tensão. O acompanhamento da integridade dos isolantes que compõe os enrolamentos (principalmente tintas, vernizes, papel e o próprio óleo) é feito por meio de ensaios químicos sobre amostras de óleo, retiradas através de válvulas conectadas ao tanque principal.

#### 2.3.4. Tanques Principal e de Expansão do Óleo

O tanque principal comporta as bobinas e o núcleo mantendo a parte ativa imersa no óleo isolante. Suas paredes laterais podem conter internamente blindagens em aço, no intuito de minimizar o aumento da temperatura do aço por conta da circulação de correntes parasitas, resultantes do fluxo de dispersão gerado na parte ativa (Zanini, 2016).

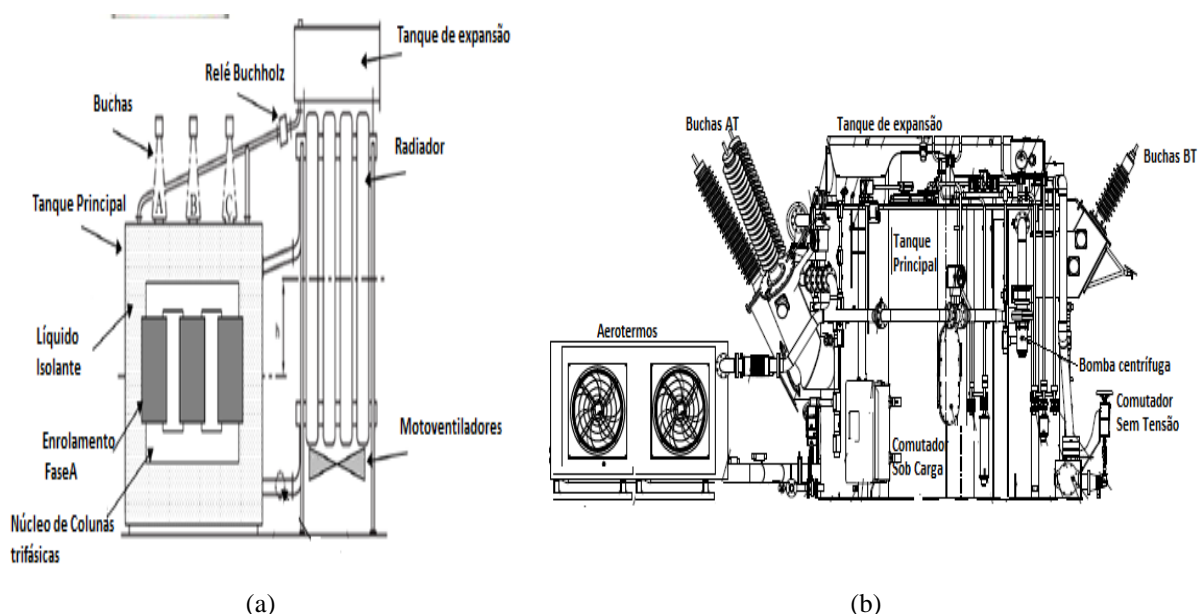
Já o tanque de expansão permite a acomodação da variação do volume do óleo em função das alterações de temperatura às quais o equipamento é submetido. Estes tanques, em praticamente todos os projetos mais recentes, são providos de uma membrana de borracha

(comumente chamada de “bolsa”) responsável pela selagem do transformador, de modo que não ocorra o contato do óleo com o ar durante a expansão do volume de óleo no tanque de expansão.

### 2.3.5. Trocadores de Calor

Os transformadores dispõem de trocadores de calor que promovem o arrefecimento do óleo com o objetivo de limitar a exposição dos materiais isolantes à altas temperatura, mantendo os níveis adequados às suas classes térmicas. As diferentes aplicações e potências dos transformadores requerem que diferentes projetos de trocadores de calor sejam empregados. A exemplo disso, a Figura 2.9a mostra um quadro geral de componentes típicos de transformadores de potência fixo e na Figura 2.9b de um transformador de potência móvel. Nesta se pode observar características distintas de montagem, particularmente na disposição das buchas, usadas para conexões fonte-carga, e dos tipos de trocadores de calor, sendo que o primeiro utiliza radiadores em sistema ONAN ou ONAF de aletas cilíndricas ou elípticas, enquanto o segundo, utiliza aerotermos em sistema OFAF ou ODAF, montados na vertical ou horizontal, por onde o óleo de arrefecimento (fase quente) é resfriado pelo ar ambiente (fase fria), ambos circulando de forma forçada.

Figura 2.9 - Estrutura típica: (a) transformador fixo; (b) transformador móvel.



Fonte: (a) Daghrah (2017, p. 17); (b) WEG – Manual do Fabricante (2014, p.26), adaptado

Em ambos os tipos de montagem, as soluções de atendimento à grandes centros de carga e com limitação de espaço para tanques e radiadores, requerem uma compactação das suas

estruturas associada a garantia operacional dos materiais empregados nos enrolamentos. Os sistemas com circulação forçada de óleo proporcionam essas vantagens para o emprego em unidades móveis. Particularmente, nos projetos com sistemas de arrefecimento ODAF é fundamental que se tenha um controle rigoroso da velocidade do óleo dentro dos enrolamentos, devendo ser observadas as seguintes premissas:

- Vazão da bomba adequada ao volume de óleo e perda de carga;
- Quantidade de passagens de entrada de óleo adequadas para cada bobina;
- Direcionadores de escoamento de óleo ao longo da bobina em quantidade e posicionamento adequados, dirigindo o escoamento do óleo do início ao topo do enrolamento.

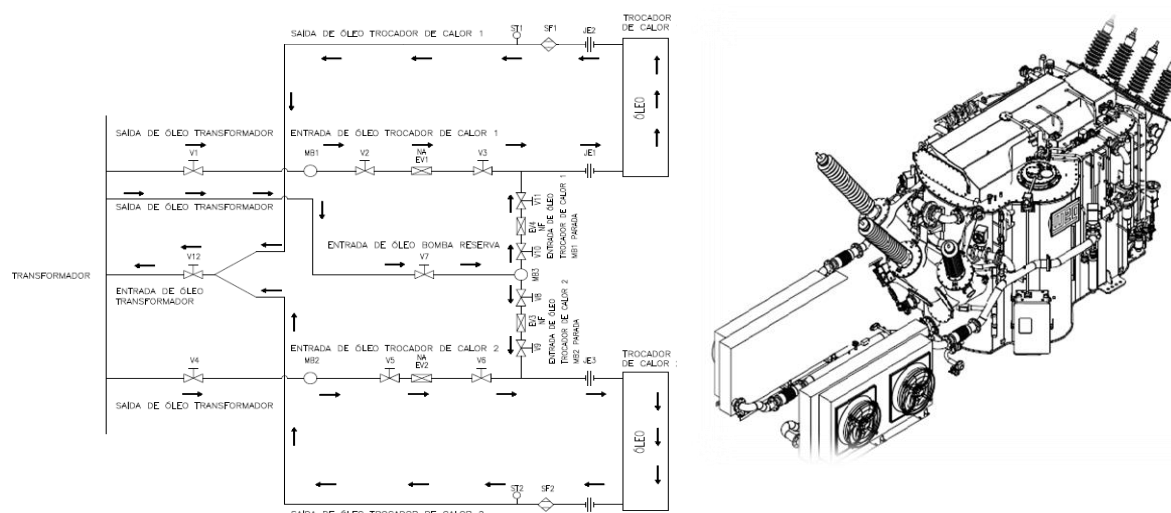
Além disso, a montagem das barreiras direcionadoras (guias) de óleo, cilindros e espaçadores, internos ao enrolamento, devem ser realizadas com a máxima precisão, de tal forma que garantam um escoamento de óleo dirigido e controlado na parte ativa.

#### **2.4. Características do Arrefecimento do Transformador Móvel**

Os transformadores móveis, dadas às suas limitações de peso e de dimensões requeridas para sua mobilidade, geralmente são desenvolvidos em sistema de arrefecimento OFAF ou ODAF, como mencionado anteriormente. Este último tem a circulação forçada de óleo direcionando o fluxo através de caminhos predeterminados ao longo do enrolamento do transformador. O óleo frio que entra no tanque do transformador é resfriado por meio dos aerotermos. O sistema de arrefecimento do transformador TM1 é do tipo ODAF, composto por 3 bombas centrifugas (sendo uma reserva), 2 trocadores de calor, como mostrado no exemplo da Figura 2.10 sendo que cada trocador possui 2 ventiladores.

Por concepção, o trocador de calor deve dissipar a quantidade de calor gerada pelas perdas totais do transformador (perdas no ferro e perdas no cobre). Um dos requisitos especificados para os transformadores de grandes potências é que o sistema de arrefecimento deve ser projetado de modo a permitir que a operação em regime contínuo atinja um carregamento mínimo de 70% da potência nominal, em qualquer relação de transformação, com somente metade do sistema de arrefecimento em serviço, sem que sejam excedidos os valores limites de elevação de temperatura especificados (CELG, 2017).

Figura 2.10 - Esquemas hidráulicos de trocadores de calor para ODAF.



Fonte: WEG – Manual de Instruções (2014, p.21).

O equipamento estudado pode operar atendendo essa premissa, fornecendo, em regime contínuo com carga nominal (até 25 MVA) com pleno funcionamento dos dois aerotermos e duas bombas; ou ainda fornecendo 17,5 MVA com apenas um trocador de calor e uma bomba em funcionamento. A Tabela 2.1 traz os dados característicos do sistema de bombeamento hidráulico para o óleo direcional.

Tabela 2.1 - Características do sistema de bombeamento hidráulico para o óleo direcional.

Características Nominais	Valores	Unidade
Potência	2,94	kW
Tensão de Alimentação(60Hz)	220	Volts
Rotação	1750	rpm
Vazão Volumétrica	300	l/min
Capacidade Máx. de Dissipação	3499	W/K
Velocidade Axial Max.	0,358	m/s
Velocidade Radial Max.	0,026	m/s
Velocidade de Entrada	0,403	m/s
Velocidade Max. de Entrada	0,700	m/s

Fonte: elaborado pela autora – extraído de Cemig (2012b).



Os motoventiladores, para circulação do ar forçado, também operam em 220/380Volts trifásicos, 60 Hertz, 2,2kW, 930 rpm, com uma vazão de ar de 31.960 kg/h. Cada aerotermo é constituído de dois motoventiladores, com uma área de troca de 288,2 m<sup>2</sup>.

## 2.5. Limites de Elevação de Temperatura do Transformador

Os carregamentos de transformadores são os fatores de maior influência sobre o comportamento térmico dos seus enrolamentos e do óleo. Os ciclos de carga, com duração de 24 horas cada, podem ser classificados pela duração do carregamento: em condição normal de operação contínua; em condição de emergência de longa duração e; em condição de emergência de curta duração. A classificação de longa e curta duração deve ser especificada pelo fabricante após a realização dos ensaios de elevação de temperatura.

O ciclo de carregamento em condição normal de operação é aquele no qual em nenhum momento pode ser excedida a temperatura do topo do óleo ou a do ponto mais quente – *HST* (do inglês, *Hot Spot*) do enrolamento, mesmo que, em parte do ciclo, seja ultrapassada a potência nominal. Enquanto no ciclo de carregamento em condição de emergência de longa duração pode-se permitir que sejam ultrapassados os limites de temperatura do ciclo de carregamento em condição normal, uma vez que são consideradas saídas prolongadas de outras unidades transformadoras por desligamento de algum elemento do sistema (ABNT NBR 5356-2, 2007). Os transformadores fixos, diferentemente dos transformadores móveis, podem ser submetidos a ciclos de carregamento maiores em condição de emergência de curta duração, ainda que isso implique em condições de maior risco, por isso, usados em raras ocasiões. O tempo de operação nessa condição deve ser menor do que a constante de tempo térmica do transformador e depende da temperatura em operação antes da contingência, não devendo ser superior a 30 minutos (ONS, 2016). Porém não há, por parte dos diferentes fabricantes, recomendações de uso do transformador móvel em ciclo de carregamento emergencial.

Tantos para transformadores fixos quanto móveis, as elevações de temperatura dos enrolamentos, do óleo e partes metálicas, em condições normais, não devem exceder os limites especificados na Tabela 2.2 - Limites de elevação de temperatura (ABNT NBR 5356-2, 2007), que traz as relações a serem observadas pelos fabricantes quanto ao meio de resfriamento, se natural ou forçado, com ou sem direcionamento do óleo nos enrolamentos. Também estão estabelecidos os limites para elevação de temperatura no topo do óleo.

Tabela 2.2 - Limites de elevação de temperatura.

Sistema de preservação do óleo	Dos enrolamentos			
	Média, por medição da variação de resistência		Do ponto mais quente	Do topo do óleo
	Circulação do óleo natural ou forçada sem escoamento de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido		
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão	55	60	65	50 <sup>b</sup>
	95 <sup>g</sup>	100 <sup>g</sup>	120 <sup>g</sup>	60 <sup>g</sup>
Com conservador ou com gás inerte sob pressão	55	60	65	55 <sup>c</sup>
	65 <sup>d</sup>	70 <sup>d</sup>	80 <sup>d</sup>	65 <sup>d</sup>
	95 <sup>g</sup>	100 <sup>g</sup>	120 <sup>g</sup>	65 <sup>g</sup>

- a) Os materiais isolantes devem ser adequados, de acordo com ABNT NBR 7034, ao limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado;
- b) Medida próxima à superfície do óleo;
- c) Medida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte;
- d) Para esse limite de temperatura, quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado;
- e) A verificação de temperatura do ponto mais quente é feita mediante acordo entre fabricante e comprador.)
- f) O método de verificação do escoamento de óleo forçado dirigido constitui objeto de acordo entre fabricante e comprador.
- g) Estes limites de elevação de temperatura são aplicáveis desde que acordado entre fabricante e comprador. Neste caso, deve ser usado o sistema híbrido de isolamento composto por isolantes à base de aramida ou similares (Classe C), apenas onde necessário (adjacentes aos condutores dos enrolamentos), e isolantes sólidos à base de celulose onde a temperatura máxima não ultrapasse os 120°C, imersos em óleo mineral isolante, com base na IEEE STD 1276:1997.

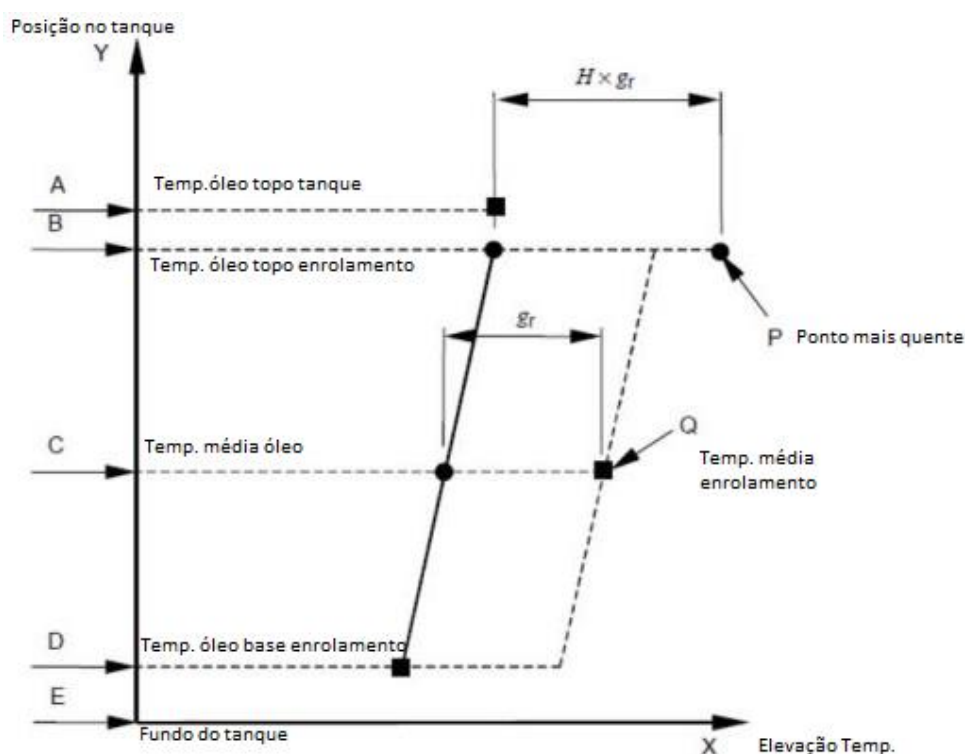
Fonte: ABNT NBR 5356-7 (2017, p.07).

### 2.5.1. Ensaio de Elevação de Temperatura

O ensaio de elevação de temperatura é o teste que avalia o desempenho térmico de um transformador e é realizado pelos fabricantes, segundo procedimentos padronizados, com o intuito de comprovar sua capacidade operativa de longa duração (em carregamento nominal) e de curta duração (condições de emergência). Os resultados do ensaio fornecem subsídios suficientes para a determinação do perfil de temperatura e do valor de temperatura do ponto mais quente no enrolamento durante a sobrecarga, numa determinada temperatura média ambiente.

O óleo que entra na parte inferior dos enrolamentos circula através dos enrolamentos de modo que sua temperatura se eleva segundo uma correlação linear com a altura da coluna do enrolamento. As perdas dos enrolamentos são transferidas em toda sua extensão para o óleo até atingir o “topo”. Esta transferência de calor entre enrolamento e óleo é assumida como constante ao longo da altura do enrolamento. Na Figura 2.11 a temperatura do enrolamento e temperatura do óleo aparecem como duas linhas paralelas. A temperatura máxima que pode ocorrer em qualquer parte da isolação do enrolamento é então chamada de “temperatura do ponto mais quente”, medida que representa a limitação térmica para o carregamento do transformador.

Figura 2.11 - Diagrama de temperaturas do enrolamento e do óleo - Grandezas monitoradas e calculadas.



Fonte: ABNT NBR 5356-7 (2017, p.17), adaptado.

A ABNT NBR 5356-2 (2007), especifica os procedimentos na medição das temperaturas necessários para construir o diagrama da Figura 2.11. Ele representa as relações entre diferentes aumentos de temperatura obtidos no ensaio, em que o eixo y representa a posição relativa no tanque (altura da parte ativa) e o eixo x representa a temperatura. Para o cálculo, são utilizadas as seguintes Equações 2.2 e 2.3:

$$T_{to} = A + T_{amb} \quad (2.2)$$

$$P = T_{amb} \cdot A + g_r \cdot H \quad (2.3)$$

em que os pontos no gráfico estão representados pelas seguintes grandezas:  $A$  é a elevação de temperatura do topo do óleo conforme ABNT NBR 5356-2 (2007) (critério de aceitação);  $B$  é a elevação de temperatura do óleo no tanque na parte superior do enrolamento (muitas vezes assumida como a mesma temperatura  $A$  - estimado igual a  $A$ );  $C$  é a elevação de temperatura média do óleo no tanque;  $D$  é a elevação de temperatura do óleo parte inferior do enrolamento. (estimado igual a  $E$ );  $E$  é a Fundo do tanque;  $g_r$  a diferença de temperatura entre a média do enrolamento e temperatura média do óleo (no tanque) na corrente nominal;  $H$  é o fator do ponto mais quente;  $P$  é a temperatura do ponto mais quente (critério de aceitação);  $Q$  é a temperatura média do enrolamento determinado pela medição da resistência. (critério de aceitação);  $X$  é a temperatura no eixo cartesiano;  $Y$  é a posição relativa no eixo cartesiano;  $T_{amb}$  é a temperatura média ambiente durante as medições. Já os símbolos no diagrama representam:

- Ponto medido;
- Ponto calculado.

No procedimento proposto pela ABNT NBR 5356-2 (2007) (ver Figura 2.11), duas linhas paralelas são traçadas. A primeira linha da esquerda, é a elevação da temperatura do óleo, de baixo para cima do enrolamento do transformador. A segunda linha, a da direita, é a elevação da temperatura do enrolamento, de baixo para cima. O diagrama térmico assume um aumento linear das temperaturas da parte inferior do transformador até a parte superior do transformador. São consideradas condições de referência para temperatura ambiente as seguintes premissas:

- Temperatura média da região, majorada pela elevação de temperatura local devido ao meio ambiente da subestação;
- Temperatura máximas devem ser consideradas a temperatura média máxima da região majorada pela elevação da temperatura local, sendo mínimo de 30°C e a máxima de 40°C.

Por fim, o teste de elevação de temperatura deve certificar que todos os limites de aumento de temperatura especificados pelos padrões sejam atendidos ao carregar o transformador nas condições nominais.

No ensaio, as temperaturas do topo do óleo, do ponto mais quente do enrolamento e de outras partes metálicas, sem contato com celulose, em cargas nominais, devem ser inferiores aos valores estabelecidos na Tabela 2.3 (ABNT, 2017).

Tabela 2.3 - Temperatura limite (°C) – para temperatura ambiente de 40°C ou superior

Tipo de Carregamento	Temperatura limite (°C)		
	Topo do Óleo	Ponto mais quente do enrolamento: P	Outras partes metálicas sem contato com celulose
Ensaio de 1,2 pu <sup>4</sup> por 4 horas	110	130	160
Ensaio de 1,4 pu meia hora	110	140	180

Fonte: ABNT NBR 5356-7 (2017, p.62).

### 2.5.2. Fator de Ponto Mais Quente

O fator de ponto mais quente  $H$  (em inglês *hot spot factor*) é um componente fundamental no diagrama térmico para se prever a temperatura deste ponto a partir dos dados de projeto. (ABNT, 2007). Ele pode ser interpretado como a soma de dois componentes separáveis, um relacionado à convecção no domínio do fluido e o outro relacionado à condução no domínio sólido. Sob outra abordagem, a ABNT NBR 5356-2 (ABNT, 2007) traz Equação 2.4, que introduz o fator de ponto mais quente numa relação de linearidade entre o as elevações de temperatura fluido e dos enrolamentos:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_o + g_r \cdot H \quad (2.4)$$

em que  $\Delta\theta_h$  é a elevação de temperatura obtida pela diferença entre as temperaturas do ponto mais quente e do topo do óleo sob condição de carga nominal;  $\Delta\theta_o$  é a elevação de temperatura do topo do óleo na carga considerada;  $g_r$  é a diferença entre a temperatura média dos enrolamentos e temperatura média do óleo (no tanque) na corrente nominal, enquanto o  $H$  é o próprio fator de ponto mais quente.

Durante os ensaios de elevação de temperatura, a partir da construção do diagrama térmico do projeto, o  $H$  pode ser estimado baseando-se nas elevações de temperaturas caracterizadas experimentalmente. As medições se seguem fundamentalmente nas seguintes etapas:

1. As perdas totais são injetadas no transformador submetendo-o a uma corrente que é ligeiramente superior à corrente nominal para acomodar as perdas de carga e as perdas de magnetização na tensão nominal. Uma vez que atinge um estado estacionário com variação igual ou inferior a 1 K/hora; então, a segunda etapa deve ser iniciada imediatamente;

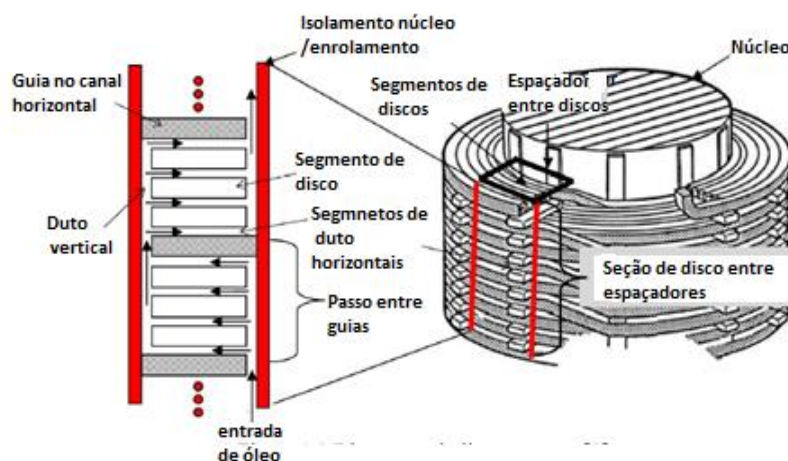
<sup>4</sup> Adimensional por unidade, MVA (para potência) ou kA(para corrente).

2. A corrente injetada é reduzida do valor usado na etapa 1 para o valor nominal por 1 hora de medição. Após 1 hora, a resistência do enrolamento deve ser medida como na etapa 3;
3. A resistência do enrolamento deve ser medida para inferir ou por rápida desconexão do enrolamento e, em seguida, medindo sua resistência ou usando o princípio de superposição, em que uma pequena tensão CC e uma pequena corrente CC são aplicadas no enrolamento e então usadas para medir a resistência do enrolamento nas condições nominais.
4. O  $H$  pode ser estimado por aumentos de temperatura medidos a partir do teste de elevação de temperatura.

Particularmente, para os sistemas ODAF, o procedimento de cálculo do  $H$  deve ainda observar as seguintes premissas:

- a) A transferência de calor, a velocidade do óleo e a temperatura do fluido resultante devem ser modeladas para cada canal de refrigeração;
- b) Devem ser consideradas as perdas por corrente de *Foucault* devido ao fluxo magnético radial nas extremidades dos enrolamentos, onde o fluxo de dispersão intercepta a maior dimensão dos condutores, causando aquecimentos locais pela circulação dessas correntes.
- c) Podem existir efeitos de transferência por condução dentro do enrolamento em função de diferentes espessuras dos isolantes sólidos em todo o enrolamento;
- d) Podem existir restrições locais ao escoamento do fluido, dadas as particularidades do projeto, como por exemplo com o uso de direcionadores em *zig-zag*, como na Figura 2.12:

Figura 2.12 - Estrutura enrolamento tipo disco.



e) De forma natural, o óleo tende a subir quando esquenta. Particularmente no sistema ODAF, os dutos verticais fornecem um caminho de circulação forçada para esse óleo quente. Isso faz com que o escoamento de óleo através dos canais horizontais seja muito menor do que nos canais verticais e, portanto, uma transferência de calor entre os condutores e o óleo nos canais horizontais pode ser deficitária. Esta é a razão pela qual direcionar o óleo através do enrolamento usando anéis de compressão e guias entre os discos é tão importante para se obter transferências de calor efetivas também entre os discos.

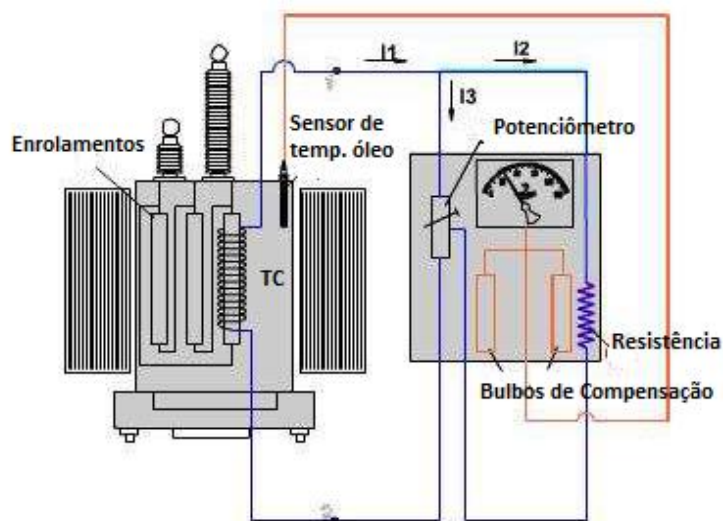
Como fator de ponto mais quente  $H$  é obtido a partir do conhecimento da distribuição das perdas elétricas (perdas no ferro e perdas no cobre) dentro do transformador, ele depende naturalmente da eficiência e do tipo de arrefecimento da estrutura do enrolamento. Para enrolamentos do tipo disco sem guias de desvio de escoamento de óleo o fator pode ser considerado 1,0. Porém, para enrolamentos do tipo disco com guias, o fator pode variar de 1,0 a 1,2 (Azis, 2014). Para transformadores de distribuição “padrão” com impedância de curto-circuito  $< 8\%$ , o valor de 1,1 pode ser considerado suficientemente preciso para considerações de carregamento. A ABNT NBR 5356-2 (2007), presume um  $H = 1,1$  para transformadores de distribuição e  $H = 1,3$  para transformadores de média potência e de grande porte.

### 2.5.3. Método de Medição de Temperatura

Um dos mais difundidos métodos de medição das temperaturas do óleo e do enrolamento dos transformadores é o de imagem térmica. Essa denominação é designada por se tratar de uma técnica que reproduz indiretamente a temperatura do enrolamento, que é a parte que tende a ser mais quente do transformador. Neste método, considera-se que a temperatura do enrolamento é a temperatura do óleo acrescida da sobre-elevação da temperatura do enrolamento em relação ao óleo.

A temperatura do óleo é obtida por um sensor do tipo bulbo capilar, cuja dilatação do líquido no seu interior faz com que o indicador de temperatura se movimente de acordo com a elevação de temperatura percebida. Enquanto a temperatura do enrolamento é obtida por simulação física do processo de aquecimento do enrolamento. Uma resistência elétrica aquece os bulbos de compensação, por onde circula uma corrente elétrica  $I_2$  proporcional à corrente elétrica  $I_1$  que circula no transformador de corrente – TC – instalado na bucha do transformador. Esse aquecimento faz com que o líquido do interior do bulbo se dilate e de maneira a compensar a diferença de temperatura entre o topo do óleo e a do enrolamento, como no esquema apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Esquema de medição por imagem térmica.



Fonte: Catálogo RECORDSA (2004), adaptado.

Outra forma de medição da temperatura dos enrolamentos é por meio da instalação de fibras ópticas posicionadas internamente aos enrolamentos. Um dispositivo eletrônico emite um feixe de luz através da fibra óptica que se encontra em contato com o material aquecido. Como existe uma dependência entre o tempo de reflexão e a atenuação da intensidade do feixe de onda é possível se obter em que temperatura se encontra a fibra óptica instalada. No entanto, é um meio de medição que requer uma estimativa precisa do ponto mais quente e pode gerar futuros pontos de falha nos enrolamentos.

Mais recentemente os fabricantes têm adotado as medições por conversão de sinais analógicos em digitais, de tal modo que as temperatura do óleo são obtidas diretamente por sensores do tipo PT100, enquanto as temperatura do enrolamento são calculadas por algoritmos implementados em monitores digitais, a partir dos sinais das correntes circulantes nos TCs, instalados nas buchas. A metodologia de cálculo da temperatura é definida também pela ABNT NBR 5356-7 (2017, p.70). A vantagem deste método é que ele é menos invasivo para os enrolamentos, de menor custo de manutenção e boa precisão, no entanto não tem o monitoramento específico do ponto mais quente esperado no enrolamento.

#### 2.5.4. Envelhecimento Relativo e Vida Útil da Isolação

Os resultados do ensaio de elevação de temperatura fornecem subsídios suficientes para a determinação das temperaturas médias do ponto mais quente do enrolamento durante a sobrecarga, para uma determinada temperatura média ambiente. Assim, é possível calcular a perda de vida e, portanto, a expectativa de vida do transformador.



O envelhecimento ou deterioração da isolamento tem como variáveis de influência, além da temperatura, os percentuais de umidade, oxigênio e ácidos presentes no óleo. No entanto, a estimativa da vida útil estabelecida nas normas nacionais e internacionais para transformadores, tem por parâmetro de controle apenas a temperatura. Esta, naturalmente, tem distribuição não uniforme, portanto, a parte que está operando em maior temperatura sofre maior deterioração. Por isso a taxa de envelhecimento toma como referência o ponto mais quente do enrolamento *HST*, sendo então definida (IEEE, 1995) para transformadores da seguinte forma da Equação 2.5:

$$vida_{\text{útil}} = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_h+273}\right)} \quad (2.5)$$

em que  $\theta_h$  é a temperatura do ponto mais quente, expressa em (°C).

Por exemplo, um transformador que opera, continuamente a 80°C durante o período de um ano, considerando os fatores de vida útil obtidos na Tabela 2.4, estima-se uma perda de vida útil em:  $365 \times 0,036 = 13,14$  dias por ano. O que corresponderia à redução da vida útil de 35 para 33,74 anos.

Tabela 2.4 - Relação temperatura x Fator de perda vida útil

$\theta_h$	Fator de perda
80	0,036
86	0,073
92	0,145
98	0,282
104	0,536
110	1,0
116	1,83
122	3,29
128	5,8
134	10,1
140	17,2

Fonte: ABNT NBR 5356-7 (2017, p.10).

## 2.6. Limites de Velocidades e Fenômeno de Eletrificação do Óleo

O fenômeno de carregamento eletrostático é observado a partir da remoção de cargas estáticas de um corpo eletrificado em atrito com outros corpos ou partículas. A eletricidade por fricção pode produzir efeitos tanto de atração quanto de repulsão de cargas. A propensão que

<sup>5</sup>para transformador com papel termoestabilizado.

determinados materiais têm para formação de cargas eletrostáticas depende da área efetiva de contato entre os materiais, tipo de acabamento superficial (rugosidade), dureza das superfícies, temperatura e pressão. O processo de carregamento eletrostático por fricção é então denominado turbo eletrificação (Foster, 1967).

Alguns parâmetros são importantes na construção de máquinas que são submetidas a possíveis movimentações de líquidos em contato com um corpo eletrificado, como:

- Volume do material;
- Forma geométrica (eliminação de quinas);
- Resistividade volumétrica;
- Temperatura ambiente;
- Distância entre superfície carregada e os objetos aterrados.

A movimentação de fluido isolante no interior dos transformadores, em contato com materiais celulósicos e poliméricos, deve ser um fator de atenção quanto à formação de nuvens eletrostáticas (Vieira *et al*, 1989). Tais cargas podem atingir potenciais suficientemente elevados para promover descargas elétricas (ou parciais) capazes de comprometer os materiais celulósico a partir do atrito das partículas do óleo. Particularmente nos transformadores em arrefecimento ODAF, a movimentação do óleo aquecido, promovida pelo sistema de bombas e direcionamento do óleo para os dutos internos às bobinas, torna-se um fator de grande preocupação e demanda controles de vazão ao longo das bobinas a fim de se evitar esse efeito. O escoamento do óleo isolante, por tubos ou canais ao longo dos enrolamentos, promove um estreito contato do fluido com superfícies porosas como papel, madeira ou filtros, promovendo a separação de cargas estáticas e fazendo com que o líquido saia carregado desses canais. Segundo Viana (2005), a imposição de maiores velocidades na entrada de um duto, com flutuações de velocidade se propagando axialmente ao longo de um dado canal, seria capaz de transportar mais adiante pequenas estruturas turbilhonares.

Por isso o controle de um escoamento perfeitamente laminar é fundamental para se evitar formação de correntes triboelétricas. Um escoamento turbulento pode resultar em correntes proporcionais ao quadrado da velocidade. A Equação 2.6 apresenta a correlação entre o dimensionamento de sistema fluidodinâmico com a magnitude da corrente triboelétrica (Bustin e Dukek, 1983):

$$I_t = T' \cdot v^n \cdot d^m \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{L}{v \cdot \rho_e \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}\right)}\right) \quad (2.6)$$

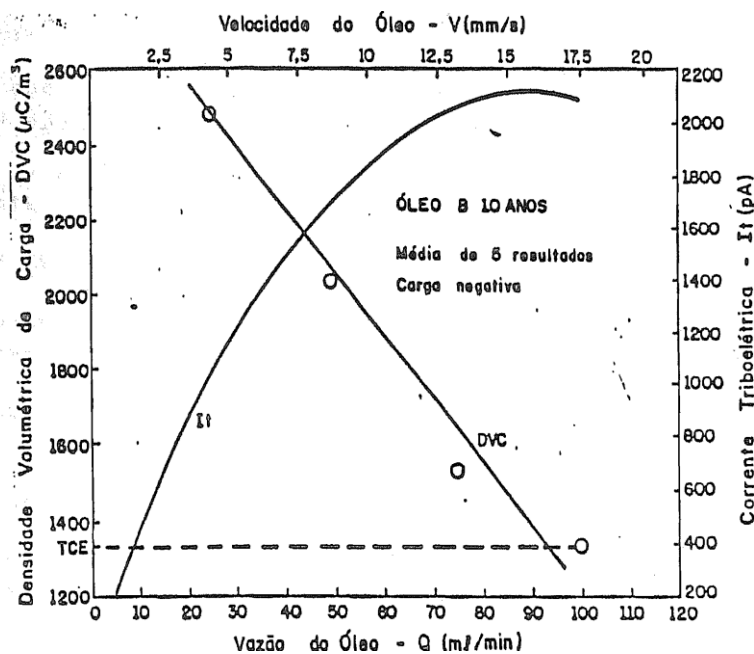
em que  $I_t$  é a corrente triboelétrica (A);  $T'$  é o coeficiente triboelétrico para o líquido/sólido;  $v$  é a velocidade do líquido (m/s);  $d$  é o diâmetro interno do tubo (m);  $n$  e  $m$  são expoentes

característicos do sistema de circulação e dos materiais;  $L$  é o comprimento do tubo (m);  $\rho_e$  é a resistividade elétrica do líquido ( $\Omega \cdot m$ );  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica do óleo e;  $\epsilon_0$  é a constante de permissividade elétrica no vácuo, igual a 8,854 pF/m.

Desse modo, a expressão estudada por Bustin e Dukek (1983) é aplicada no experimento de Shimizu *et al* (1979) e Vieira *et al* (1989) para medição de Tendência de Carregamento Eletrostático (TCE) em sistemas hidráulicos de movimentação de líquidos dielétricos. Os resultados obtidos confirmaram que os efeitos do carregamento são fortemente influenciados pelo controle de velocidade do líquido e área de contato com os sólidos no interior dos transformadores e, portanto, pode haver formação de nuvens eletrostáticas elevadas o suficiente para promover descargas eletrostáticas no meio isolante. Isso pode comprometer a integridade do isolamento entre espiras com implicações como curto-circuito dos enrolamentos para o tanque ou núcleo do transformador.

Como resultado de experimentos e consenso internacional (Sens, 2002), aplicações com óleo mineral, em transformadores tipo ODAF ou OFAF, são consideradas críticas para um TCE na ordem de 1000  $\mu C/m^3$  e devem operar com bombeamento em velocidades máximas de 1 m/s. O mesmo estudo apresenta a correlação entre a densidade volumétrica de carga ( $\mu C/m^3$ ) e a velocidade do óleo (mm/s), mostrada na Figura 2.14:

Figura 2.14 - Comportamento eletrostático para óleo tipo mineral.



Fonte: Sens (2002, p.42).

Nos experimentos conduzidos por Shimizu *et al* (1979) foi observado, por meio sondas eletrostáticas e por identificação de trilhamentos elétricos superficiais nos dielétricos

celulósicos, que o acúmulo máximo de carga eletrostática tende a concentrar-se especialmente ao redor da parte inferior do enrolamento, ou seja, na entrada do óleo em que o fluxo é mais significativo. Por outra via, a concentração de cargas na parte superior do tanque superior não demonstrou ser significativa.

No Brasil, a primeira falha atribuída ao carregamento eletrostático foi registrada em 1985 em um transformador de 200 MVA 550/230/13,8 kV de propriedade da Eletrosul. No mesmo ano, um segundo equipamento, de projeto idêntico, sofreu sinistro de mesma natureza, sendo ambas falhas atribuídas ao fenômeno de eletricidade estática pelo fabricante. (Vieira *et al*, 1989).

Entre os anos de 2018 e 2019, foram registrados, na Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig, pelo menos 3 eventos de falha em transformadores móveis de mesmo projeto térmico ODAF, todos fabricados no Brasil no ano de 2014, sendo um deles o transformador avaliado neste estudo (TM1). Uma das linhas de investigação está associada aos efeitos do carregamento eletrostático, causado por excesso de velocidade do óleo direcional na entrada dos enrolamentos. A outra possibilidade investigada é a elevação de temperatura dissociada de efeitos triboelétricos. Nos capítulos que se seguem, tais hipóteses serão melhor aprofundadas e serão consideradas nas simulações computacionais propostas.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo deste capítulo é apresentar as diferentes abordagens para a modelagem matemática dos fenômenos de transporte em um transformador, as quais são a base para a compreensão da distribuição de temperatura e da localização do ponto mais quente. A revisão concentra-se num levantamento das publicações mais relevantes sobre modelos numéricos ou experimentais que procuraram reproduzir e analisar o comportamento térmico dos transformadores com diferentes sistemas de resfriamento.

Primeiramente, apesar adotarem uma abordagem díspar da proposta nesse trabalho, faz-se importante comentar brevemente sobre alguns estudos, como o de Silva (2005), que o autor utilizou a analogia de circuitos elétricos para representar os modelos de transferência de calor e lançou mão de uma representação de circuitos concentrados dos componentes internos e do sistema de isolamento do transformador. Esses modelos oferecem uma perspectiva global do  $H$  (fator de ponto mais quente) e sua resposta no tempo usando equações exponenciais. Logo, se obtém as constantes de tempo térmicas, obtidas no ensaio de elevação de temperatura e que são afetadas conforme a geometria do enrolamento e quantidade de espiras. Essa constante significa o tempo gasto para que ocorra a liberação do calor gerado no interior do enrolamento para o óleo. Pelo método proposto, o autor divide o enrolamento do transformador em regiões distintas para a estimativa das temperaturas, gerando um cálculo de envelhecimento para cada uma destas regiões e por fim, obtém-se uma estimativa da vida remanescente dos isolamentos do transformador.

Uma outra abordagem, porém, mais amplamente empregada, é a *Network Hydraulic Thermal Modeling* (NHTM), utilizada por Oliver (1980). A NHTM baseia-se na modelagem do enrolamento do tipo disco como uma rede hidráulica que consiste em nós e caminhos. Três princípios de conservação são aplicados: massa, momento e energia. Os modelos NHTM ainda são os preferidos pela indústria, pois requerem menores custos computacionais.

Durante as últimas duas décadas diversos autores passaram a utilizar a dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), uma vez que se trata de uma ferramenta mais robusta e confiável tanto para investigar como para otimizar o desempenho térmico de enrolamentos de transformadores de potência. Na primeira década, o objetivo principal das simulações em CFD era determinar os campos de velocidade e temperatura de um enrolamento em geometria bidimensionais (2D) imerso em um óleo mineral, (Radakovic e Sorgic, 2010; Torriano *et al*, 2012). Mais recentemente, com o aprimoramento dos hardwares,

viabilizou-se o uso de modelos tridimensionais (3D), o que possibilitou estudos mais aprofundados de fenômenos físicos.

Em 2009, Ortiz *et al* realizaram a modelagem matemática e simulação em CFD usando o software AnsysFluent®v6.1 para obter a representação em 3D de um transformador tipo seco, de 167 kVA, juntamente com um método experimental para avaliar a capacidade de dissipação no circuito eletromagnético. Foi considerado apenas a transferência de calor condução para avaliar distribuição de temperatura. Foram instalados 14 termopares entre os enrolamentos de alta e de baixa tensão e um termopar foi colocado no núcleo magnético. Os resultados das simulações foram significativos tanto para a distribuições de temperatura no campo magnético do núcleo quanto nos enrolamentos, demonstrando que estavam de acordo com os valores medidos. Ao final os autores sugerem trabalhos futuros incluindo os efeitos da transferência de calor por radiação e um aperfeiçoamento da geometria proposta.

Torriano *et al* (2010) desenvolveram, por meio do uso de um pacote comercial em CFD, um estudo numérico de parâmetros que afetam a distribuição de temperatura de um enrolamento de transformador tipo disco. Eles analisaram a convergência da simulação numérica, considerando as influências das condições de entrada de fluido nos enrolamentos. O estudo identificou que a temperatura especificada para a entrada do enrolamento é um parâmetro que exerce importante influência sobre a previsão de temperatura no ponto mais quente. Os autores verificaram que resultados obtidos com modelos simplificados não capturavam todos os efeitos do escoamento e transferência de calor no enrolamento, como aqueles causados pelo papel isolante, por exemplo, usado sobre algumas estruturas dos enrolamentos. Além disso o trabalho confirmou que uma maior taxa de escoamento promoveria um arrefecimento mais adequado e o fator de ponto mais quente  $H$  poderia ser reduzido.

Fonte *et al* (2011) também realizam simulações em CFD para analisar o perfil de escoamento e remoção de calor num enrolamento tipo de disco de um transformador de potência. O desenvolvimento em CFD forneceu a distribuição de temperatura e de fluxo de massa detalhados ao longo dos enrolamentos, bem como a localização e magnitude dos pontos críticos. Para o modelo de eixo simétrico 2D, os autores concluíram que os efeitos indiretos dos espaçadores necessariamente devem ser levados em consideração nas simulações hidrodinâmicas e térmicas. Enquanto no modelo 3D obteve-se melhores estimativas em relação a valores experimentais, usados como referência. Os desvios em relação a essas referências foram atribuídos a incertezas do experimento em si, como as medições das temperaturas na entrada e saída, ou ainda diferenças reais nos parâmetros geométricos, que não se configuram na simulação CFD. Os autores concluíram que, para o caso estudado, a simulação em CFD

apresentava a vantagem de se impor geometrias e grandezas multifísicas mais próximas dos reais do que estudos experimentais em escala reduzida.

Rosillo *et al* (2012) propuseram uma análise do comportamento térmico de um transformador de 15 KVA, com o objetivo de se fazer uma localização do ponto mais quente, estudar a vida útil do equipamento, além de propor melhorias de projeto e de desempenho. Primeiramente foi desenvolvido um modelo matemático, concebido como um sistema tridimensional, considerando todos os modos de transferência de calor, incluindo radiação. Em seguida obtiveram os perfis de velocidade e distribuição de temperatura no óleo e no enrolamento. Posteriormente os resultados foram validados experimentalmente, com base nas diretrizes do guia IEEE – 1995 *Loading Guide*, que é um guia que prescreve os limites térmicos de operação e as condições que devem ser observadas para o carregamento elétrico do transformador imerso em óleo isolante. Na análise experimental, utilizaram doze termopares tipo J distribuídos no núcleo, nos enrolamentos e no tanque de óleo, mantiveram um carregamento constante por 12 h continuamente. Os dados experimentais foram validados, com um desvio de 3% para a temperatura no corpo sólido (isolante sólido) e 7,6% no óleo isolante, ambos em relação aos resultados numéricos. Ao final, os autores fazem algumas ponderações sobre a melhorias de design para novos projetos de transformadores abaixo de 75 kVA com vistas à melhoria das trocas térmicas observadas.

Tsili *et al* (2012) desenvolveram um modelo tridimensional de um transformador imerso em óleo isolante pelo método dos elementos finitos com o objetivo de estudar a distribuição de temperatura e do escoamento de óleo isolante sob diferentes condições de cargas. O método foi capaz de prever a distribuição térmica de um transformador do tipo ONAN.

Do mesmo modo, Campos *et al* (2012) desenvolveram um modelo para distribuição térmica de um transformador baseado no método dos volumes finitos implementado no pacote comercial Ansys CFX®. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais de outros autores (HARITHA *et al*, 2009) obtiveram boa concordância na temperatura interna dentro do duto de óleo.

Campelo *et al* (2013), aplicam em seus trabalhos as técnicas de CFD e de NHTM para uma revisão dos mecanismos de arrefecimento de transformadores tipo núcleo envolvido (*Core Type*) enfatizando quatro características fundamentais: a simplificação do domínio de cálculo, os padrões de escoamento típicos em enrolamentos do tipo disco, a influência dos guias de escoamento e gradientes de temperatura mais significativos. Os resultados obtidos por meio das duas técnicas foram comparados entre si e, por conseguinte, comparados com dados de medição direta, com o uso de sensores óticos e por termorresistência, instalados num transformador

usado como estudo de caso. As técnicas foram igualmente consideradas válidas sendo que os resultados em NHTM demonstraram boa correlação com os resultados em CFD. Ao comparar com as medições diretas, algumas dispersões puderam ser verificadas, tanto do NHTM, quanto em CFD. Os autores atribuíram essas diferenças às incertezas sistemáticas e aleatórias das medições por sensor.

Em Barroso (2014) a distribuição de temperatura de um transformador trifásico de 5 kVA, com arrefecimento a ar natural, foi simulada usando o software *COMSOL Multiphysics* num modelo tridimensional, considerando regime permanente. O autor modelou a interface com o ar circundante pelo princípio da Lei do Resfriamento de Newton, descartando a necessidade de resolver o escoamento de ar externo. O experimento lançou mão de seis pontos de medição por sensores óticos, sendo que as simulações concordaram com medições experimentais, observando uma maior diferença de 2,3°C em quatro dos seis sensores usados nas medições.

Yang *et al* (2014) fizeram simulações em CFD para analisar campos de velocidade e temperatura em um transformador de alta tensão abrigado, considerando a ventilação natural do ambiente. Os autores variaram parâmetros do projeto como a altura (em relação ao solo) e dimensões das janelas de entrada e saída de ar da área abrigada, verificando os efeitos da ventilação do ambiente sobre o arrefecimento do transformador. Os resultados demonstraram que, quando as janelas de entrada de ar são dispostas acima de 1 metro em relação ao solo, qualquer aumento das dimensões das janelas de saída de ar melhoraria a ventilação e o efeito de resfriamento. Para janelas entradas de ar com altura menor que 1 metro em relação ao solo, verificou-se pouca influência no campo de temperatura, ainda que se aumentassem as dimensões das saídas de ar.

No trabalho de Paramane *et al* (2014) são desenvolvidas simulações numéricas em CFD para estudo do desempenho térmico de um conjunto de radiadores do sistema de arrefecimento de um transformador de potência de 25 MVA em sistema ONAF. Na simulação, os autores promoveram a variação da direção do escoamento de ar e da posição dos dois ventiladores. Inicialmente com ambos os ventiladores na horizontal, depois ambos na vertical. Em seguida foram analisados dois ventiladores dispostos em contra fluxo horizontalmente e verticalmente. Verificou-se que o sopro horizontal nas duas configurações se mostrou mais eficiente, com uma taxa de transferência de calor em 7,2% melhor que o vertical, com os dois ventiladores no mesmo sentido de fluxo, e depois de 6,2% quando em contra fluxo. Os resultados foram validados experimentalmente considerando as mesmas configurações.



Campelo *et al* (2017) abordaram um escopo com diferentes cálculos em CFD e NHTM para uma geometria de enrolamento tipo disco, usando condições de contorno para arrefecimento tipo ON (óleo natural) conhecidas e típicas. Fazendo uma comparação “às cegas” dos resultados, o trabalho revelou diferenças de até 12°C para a temperatura de ponto mais quente calculada no trabalho de Picher *et al* (2010), concluindo que, sob diferentes suposições e grandezas numéricas, a precisão dos modelos em CFD e NHTM pode ser severamente afetada ou ainda que essas configurações, apesar de adotarem abordagens semelhantes, podem produzir resultados bem diferentes. O estudo reforçou a necessidade de diretrizes mais claras para a verificação e validação de resultados numéricos, bem como, uma discussão sobre as melhores práticas em simulações de CFD e NHTM em transformadores de potência.

Daghrah (2017) investigou experimentalmente os efeitos de uma ampla gama de parâmetros operacionais e geométricos no escoamento de óleo, bem como distribuições de temperatura de um transformador tipo disco. Sua configuração experimental foi baseada em modelos de enrolamento em que geometrias como altura do duto de arrefecimento radial, largura do duto de arrefecimento axial e número de discos por passagem, foram ajustadas para diferentes condições operacionais. Sob o modo de arrefecimento OD, Daghrh validou experimentalmente as equações de correlação derivadas de simulações em CFD, usando análise dimensional em condições isotérmicas. A análise dimensional, no que tange a vazão do escoamento de óleo e no coeficiente de queda de pressão, foi utilizada para simplificar o problema e determinar os parâmetros adimensionais mais influentes que afetavam a distribuição do escoamento de óleo e a queda de pressão nos enrolamentos. Foi verificado ainda que as medidas de controle adimensionais, como o número de Reynolds na entrada e a razão da altura do duto radial sobre a largura do duto axial, podem ser correlacionadas do mesmo modo que a vazão do escoamento de óleo com o coeficiente de queda de pressão, assim como em Zhang *et al* (2018). Por sua vez, no modo de arrefecimento OD não isotérmico, constatou-se que a existência de perdas elétricas não afeta a distribuição do fluxo de massa. Além disso, um aumento desproporcional da velocidade do óleo na entrada do duto poderia causar o fluxo reverso e estagnação do óleo e, portanto, a temperatura do ponto mais quente não seria necessariamente reduzida com o aumento da velocidade na entrada do duto. Neste mesmo trabalho o autor compara ainda o desempenho térmico do óleo mineral convencional e de outros líquidos alternativos, como gás-líquido e éster sintético, aplicados ao modelo de enrolamento do tipo disco, escoamento de óleo em “zig-zag”, sob modos de arrefecimento ON e OD. O óleo mineral e o gás-líquido mostraram comportamentos semelhantes em ambos os modos de resfriamento. Enquanto o éster sintético, sob condições de arrefecimento OD, se mostrou mais

resistente ao fluxo reverso do que o óleo mineral, devido à sua alta viscosidade. Essa condição levou a distribuições mais uniformes do escoamento e, portanto, menor temperatura de ponto mais quente, mas com o custo de maior perda de pressão.

Khandan *et al* (2017), também publicaram um estudo experimental acerca do comportamento térmico de um transformador com arrefecimento por OD. Nesta contribuição, modelos matemáticos 2D e 3D foram desenvolvidos para determinar a velocidade do óleo de um enrolamento seguido por uma análise da temperatura do ponto mais quente e sua posição. O modelo de enrolamento foi validado por resultados experimentais. As velocidades de escoamento de óleo foram determinadas e mostraram uma boa concordância entre os dados numéricos e experimentais. O experimento apresentou velocidade do escoamento de óleo nos canais superiores maiores do que nos canais inferiores. Conseqüentemente, o arrefecimento nos canais inferiores foi menor e, portanto, o ponto mais quente ocorreu numa área inferior de passagem entre blocos dos enrolamentos AT e BT.

Em Silva (2017), estudou-se o comportamento térmico de um Transformador de Potencial Capacitivo (TPC) utilizando o software Ansys-CFX®. Os resultados numéricos foram comparados com medições em laboratório de um modelo em escala real, utilizando termopares instalados na coluna do TPC, bem como com imagens termográficas<sup>6</sup>. O modelo desenvolvido foi utilizado para analisar o comportamento térmico relacionado com o número de falhas, e ao fim das análises, foi constatado que pequenos aumentos na temperatura externa, observados na termografia, indicam altos valores internos ao TPC, medidos pelos termopares, contribuindo para degradação dos isolantes e conseqüentemente a diminuição da vida útil do equipamento.

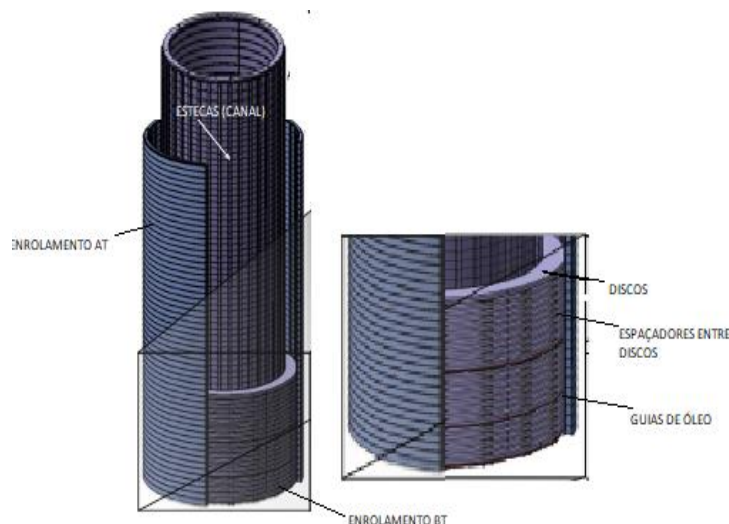
No trabalho de Torriano *et al* (2018) também foram realizadas simulações usando um pacote CFD Ansys-Fluent® para calcular taxas de fluxo de massa e distribuições de temperaturas de um enrolamento de transformador de potência do tipo ONAN. Em seguida comparou-se as simulações com as medições experimentais, usando inicialmente uma distribuição de perdas uniformes e posteriormente não uniformes ao longo dos discos. Nestes experimentos foram efetuadas medições em quatro tipos diferentes de arranjos das guias direcionadoras de óleo ao longo dos dutos formados nos enrolamentos. Os autores lançaram mão de representação tridimensional usando subdivisão espacial do domínio de interesse em um conjunto de elementos menores limitando o volume de controle e simplificando os

---

<sup>6</sup> Técnica de registro gráfico das temperaturas de diversos pontos de um corpo por detecção da radiação infravermelha por ele emitido.

elementos que não exerciam influência sobre o escoamento. Na Figura 3.1, Torriano *et al* representaram uma bobina com dois enrolamentos, Baixa Tensão (BT) e Alta tensão (AT), do mais interno para o mais externo, respectivamente.

Figura 3.1 - Modelagem Tridimensional em CFD para Enrolamentos AT e BT



Fonte: Torriano, *et al* (2018 p. 64) Adaptado

Os resultados do experimento demonstram que a redução do número de guias ao longo do enrolamento resultou numa má distribuição de escoamento de óleo nos dutos radiais. Assim, as temperaturas dos discos aumentaram e houve estagnação de escoamento de óleo em vários dutos. As simulações computacionais se mostraram mais aderentes quando foram considerados as vazões e temperaturas médias impostas como condição de contorno na entrada dos dutos. Desse modo obteve-se uma boa aderência entre os valores do modelo numérico e àqueles obtidos experimentalmente.

No trabalho de Zhang *et al* (2018) os autores realizam verificações experimentais para dar sustentação às simulações em CFD, nas quais reproduziram sistemas em arrefecimento ONAF e ODAF, de um transformador com enrolamentos tipo disco em escala reduzida. Placas com resistências de aquecimento foram usadas para reproduzir o efeito das perdas térmicas em carga. Foram feitas comparações de escoamento do fluido e distribuições de temperatura entre as medições do experimento e os resultados de simulação. No CFD, foram estabelecidas varreduras paramétricas usando relações adimensionais, a partir das razões entre as medidas da largura horizontal e largura vertical dos dutos; altura dos dutos horizontais e altura axial das placas; largura radial das placas e largura dos dutos verticais. Desse modo, formulou-se um conjunto de equações de correlações preditivas para se obter queda de pressão, distribuição de escoamento de óleo e temperatura. Enquanto no experimento dos autores, a distribuição do

escoamento de óleo e queda de pressão foram medidos usando respectivamente uma velocimetria de imagem de partículas e um sistema com instrumentos de pressão diferencial. As comparações entre os resultados medidos e as simulações demonstraram consistência nos diferentes pontos comparados, validando o método de análise adimensional e suas correlações para as grandezas medidas. Por fim, foram também realizadas comparações entre os resultados experimentais e os numéricos para condições isotérmicas e não isotérmicas. Os autores avaliaram que as conclusões obtidas sobre as condições isotérmicas poderiam ser estendidas para casos não isotérmicos, uma vez que os efeitos da força de empuxo e as dinâmicas de *hot-streaking*<sup>7</sup> provaram ser desprezíveis na faixa de temperatura considerada. Neste trabalho os modelos em 3D se mostraram mais aderentes aos valores experimentais.

Em Hamza *et al* (2019) foram obtidas estimativas desempenho térmico dinâmico de um transformador de uma turbina eólica de 6,8 MVA e foram comparados com modelos termoelétricos baseados em equações diferenciais amplamente usadas na indústria. Neste trabalho foi feito um processo de verificação com modelo numérico de Susa *et al* (2006), no qual os autores realizam uma investigação sobre a expectativa da vida útil de transformadores imersos em óleo. O modelo de Susa *et al* (2006) apoia-se nas recomendações dos guias de carga IEC Standard 60076-2 (2011) e IEEE – standard C57 (1995), que por sua vez, baseiam-se na equação da Taxa de Reação de Arrhenius. Essa taxa realiza uma estimativa da vida útil com base no histórico de carregamento e condições ambientais para determinar a degradação térmica dos materiais orgânicos e inorgânicos da parte ativa. Hamza *et al* (2019) tomaram como base os dados de carregamento do transformador no ano de 2017, obtiveram as projeções de elevações de temperatura e, por fim, a expectativa de vida útil dos materiais. Ao final, o estudo sugeriu um adiamento da expansão da rede básica (substituição do transformador por outro de maior potência), tendo em vista a expectativa de vida útil calculada para o transformador.

Em Santisteban *et al* (2019) modelos utilizando as duas técnicas, CFD e NHTM, foram comparadas para se obter vazão mássica, temperaturas médias e de ponto mais quente do enrolamento de um transformador de potência tipo disco. Foram avaliados os resultados de ambos os métodos para regimes de arrefecimento ON e OD. Os modelos também foram testados para três diferentes fluidos: óleo mineral, éster natural e éster sintético. Para os três tipos de fluidos, independentemente do arrefecimento ON ou OD, as distribuições de vazão

---

<sup>7</sup>Designação para o fenômeno em que algumas linhas de fluxo quente que saem dos dutos inferiores reentram nos dutos superiores, causando aumento da temperatura local do óleo e, conseqüentemente, aumentando as temperaturas dos sólidos adjacentes.

mássica através dos canais radiais, obtidas em NHTM e CFD, foram semelhantes. Quanto à distribuição de temperatura, os desvios entre as duas técnicas foram mais importantes, porém considerados aceitáveis na faixa de temperaturas de operação.

Em 2020, Zhang *et al* publicaram dois trabalhos sobre um estudo numéricos para um sistema de previsão de temperatura usando CFD para um transformador em ONAN. As condições operacionais impostas incluíram diferentes velocidades de entrada de fluido, temperaturas de entrada, perdas de energia em segmentos individuais de discos e o efeito de fluidos isolantes alternativos. No estudo foi demonstrado que a temperatura e a posição do ponto mais quente dentro do enrolamento são uma função não linear da velocidade de entrada do líquido. Os resultados foram apresentados primeiro em formas dimensionais, para verificar o efeito de cada parâmetro e, em seguida, em formas adimensionais para fornecer uma visão generalizada do projeto térmico do transformador. Em Daghrah *et al* (2020), desenvolve-se uma análise de forma semelhante para o sistema tipo ODAF. Foram feitas comparações de escoamento e distribuições de temperatura entre medições experimentais e os resultados de simulação de CFD. Observaram-se que os modelos bidimensionais são representativos quando não há fluxos reversos significativos (quando ele ocorre no sentido reverso, do fluido para o sólido, portanto, com sinal negativo) e que os modelos tridimensionais, por sua vez, apresentam resultados mais próximos daqueles experimentais quando ocorrem esses fluxos reversos.

## 4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSFORMADOR ODAF

O presente capítulo tem como objetivo avaliar a física do problema, bem como as características do regime de escoamento, natureza dos sólidos e do fluido de trabalho. Em seguida será detalhada a proposta do modelo matemático para estudar o escoamento e a transferência de calor ao longo de um enrolamento de um transformador de potência do tipo ODAF. Esses fenômenos são regidos pelas equações da conservação de massa, conservação da quantidade de movimento e conservação de energia. Por se tratar de um escoamento predominantemente em convecção forçada, o problema do hidrodinâmico pode ser tratado de maneira desacoplada do problema térmico, ficando apenas (se necessário) a dependência das propriedades do óleo de arrefecimento em relação à temperatura.

Assim, ao longo deste capítulo são levantadas todas as hipóteses consideradas tanto acerca das naturezas do fluido e do sólido, quanto acerca do escoamento, as quais ao serem empregadas nas equações de conservação, permitem obter suas formas simplificadas que serão implementadas numericamente.

### 4.1. Hipóteses Simplificativas e Domínio de Análise

Inicialmente, dada a natureza do escoamento, foram tomadas as seguintes hipóteses simplificativas:

- i. Regime permanente.
- ii. Escoamento incompressível;
- iii. Escoamento laminar;
- iv. A dissipação viscosa é desprezível;
- v. Despreza-se as forças de campo e a convecção natural no volume de controle.

Enquanto para a natureza do fluido e dos sólidos são considerados:

- vi. Fluido Newtoniano;
- vii. As propriedades do fluido são constantes, exceto a viscosidade e a densidade que dependem apenas da temperatura;
- viii. As propriedades do sólido são constantes.

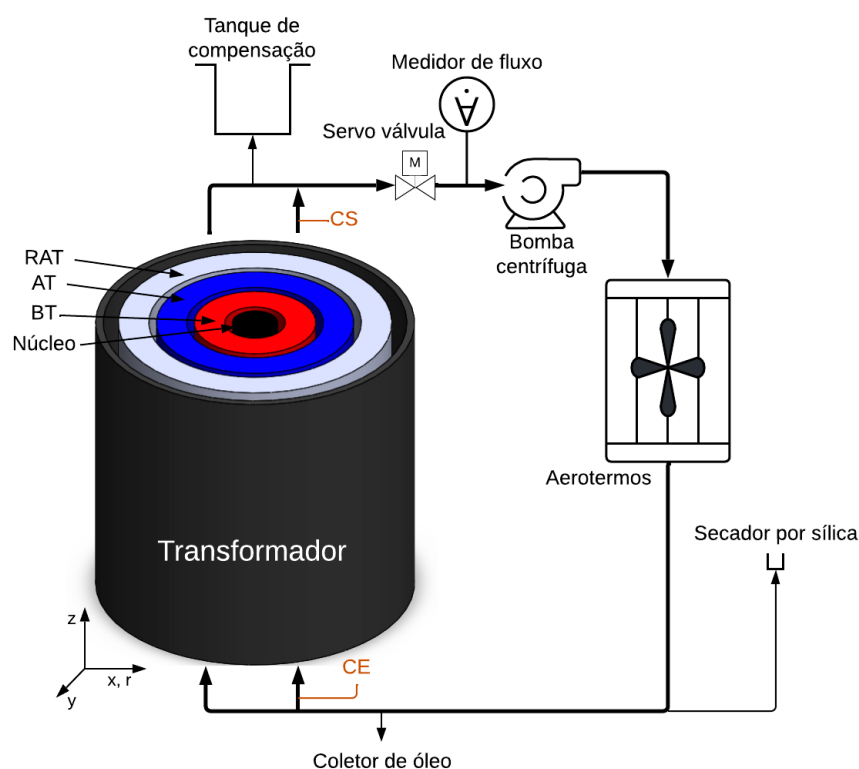
Em se tratando do domínio completo do transformador móvel do tipo ODAF, pode-se limitar a análise sobre o conjunto do núcleo com enrolamentos cilíndricos coaxiais e seu sistema de circulação e arrefecimento de óleo. O transformador em estudo neste trabalho apresenta uma parte ativa com três colunas (uma por fase), cada uma com uma bobina de três enrolamentos,

sendo a ordem na Figura 4.1, a partir do núcleo mais interno: o enrolamento de baixa tensão (BT, em vermelho) o de alta tensão (AT, em azul), e um enrolamento adicional, responsável pela regulação da tensão na alta tensão (RAT, em branco). O óleo de arrefecimento entra no transformador por diferentes entradas, posicionadas sob cada enrolamento, por meio de dutos de diâmetros específicos para cada enrolamento.

Dessa forma o óleo é direcionado para as três colunas do transformador e em seguida para cada enrolamento, onde remove o calor dissipado. Ao deixar o transformador, o óleo mais quente escoa por diferentes componentes (tanque de compensação, servo válvula, medidor de fluxo) até chegar à bomba centrífuga. Após a bomba, o óleo é dirigido aos aerotermos, onde é resfriado pelo fluxo forçado de ar ambiente, retornando, por fim ao transformador.

A Figura 4.1 apresenta esquematicamente o domínio completo do transformador móvel do tipo ODAF

Figura 4.1 - Desenho esquemático do transformador móvel tipo ODAF



Fonte: autoria própria

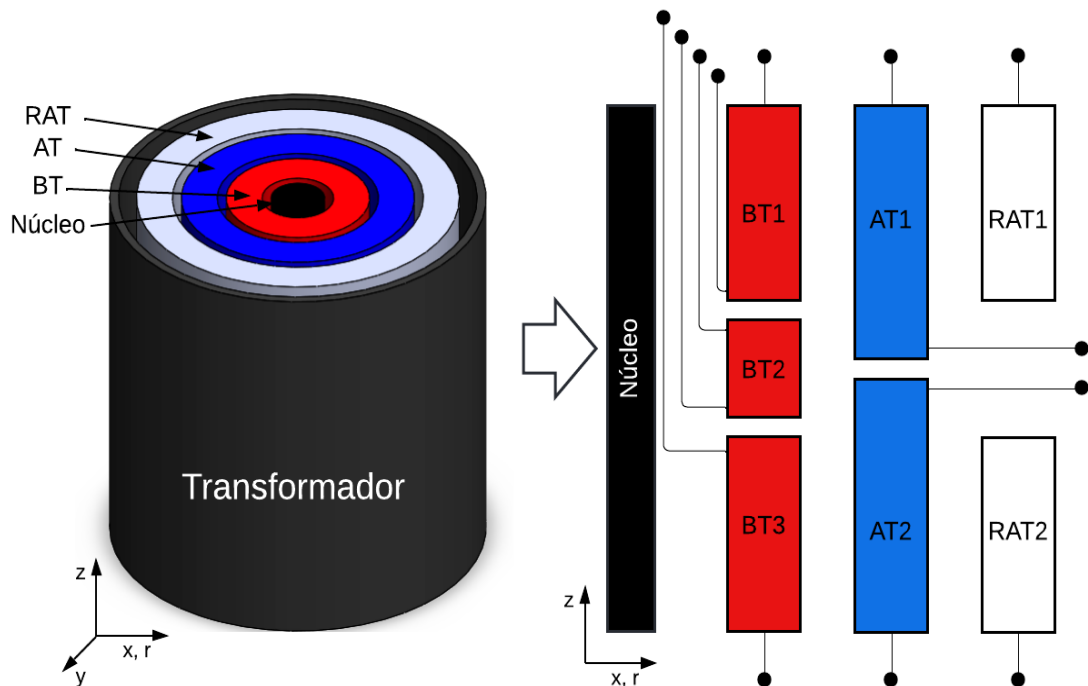
Neste ponto, pode-se listar as seguintes hipóteses simplificativas:

- i. toda a parte externa ao transformador (tanque de compensação, tubulações, bomba, aerotermos, entre outros) e suas perdas não são incluídas na simulação. Deste modo serão consideradas uma condição na entrada do transformador (CE), resultado da

ação conjunta do sistema de arrefecimento de óleo e sistema de bombeamento e outra condição na saída (CS), resultado do escoamento e da transferência de calor interna ao transformador;

- ii. o domínio tridimensional será simplificado a um domínio bidimensional no sentido radial ( $x$  ou  $r$ ) e longitudinal ( $z$ ), conforme ilustra a Figura 4.2. Nota-se na representação 2D simplificada dos enrolamentos, que o enrolamento BT é subdividido em três partes, ao passo que o AT e o RAT em duas partes. Essas subdivisões delimitam o conjunto de discos, formados por um número definido de espiras a partir das quais é possível obter diferentes relações de tensão, segundo as relações obtidas na Equação (2.1).

Figura 4.2 - Representação simplificada bidimensional dos enrolamentos transformado em estudo.



Fonte: autoria própria

O modelo matemático pode então ser desenvolvido a partir da geometria 2D da Figura 4.2, indicando uma entrada de massa, a uma específica vazão/velocidade e temperatura, e uma saída de massa. Porém, aqui é imposta uma nova simplificação geométrica:

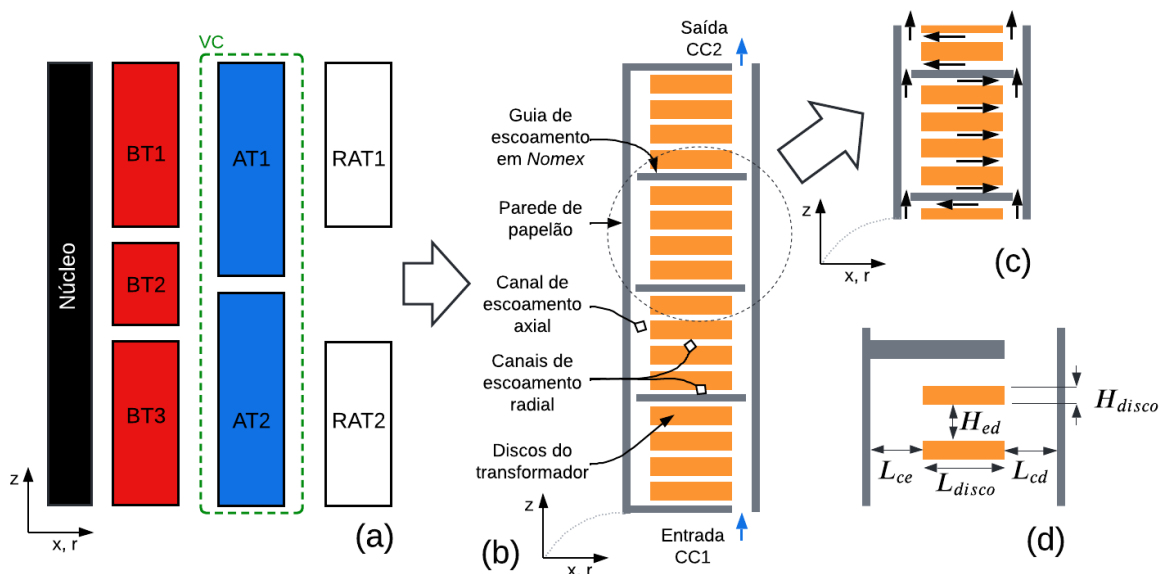
- iii. o domínio de análise será restringido a apenas um dos enrolamentos, sendo selecionado o enrolamento de AT, conforme ilustra a Figura 4.3a, pela limitação do volume de controle (VC);



Essa simplificação baseia-se em dois pontos. Primeiramente, na redução do domínio de análise e simulação demandará menor tempo de convergência das soluções numéricas. Em segundo lugar, foi constatado após inspeção (ver Apêndice A) que a falha do transformador TM1 foi localizada no discos 1 e 2 do enrolamento de AT, com indicativos de expansão para o enrolamento adjacente de BT.

A Figura 4.3a apresenta de forma ilustrada a limitação do domínio de análise (VC) para o enrolamento de alta tensão. Na Figura 4.3b são apresentadas a entrada de massa (onde será indicada a condição de contorno – CC1), a saída de massa (onde será indicada a condição de contorno – CC2), bem como a indicação de alguns dos principais componentes ou partes do enrolamento, com destaque para as guias de escoamento. Por sua vez, a Figura 4.3c traz uma ilustração de como ocorreria o escoamento ao longo dos canais de óleo.

Figura 4.3 - Representação simplificada bidimensional: a) especificação do volume de controle (VC); (b) apresentação de alguns elementos mais importantes do enrolamento de AT; (c) ilustração do escoamento ao longo do enrolamento de AT.; (d) apresentação de algumas dimensões importantes.



Fonte: autoria própria

O fluxo principal (entrada CC1) se dá axialmente (em  $z$ ) ao longo de dutos verticais estabelecidos por uma parede externa de papelão prensado. Porém, pela ação tanto da orientação dos discos como da imposição das guias de escoamento, que estabelecem dutos na orientação radial (em  $r$ ), o escoamento passa a ter um comportamento serpenteado ao longo de todo o enrolamento de AT.

Os dutos radiais entre os discos são estabelecidos por espaçadores, não detalhados na Figura 4.3. Por sua vez, as guias de direcionadoras, feitas de Nomex®, são inseridas

periodicamente ao longo do enrolamento. Por fim, destaca-se que o modelo do enrolamento (AT) do transformador em estudo possui 96 discos em dois blocos de 48 cada em cada um. A Tabela 4.1 traz as dimensões dos discos, bem como dos canais estabelecidos. Algumas dessas dimensões são apresentadas ilustrativamente na Figura 4.3d.

Tabela 4.1 - Dimensões dos discos e espaçamentos para o enrolamento de AT.

Medidas	Nomenclatura	Medidas (mm)
Altura entre discos -	$H_{ed}$	4,00
Largura do canal direito	$L_{cd}$	7,00
Largura do canal esquerdo	$L_{ce}$	8,00
Altura espaçadores entre blocos	$H_{esp}$	24,00
Altura anel blindagem/espaçador	$H_{anel}$	16,00
Altura do disco	$H_{disco}$	9,58
Largura do disco	$L_{disco}$	81,00

Fonte: elaborado pela autora

#### 4.1.1. Equações de Conservação Simplificadas

Conhecidas as hipóteses simplificativas (de  $i$  até  $xi$ ) e as aplicando nas equações de conservação em coordenadas cilíndricas, obtém-se o modelo do escoamento para este sistema. A equação da continuidade simplificadas é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{4.1}$$

a equação da conservação da quantidade de movimento na direção radial ( $r$ ) é:

$$\rho_l \left( u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) \tag{4.2}$$

ao passo que a equação da conservação da quantidade de movimento na direção axial ( $z$ ) é:

$$\rho_l \left( u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \tag{4.3}$$

Notoriamente, a equação da conservação da quantidade de movimento são as equações de Navier-Stokes em regime permanente para escoamentos incompressíveis, após a aplicação das hipóteses simplificativas (iv, v e ix). Quanto ao modelo térmico, após aplicar as hipóteses simplificativas, é dado pelas equações de conservação da energia para o domínio do fluido:

$$\left(u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{k_l}{\rho_l c_{p,l}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (4.4)$$

e para o domínio sólido:

$$\left(u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_s c_{p,s}} \left(k_s \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + S_e\right) \quad (4.5)$$

em que se destaca o termo fonte  $S_e$  correspondente à soma das perdas nos enrolamentos e no núcleo, por unidade de volume.

Para a Equação 4.4 é importante observar que o termo de dissipação viscosa é suprimido (hipótese vii), pois a velocidade do óleo é baixa e, portanto, pode ser considerada desprezível em relação à advecção e à condução. Além disso, observa-se que devido ao escoamento forçado de óleo (óleo dirigido), o efeito da força de empuxo é desprezível (Zhang, 2020) e, portanto, o problema hidrodinâmico pode ser desacoplado da transferência de calor. Dada à imposição de velocidade no óleo na entrada do volume de controle, a convecção natural foi considerada desprezível.

#### 4.1.2. Adimensionalização das Equações de Conservação

A fim de obter as equações de conservação em uma forma não dimensional, ou seja, em função de parâmetros adimensionais como o número de Reynolds e o número de Prandtl, são inicialmente definidas as seguintes variáveis adimensionais:

$$r^* = \frac{r}{D_h} \quad (4.6)$$

$$z^* = \frac{z}{D_h} \quad (4.7)$$

$$u_r^* = \frac{u_r}{u_m} \quad (4.8)$$

$$u_z^* = \frac{u_z}{u_m} \quad (4.9)$$

$$p^* = \frac{p}{\rho u_m^2} \quad (4.10)$$

$$T^* = \frac{T - T_{to}}{(T_{am} - (T_{to} + T_{bo})/2)} = \frac{T - T_{to}}{g} \quad (4.11)$$

$$S_e^* = \frac{D_h^2}{u_m^2 \mu_s} S_e \quad (4.12)$$

em que  $r^*$ ,  $z^*$ ,  $u_r^*$ ,  $u_z^*$ ,  $p^*$  e  $T^*$  são respectivamente as variáveis adimensionais do raio, do comprimento longitudinal, da velocidade radial, da velocidade axial, da pressão, da temperatura e do termo fonte. Além disso,  $D_h = \frac{4S}{P_d}$  é diâmetro hidráulico do duto de entrada,  $S$  é a superfície de área da passagem do fluido pelo duto vertical de entrada,  $P_d$  é o perímetro do duto vertical de entrada,  $g$  é a diferença de temperatura entre a média do enrolamento e temperatura média do óleo (no tanque) na corrente nominal

Substituindo (4.6) - (4.12) em (4.1) - (4.5) e após algumas manipulações matemáticas chega-se as formas adimensionais das equações de conservação da massa, Equação 4.13, Navier-Stokes em  $r$  e  $z$ , Equação 4.14 e Equação 4.15, energia para o fluido, Equação 4.16, e sólido, Equação 4.17:

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial(r^* u_r^*)}{\partial r^*} + \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} = 0 \quad (4.13)$$

$$\left( u_r^* \frac{\partial u_r^*}{\partial r^*} + u_z^* \frac{\partial u_r^*}{\partial z^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial r^*} + \frac{1}{Re_{Dh}} \left( \frac{\partial}{\partial r^*} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial(r^* u_r^*)}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial^2 u_r^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (4.14)$$

$$\left( u_r^* \frac{\partial u_z^*}{\partial r^*} + u_z^* \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial z^*} + \frac{1}{Re_{Dh}} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial u_z^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 u_z^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (4.15)$$

$$\left( u_r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + u_z^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right) = \frac{1}{Re_{Dh} Pr} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (4.16)$$

$$\left( u_r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + u_z^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right) = \frac{1}{Re_{Dh} Pr} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} \right) + \frac{Ec}{Re_{Dh}} S_e^* \quad (4.17)$$

em que se pode definir os grupos adimensionais, número de Reynolds, baseado no diâmetro hidráulico ( $Re_{dh}$ ), o número de Prandtl ( $Pr$ ) e o número de Eckert, (White, 2006):

$$Re_{Dh} = \rho_l \frac{u_m D_h}{\mu} \quad (4.18)$$

$$Pr = \frac{\mu c_{p,l}}{k} \quad (4.19)$$

$$Ec = \frac{u_m^2}{c_{p,s} T_{am}} \quad (4.20)$$

Uma vez que as coordenadas são adimensionalizadas em relação ao diâmetro hidráulico, velocidade de entrada do enrolamento e pressão em relação ao dobro da pressão de entrada do enrolamento dinâmico, é possível confirmar que, para uma dada geometria de enrolamento, a distribuição da vazão volumétrica é ditada pelo número de Reynolds, que nos permite avaliar a hipótese sobre o tipo de escoamento em laminar ou turbulento. O número de Prandtl, por sua vez, estima a razão entre a camada limite hidrodinâmica e a camada limite térmica do um fluxo, que depende somente das propriedades do fluido e, portanto, não tem relação com a geometria. Para óleos minerais, o número de Prandtl é geralmente maior que 100 e a camada limite térmica é, portanto, muito mais fina do que a camada limite hidrodinâmica. Por fim, o número de Eckert expressa a relação entre a energia cinética do fluxo do fluido e a entalpia, sendo aqui usado para caracterizar a dissipação das perdas térmicas nos enrolamentos e núcleo magnético.

#### 4.2. Condições de contorno

Para resolução das equações de conservação é imprescindível apresentar as condições de contorno para as variáveis dependentes propostas nas formas dimensionais e adimensionais. No domínio de solução proposto, na Figura 4.3b são ilustradas as posições das duas principais condições de contorno. Para as equações de conservação da quantidade de movimento e da energia para o fluido, na CC1 tem-se que:

- Velocidade prescrita

$$u_{in} = u_{CC1} = u_o \quad (4.21)$$

- Temperatura de entrada prescrita

$$T_{in} = T_{CC1} = T_o \quad (4.22)$$

enquanto para CC2 tem-se:

- Perfil de pressão uniforme na saída do enrolamento (e interno ao tanque)

$$p_{out} = p_{CC2} = 0 \quad (4.23)$$

Enquanto no domínio sólido, para a conservação da quantidade de movimento, nas paredes sólidas é considerada:

- Não há deslizamento na interface

$$u_d = 0 \quad (4.24)$$

Por fim, para a equação da conservação da energia para o sólido tem-se:

- Potência dissipada prescrita, correspondente às perdas totais por disco

$$Q_{discos} = Q_0 \quad (4.25)$$

Na forma adimensional, as condições de contorno ficam da seguinte maneira:

$$u_{in}^* = \frac{u_{in}}{u_m} \quad (4.26)$$

$$T_{in}^* = \frac{T_{in}}{T} \quad (4.27)$$

$$u_w^* = \frac{u_w}{u_m} \quad (4.28)$$

$$p_{out}^* = \frac{p_{out}}{\rho u_m^2} \quad (4.29)$$

$$Q_{discos}^* = S_e^* \quad (4.30)$$

Numa visão geral, o agrupamento de grandezas em números adimensionais facilita a análise empírica das funções que afetam o comportamento do escoamento e das dissipações, ao mesmo tempo que simplifica a implementação computacional do processo de resolução das Equação 4.13 a 4.17. Uma vez tomadas as hipóteses simplificativas e aplicadas as condições de contorno, as equações são resolvidas iterativamente obtendo-se a solução numérica para a distribuição de temperatura e campos de velocidade nos pontos de interesse.

Por fim, ao adimensionalizar da temperatura obtida para o ponto mais quente no fluido  $T_{hs}$  (°C ou K), aplicando-se a Equação 4.11 obtém-se o próprio fator de ponto mais quente  $H$ :

$$T_{hs}^* = H = \frac{T_{hs} - T_{to}}{T_{am} - (T_{to} + T_{bo})/2} = \frac{\Delta T}{g} + \frac{T'_{hs} - T_{to}}{g} \quad (4.31)$$

em que  $T_{hs}$  é a temperatura do ponto mais quente no sólido,  $T_{to}$  é a temperatura do óleo no topo do tanque,  $T_{bo}$  é a temperatura do óleo na parte inferior tanque e  $T_{am}$  é a temperatura média do enrolamento, e, por fim,  $g$  é a média da diferença de temp. entre enrolamento e óleo. Portanto,  $H$  é composto por uma parcela relacionada à condução, no isolamento de papel, e outra à convecção no domínio fluido. Logo, o fator  $H$  é também em função dos números de Reynolds

e de Prandtl, que por sua vez são afetados pela potência dissipada. Estudos anteriores (Jarman, 2018), mostraram que  $Re_{Dh}$  tem de fato uma maior influência nas condições de arrefecimento de transformadores do tipo OD do que o  $Pr$ .

## 5. ABORDAGEM COMPUTACIONAL

O presente capítulo irá apresentar o método numérico empregado para resolver numericamente as equações do modelo matemático proposto no capítulo anterior. Existem diferentes métodos de solução numéricas que podem ser empregados, sendo o Método dos Volumes Finitos um dos principais e mais utilizados em CFD. Neste método, o domínio de solução é dividido em pequenas sub-regiões, chamadas de volumes de controle.

A localização das variáveis de interesse (velocidade, temperatura e pressão) em um volume de controle pode ser tratada de duas maneiras: a *cell vertex* ou a *cell center*. No arranjo *cell center* cada elemento é o próprio volume de controle com o seu centro posicionado no centroide da célula. Por outra via, na formulação *cell vertex*, o centro do volume de controle é posicionado sobre os nós, os vértices dos elementos (Versteeg e Malalasekera, 2007). O método empregado nesse trabalho executa a montagem em arranjo do tipo *cell center*, sendo o utilizado para malhas não estruturadas, de modo que o volume de controle é escolhido de forma a coincidir com o tamanho do elemento e as grandezas de interesse são armazenadas no centro da célula.

Todas as equações que regem a física do problema são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle levando em consideração a interface com os demais volumes vizinhos e suas condições de contorno. Como resultado, uma aproximação dos valores para cada variável nos pontos específicos do domínio pode ser alcançada. Desta maneira, obtêm-se uma representação completa de comportamentos fluidodinâmicos e térmicos.

Devido a sua característica geométrica, com diferentes regiões e escoamento ocorrendo em diferentes direções, associado a complexidade física do problema em análise, o modelo matemático proposto será resolvido utilizando o software CFD Ansys-Fluent® versão 17.0 do Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Todas as soluções obtidas nesse trabalho baseiam-se na modelagem em geometrias axissimétricas 2D para reduzir os requisitos computacionais. Embora os domínios tridimensionais sejam preferíveis, algumas das análises em CFD podem ser conduzidas em domínios computacionais simétricos de eixo 2D, demandando 10 (dez) vezes menos elementos do que o domínio 3D equivalente (Campelo *et al*, 2017).

As simulações computacionais para a distribuição de escoamento de óleo e queda de pressão para transformadores do tipo OD são geralmente conduzidas adotando análises dimensionais, como em Nordman e Lahtinen (2003) e Zhang *et al* (2017). Desse modo, a



distribuição de escoamento de óleo e queda de pressão são transformados em parâmetros adimensionais de distribuição de fluxo em cada duto de arrefecimento e o coeficiente de queda de pressão sobre o enrolamento, respectivamente. As grandezas avaliadas podem finalmente ser relacionados ao Número de Reynolds para uma determinada velocidade de escoamento no enrolamento, aplicada ao domínio do volume de controle. Por fim, aplicadas as condições de contorno para as variáveis dependentes em cada fronteira, é possível se obter as distribuições de temperatura e velocidade nos pontos de interesse.

Assim sendo, ao longo deste capítulo são apresentados o domínio de solução, seguido da descrição da implementação numérica (funções de interpolação, tratamento do acoplamento pressão-velocidade, entre outros), implementação das condições de operação e das propriedades do fluido e sólido no software proposto. O capítulo é finalizado com a apresentação do método usado para validação do modelo desenvolvido e da malha computacional, tendo por base a norma ASME V&V 20-2009.

### 5.1. Domínio Computacional

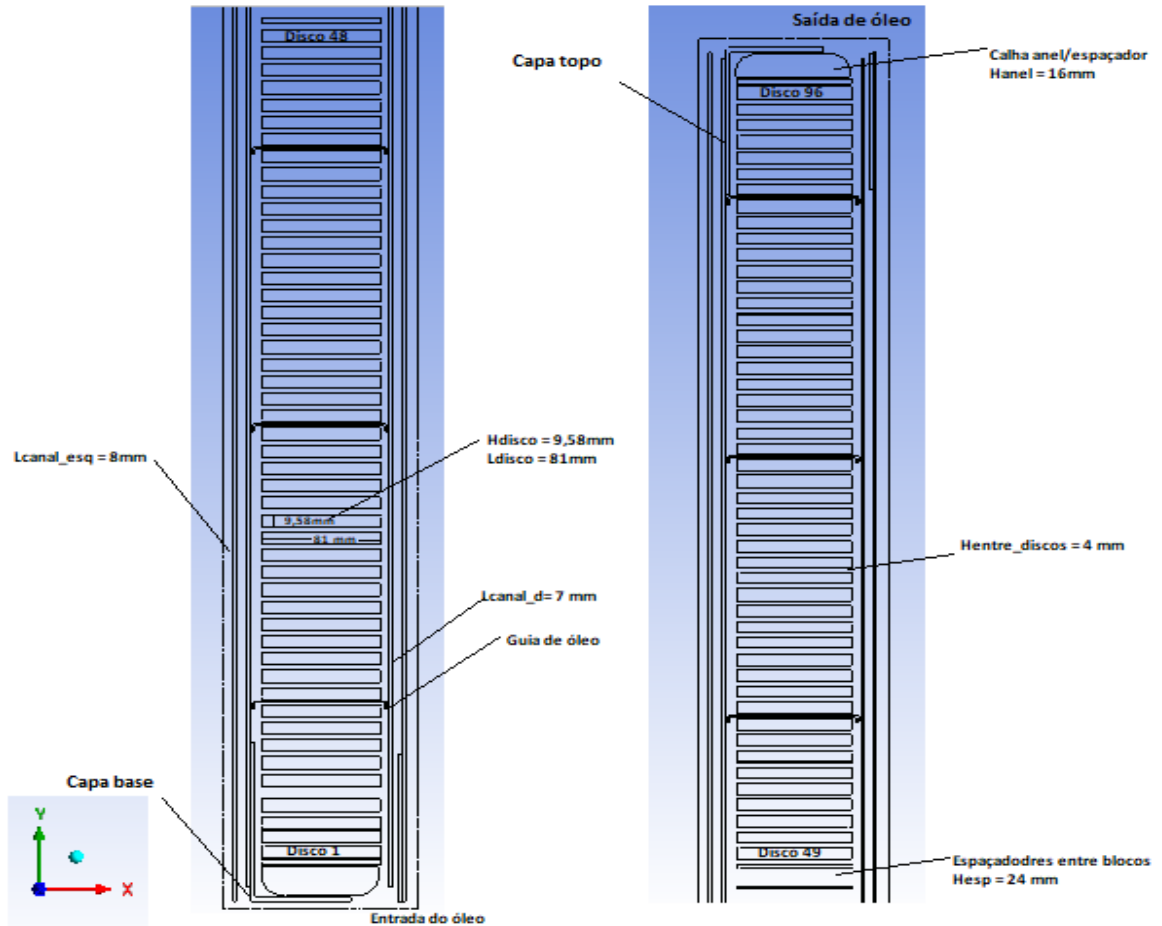
No domínio computacional, diversos parâmetros do enrolamento são levantados e representados no módulo em CAD – *Desing Modeler*. As dimensões e demais informações foram obtidas por meio do catálogo do fabricante, bem como ao longo da inspeção realizada em um dos transformadores com sinistro, apresentado no Apêndice A, dentre eles: número de discos, diâmetros dos dutos de entrada e saída do fluido, número de espaçadores, espessura e largura dos espaçadores, número de condutores de óleo, dimensões do condutor, tipo de óleo isolante, isolamento do condutor.

A Figura 5.1 apresenta o desenho do enrolamento AT elaborado em CAD e que foi posteriormente inserido na plataforma do Ansys-Fluent®, logo, representando o domínio computacional. Faz-se importante lembrar que o enrolamento AT é dividido dois blocos de bobinas, com 48 discos cada (total de 96), de mesmas características, em função da derivação de tensão em 69kV (138kV/2). Para permitir uma melhor visualização do enrolamento, desde a entrada até a saída de óleo de arrefecimento, a imagem divide esses dois blocos, sendo à esquerda o bloco inferior (entrada) do enrolamento, e à direita o bloco superior (saída). Assim, é possível identificar diversos detalhes do domínio computacional, incluindo os discos, os canais de óleo e guias direcionadoras de fluxo.

Note que essa figura representa o enrolamento AT, respeitadas as medidas da Tabela 4.1, sem a presença de defeitos geométricos ou construtivos. Entretanto, à medida que imperfeições ou falhas geométricas são artificialmente inseridas no modelo, para cumprir com

os objetivos desse trabalho, o desenho do enrolamento AT sofre modificações, bem como o domínio computacional é reelaborado no Ansys-Fluent®.

Figura 5.1 - Domínio computacional do enrolamento AT: à esquerda está o bloco inferior, e à direita o superior.



Fonte: autoria própria.

A representação retratada em 2 blocos de 48 discos retangulares, sendo que cada seguimento de disco é modelado com propriedades equivalentes ao cobre revestido com papel isolante de medidas: 81 mm de largura por 9,58 mm de altura. A distância entre discos é 4 mm, sustentada por espaçadores de papelão. Estes espaçadores são suprimidos no domínio uma vez que sua influência sobre o escoamento é insignificante num primeiro momento. Entre os dois blocos, cria-se o espaço para as derivações do comutador sem tensão, onde serão dispostas as conexões de saída dos condutores. Duas capas em papelão na entrada e saída dos dutos tem a função de isolar e direcionar o óleo para o interior das espiras. As guias de óleo por sua vez são posicionadas entre o 9º (nono) e 10º (décimo) disco do primeiro grupo e em seguida a cada 16 discos até o final a bobina. Essas guias são responsáveis por promoverem um escoamento serpenteado entre os dutos horizontais formados entre cada disco. É importante que todas as

guias estejam perfeitamente alinhadas ao longo no comprimento vertical da bobina para que não ocorram desvios de óleo ou a formação de canais preferenciais, garantindo assim que nenhuma região fique susceptível a sobreaquecimentos devido a um menor escoamento de óleo. O enrolamento AT possui as seguintes características construtivas, geométricas e operacionais relevantes para a representação computacional, apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características construtivas, geométricas e operacionais do enrolamento AT.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Potência / coluna	8,333	MVA / coluna
Tensão / coluna	138 religável 69	kV / coluna
Número de discos (bloco 1+ bloco 2)	96 (48 + 48)	unid
Corrente / coluna	67,09 religável 135,57	A / coluna
Número de espiras por disco	30	unid
Tipo e dimensões do condutor	Fio 8,5 x 1,4	mm
Seção total do cobre	11,685	mm <sup>2</sup>
Densidade de corrente	5,84	A/mm <sup>2</sup>
Perdas trifásicas	165000	W
Número de discos	96	unid
Área de cada disco	176229	mm <sup>2</sup>
Altura de cada disco	9,58	mm
Número de espaçadores	20	unid
Comprimento radial do disco	81	mm <sup>2</sup>
Diâmetro externo	799	mm
Diâmetro interno	637	mm
Vazão do óleo/fase	300	l/min
Perda de carga	1849	Pa
Calor dissipado	3499	W/K
Máxima Elevação de Temperatura Entr.	15,7	°C
Elevação de Temp.Topo do Óleo	6,5	°C
Incerteza elementos sensores	+1	°C

Fonte: elaborado pela autora, extraído de Weg (2020).

## 5.2. Implementação Numérica

Segundo Maliska (2004), a tarefa de um método numérico é transformar uma ou mais equações diferenciais definidas num domínio contínuo  $D$ , em um sistema de equações algébricas. A primeira observação que se faz, para se definir a estratégia de solução dessas equações, é que a dinâmica envolvida no sistema ODAF requer basicamente solução de escoamento laminar e regime permanente, definido em domínios regulares: fluido, condutor (envolvido em papel), canais e espaçadores (papel e madeira). Na análise desses diferentes domínios é necessário definir parâmetros para tipo do fluido, materiais sólidos, métodos numéricos de solução e critério de convergência para as equações de Navier-Stokes. Em suma, tais condições traduzem o funcionamento do sistema por meio de restrições adicionais, como definidas no Capítulo 4: perdas térmicas, vazão, velocidade de escoamento e temperaturas de entrada. As seguir são destacados como tais condições são introduzidas no Fluent® de modo a retratar as formulações matemáticas e físicas adotadas como premissa neste trabalho.

### 5.2.1. Generalidades e Discretização no Tempo

Nas configurações gerais, inicialmente é preciso se considerar as hipóteses que irão influenciar o comportamento de dinâmico do problema estudado, que se dá em regime permanente (hipótese iv). No entanto, o software Ansys-Fluent® é um código que tem por base o método dos volumes finitos (MVF) empregando incrementos de tempo na solução numérica chamados de “*false time step*”, ou ainda, como designado em Maliska (2004), o transiente distorcido. Essa é uma técnica de relaxação aplicada para convergir para uma solução de estado estacionário, mas mantendo a variável “tempo” na forma integral das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Essa técnica pode ser considerada uma estratégia sofisticada na medida em que, apesar de não se tratar de um modelo em regime transiente “real”, permite que se use a variável *tempo* como medida de controle para convergência do problema, de modo que somente esta variável precisa ser controlada, ao invés de se usar os coeficientes de sub-relaxação harmonicamente até atingir a convergência, o que demandaria maior esforço computacional e tempo de simulação. No Fluent®, esta funcionalidade foi implementada selecionando a opção *Pseudo Transient Setting* no submenu *Transient Formulation*, que permite que se defina passos de tempo para as equações do domínio fluido (*fluid time scale*) e outro para as equações do domínio sólido (*solid time scale*). Nas presentes simulações, optou-se por adotar passos de tempo calculados automaticamente pelo software, porém o sistema permite que o usuário defina intervalos diferentes para cada equação. Desse modo, é possível

acelerar a convergência, principalmente quando há muitas variáveis a serem resolvidas simultaneamente.

A próxima hipótese considerada neste menu foi sobre o modelo de escoamento. Uma vez que as velocidades de escoamento nos canais de arrefecimento são bastante baixas (de 0,2 a 0,7 m/s) e o óleo possui alta viscosidade, o escoamento é considerado laminar ( $Re < 2100$ ), e nenhum modelo de turbulência é requerido. Em *Models*, habilita-se tipo *Viscous Laminar* (hipótese vi), enquanto a dissipação viscosa (hipótese vii) – *Viscous Heating* – fica desabilitada. De maneira análoga, nenhuma das forças de campo (hipótese viii) em *Physical Models* precisa ser especificada.

Posteriormente, trata-se da inclusão das equações da energia no modelo (Equação 4.5) selecionando a função *Energy Equation (On)* no mesmo menu. Uma vez selecionada esta opção, a configuração dos parâmetros fundamentais para resolução dessas equações é habilitada, como das funções de interpolação dos termos convectivos/difusivos e do termo fonte.

### 5.2.2. Propriedades dos Materiais

Para obter a solução do modelo matemático proposto, é necessário fornecer ao código implementado informações quanto às propriedades de fluidos e materiais sólidos considerados, usando a função – *Materials*. Assim, foi configurado para o domínio fluido o óleo mineral de arrefecimento, enquanto para o domínio sólido foram incluídos quatro tipos de materiais: cobre, papel, madeira.

A maioria das propriedades do fluido é avaliada como constante, visto que seu valor se altera pouco ao longo de uma ampla faixa de temperatura, ao passo que algumas são consideradas dependentes desta, como a densidade e a viscosidade do óleo. Uma ponderação importante é que, ao considerar essas duas propriedades dependentes da temperatura, não há modificação em relação aos métodos numéricos apresentados na seção 5.2.4, uma vez que a fraca dependência em relação a temperatura não interfere na solução do acoplamento pressão velocidade (MALISKA,2004).

Acessando o submenu *Create/Edit Materials Dialog*, foram definidas as funções polinomiais (obtidas com o suporte do software *EES - Engineering Equation Solver*), para uma dada faixa de temperatura, e implementadas nas entradas de viscosidade e densidade. A Tabela 5.2 apresenta os valores constantes e as equações ajustadas utilizadas para introduzir as propriedades do óleo de arrefecimento tipo Nytro 11GBX-US (Nynas, 2014).

Tabela 5.2 - Propriedades óleo naftênico.

Propriedade	Valores ou Funções Polinomiais <sup>8</sup>
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$880(1 - 0,00064(T - 20))$
$\mu$ (Pa·s)	$5,7310 - 0,0612751T + 0,000246719T^2 - 4,42934 \times 10^{-07}T^3 + 2,98929 \times 10^{-10}T^4$
$k$ (W/(m·K))	0,1278
$c_p$ (J/(kg·K))	2030

Fonte: Nynas (2014).

Por sua vez, no domínio sólido, tem-se que o primeiro deles é constituído por um grupo de condutores de cobre de envoltos em Nomex410®, formando um disco a cada conjunto de 30 espiras. A Tabela 5.3 traz as propriedades equivalentes ao cobre revestidos em papel proposto por Quintela *et al* (2017):

Tabela 5.3 - Propriedades do cobre.

Propriedade	Valor
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	8978
$k$ (W/(m·K))	388,5
$c_p$ (J/(kg·K))	381

Fonte: Quintela *et al* (2017).

Em seguida, ainda no domínio sólido, tem-se a caracterização dos materiais das guias e espaçadores em papel e madeira, conforme propriedades da Tabela 5.4, cujos valores já são predefinidos na biblioteca do Fluent® e foram adotados sem alterações.

Tabela 5.4 - Propriedades dos sólidos isolantes.

Propriedade	Papel	Madeira
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	930	700
$k$ (W/(m·K))	0,19	0,173
$c_p$ (J/(kg·K))	1340	2310

Fonte: AnsysFluent®

<sup>8</sup> A temperatura está em unidades de °C.

### 5.2.3. Características dos Domínios

Além das configurações gerais das físicas e equações envolvidas, é necessário definir os tipos de domínios (*Cell Zone Conditions*), sendo um domínio fluido (óleo mineral isolante) e três domínios sólidos (discos, guias e espaçadores entre blocos) e seus materiais associados.

Na configuração da opção *Fluid* foi definido o óleo de arrefecimento com suas propriedades previamente especificadas em *Create/Edit Materials Dialog*. Nenhuma fonte de calor, momento ou turbulência foi considerada para a zona fluida. Enquanto para a configuração das zonas sólidas foi definido cada tipo de material para as regiões identificadas previamente na construção da malha: guias, espaçadores e discos. A opção *Source Term* foi habilitada para a região dos discos dos enrolamentos de cobre. Nela insere-se o termo fonte da equação da energia (Equação 4.5), referente às perdas totais do transformador (soma das perdas no núcleo e nos enrolamentos).

### 5.2.4. Acoplamento Pressão Velocidade

Os métodos disponíveis no Fluent® para resolver o acoplamento de pressão-velocidade são basicamente o: *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure linked Equation*), *PISO* (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*), *SIMPLEC* (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent*) e *COUPLED*. Nesta etapa, em *Methods*, faz-se necessário considerar, além do regime permanente (iv), a incompressibilidade do fluido (v). O método selecionado foi o *COUPLED*, que é um algoritmo eficaz para a maioria dos fluidos incompressíveis e funciona de forma eficiente em situações de estado estacionário (ANSYS, 2013). Este consegue uma taxa de convergência significativamente melhor quando comparada a algoritmos segregados, com o *SIMPLE*, por exemplo, embora demande maior recurso computacional.

### 5.2.5. Esquemas de Discretização Espacial

Na seção *Spatial Discretization* são configuráveis as funções de interpolação que controlam a discretização espacial dos termos advectivos de cada equação governante, enquanto a função de interpolação de segunda ordem é usada automaticamente para os termos viscosos/difusivos.

Primeiramente, o método de cálculo dos gradientes<sup>9</sup> das Equação 4.4 e Equação 4.5 foi selecionado o método *Least Square Cell Based*, ou *Mínimo Quadrados Baseado em Célula*.

---

<sup>9</sup> Computado pelo Teorema de Green-Gauss

Neste método, os gradientes são usados não apenas para o cálculo dos valores escalares nas faces das células, mas também para calcular os termos difusivos secundários e derivados da velocidade. Este método foi escolhido por apresentar uma precisão, em termos de malha não estruturada, comparável à do método de Gradiente por Nós (*Node-based Gradient*), porém o esforço computacional é significativamente menor.

Para a equação da pressão, foi usado o esquema *Second Order*, que pode proporcionar maior precisão em relação aos métodos *Standad* ou *Linear*. Enquanto o *PRESTO!* e o *Body Forced Weighted* são mais indicados para escoamentos multifásicos (ANSYS, 2013).

Para os termos advectivo nas equações do momentum e da energia, foi selecionada a função de interpolação *Second Order Upwind*. Esse método oferece melhor precisão em relação ao *First Order Upwind* para malhas menos complexas, enquanto o *Quick* e o *Third-Order MUSCL (Monotone Upstream Centered Schemes for Conservation Laws)* são mais indicados para malhas mais complexas.

### 5.2.6. Condições de Operação e de Contorno

As condições operacionais do transformador delimitam as condições de contorno definidas na seção 4.2. Esses parâmetros são ajustados no Ansys-Fluent® na função *Boundary Conditions*, tanto para os dados de entrada quanto de saída, submenu *inlet* e *outlet* respectivamente, mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Condições de operação nominais consideradas no estudo.

Condições de Contorno	Variável	Unidades	Enrolamento AT
$u_{in}$	Velocidade de entrada nominal	m/s	0,4 – 0,7
$T_{in}$	Temperatura de entrada	°C	77,0
$u_d$	Velocidade de deslizamento	m/s	0
$Q_{disco}$	Perdas por disco	W/m <sup>3</sup>	3534,90
$p_{out}$	Pressão manométrica na saída	Pa	0

Fonte: elaborado pela autora

Além disso, deve-se ainda considerar fluxo reversos, em que velocidades radiais do óleo assumem valores positivos e negativos dentro de cada passagem e que linhas fluxos quentes que saem dos dutos inferiores podem reentrar nos dutos superiores. O fluxo reverso de óleo pode eventualmente causar superaquecimento dos discos, especialmente se ocorrer estagnação de óleo em algum duto (fenômeno de “*hot streaking*”), como observado por (Skillen *et al*, 2011). Na configuração de *outlet (pressure-outlet)* foi selecionada então a opção *Prevent*



*Reverse Flow*. Por fim, nas paredes sólidas, a condição de não-deslizamento nas interfaces é selecionada na opção *No Slip*, em *Shear Condition* para cada uma dessas regiões.

### 5.2.7. Critérios de convergência

A convergência do procedimento iterativo é avaliada a partir da soma dos resíduos dos balanços de cada equação de transporte nos volumes discretos da malha, sendo que todas as equações são resolvidas iterativamente para um determinado passo de tempo, até satisfazer um critério pré-determinado. No Fluent® essa configuração é definida na opção *Monitors – Residual*, em que se pode definir critérios diferentes para cada equação.

Considerou-se, para todos os casos desse trabalho, o critério inferior ou igual a  $10^{-6}$ , residual recomendado em ANSYS (2013) para cálculos de precisão simples (o padrão para a maioria dos computadores). Com 450 iterações, esse critério foi atingido para todas as equações. Quanto ao passo de tempo, utilizou-se inicialmente a modo automático, definidos pelo software, tanto para a escala de tempo no domínio fluido quanto sólido. A Tabela 5.6 resume as configurações aplicadas.

Tabela 5.6 - Configuração para os métodos de solução

<b>Regime</b>	Permanente
<b>Equação de Energia</b>	<i>On</i> (habilitado)
<b>Fluxo</b>	<i>Laminar</i>
<b>Método de Acoplamento Pressão -Velocidade</b>	<i>Couple/Pseudo Transiente</i>
<b>Pressão</b>	<i>Second Order</i>
<b>Método de Discretização</b>	
<b>Momentum</b>	<i>Second Order Upwind</i>
<b>Energia</b>	<i>Second Order Upwind</i>
<b>Critério de Convergência</b>	
<b>Continuidade</b>	0,000001
<b>Velocidade em x</b>	0,000001
<b>Velocidade em y</b>	0,000001
<b>Energia</b>	0,000001

Fonte: elaborado pela autora

### 5.3. Malha Computacional

A estruturação da malha computacional é uma etapa fundamental para que os resultados numéricos possam representar com confiabilidade a física real do problema. Assim, não basta utilizar as equações de conservação nas suas formas adequadas após a aplicação de hipóteses simplificativas robustas sem que a malha utilizada seja refinada o suficiente para não interferir no resultado da simulação computacional. O refinamento sistemático da malha é a base da

verificação dos processos numéricos para códigos propostos em CFD. Logo, a qualidade da malha determina majoritariamente a confiabilidade dos resultados e representa a decomposição da geometria em volumes de controle, permitindo a aplicação das equações diferenciais no sistema (Nogueira, *et al* 2019).

O trabalho de refinamento deve concentrar-se em evitar elementos distorcidos, que podem provocar singularidade, dificuldade de convergência, ou cujo tamanho não permita representar a dinâmica das variáveis das físicas envolvidas. Por outra via, é importante se evitar perda de tempo e esforço computacional associado a refinamentos excessivos, com mais elementos e componentes do que o necessário para representar os campos e seus gradientes (ANSYS, 2021). Ainda que alguns pacotes comerciais ofereçam recurso de refinamento automático, é importante estimar o erro de convergência da malha e a sensibilidade da resolução proposta. Para isso, o presente trabalho aplica o método *Grid Convergence Index*– GCI (COMMITTEE ASME, 2009), em que as soluções numéricas obtidas para malhas uniformes ou não-uniformes são submetidas a uma análise de confiabilidade e acurácia, a partir das limitações de três estimadores de erro, para três diferentes modelos de malhas, utilizando a extensão da *Extrapolação de Richardson*. O método é explicado na sequência.

### 5.3.1. O Método Grid Convergence Index– GCI

O GCI é um dos métodos mais amplamente utilizado para obter uma estimativa de erro e é descrito na norma ASME V&V20-2009 “*Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*” (COMMITTEE ASME, 2009). No procedimento, parte-se da solução do problema utilizando uma malha “*grosseira*” até as soluções em malhas mais “*refinadas*” e, por fim, o índice GCI define o quanto a solução diverge de uma malha mais grosseira para outra obtendo o “GCI<sub>fine</sub>”.

A V&V20 propõe a obtenção do GCI a partir de cinco passos, sendo que, a cada análise, são necessárias comparações entre três malhas: uma grosseira, uma média e uma fina. A seguir descreve-se o passo a passo, cujo equacionamento é orientado para uma malha 2D, utilizada no presente trabalho.

- 1) Define-se um tamanho representativo de uma célula  $h'$  (não necessariamente em coordenadas cartesianas) para a célula computacional através da relação para malhas estruturadas, para domínio bidimensional:

$$h' = [(\Delta x_{max})(\Delta y_{max})]^{1/2} \quad (5.1)$$

e para malhas não estruturadas:

$$h'_{2D} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \Delta V_i}{N} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

em que  $N$  é número total de células computacionais usadas e  $\Delta V_i$  é a área de cada volume de controle que compõem o domínio de solução.

2) Seleciona-se pelo menos três valores para a célula computacional de referência ( $h'$ ) onde o problema é resolvido para as variáveis de interesse  $\varphi$ . O valor da razão ( $r$ ) entre os valores de  $h'$  de uma solução para outra deverá atender ao critério de ser, pelo menos, 1,3 vezes mais refinado que o valor anterior. As razões  $r$  são dadas por:

$$r_{32} = \frac{h'_{2Dgrosseira}}{h'_{2Dmédia}} \text{ e } r_{21} = \frac{h'_{2Dmédia}}{h'_{2Dfina}} \quad (5.3)$$

sendo que a norma recomenda ainda que os valores de  $r_{32}$  e  $r_{21}$  sejam os mais próximos possíveis da razão recomendada para evitar ruídos nos resultados e problemas cuja convergência da malha seja oscilante.

3) Definidos  $h'_2 d_1 < h'_2 d_2 < h'_2 d_3$ ,  $r_{32} = \frac{h'_2 d_3}{h'_2 d_2}$  e  $r_{21} = \frac{h'_2 d_2}{h'_2 d_1}$ , é calculada a ordem aparente (ou observada,  $p$ ):

$$p = \left[ \frac{1}{\ln(r_{21})} \right] [\ln|\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}| + q(p)] \quad (5.4)$$

em que:

$$q(p) = \ln \left( \frac{(r_{21}^p - s)}{(r_{32}^p - s)} \right) \quad (5.5)$$

$$s = 1. \text{sign}(\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}) \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2 \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (5.8)$$

sendo  $\varphi$  o valor da solução para a variável de interesse, seja temperatura ou velocidade, por exemplo, obtida na malha computacional aplicada ou obtido experimentalmente, com o qual se

deseja comparar. Para o cálculo de  $p$ , é necessário conhecer  $q$ , em que a solução do sistema pode ser determinada em um processo iterativo iniciado com  $q(p) = 0$ .

4) Calcula-se o valor extrapolado para a variável de interesse ( $\varphi_{ext}^{21}$ ):

$$\varphi_{ext}^{21} = \frac{(r_{21}^p \varphi_1 - \varphi_2)}{(r_{21}^p - 1)} \quad (5.9)$$

5) Calcula-se o erro estimado ( $e_a^{21}$ ) com a ordem observada  $p$ , o erro relativo extrapolado ( $e_{ext}^{21}$ ) e o valor do *Grid Convergence Index* – GCI, nas Equações 5.1, 5.11 e 5.12, respectivamente.

$$e_a^{21} = \left| \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{\varphi_1} \right| \quad (5.10)$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{(\varphi_{ext}^{21} - \varphi_1)}{\varphi_{ext}^{21}} \right| \quad (5.11)$$

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{F_s \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (5.12)$$

Por fim, o GCI encontrado deve representar uma incerteza estimada obtida pela multiplicação do valor absoluto do erro  $E$  (generalizado) por um fator de segurança  $F_s$ , cujo valor recomendado por Roache (1998) é de 1,25, com base em valores determinados empiricamente em Coleman e Stern (1997). O  $F_s$  é usado para se converter uma estimativa de erro em um intervalo de confiança de 95% para a incerteza. Desse modo, adota-se como critério de parada quando o valor do GCI é menor do que 5% o que significa que a malha intermediária pode ser aplicada a um custo computacional aceitável. Caso isso não seja atingido, deve-se refinar novamente a malha e refazer a análise.

## 6. METODOLOGIA

Nesta sessão são apresentados os métodos de validação do modelo computacional, conforme a norma ASME V&V20-2009, bem como os métodos utilizados para simular as condições nominais de operação do transformador, segundo o seu projeto original. Em seguida são abordados os métodos empregados para imposição das variações das geometrias e demais condições de operação não-nominais que podem afetar os perfis de escoamento ou os campos de velocidade internos aos enrolamentos de AT do transformador TM1.

### 6.1. Estudo de Independência do Tamanho de Malha e Validação do Modelo

#### Matemático

O estudo de independência do tamanho de malha e a validação do modelo matemático proposto são realizados utilizando o critério GCI, que tomará como base os resultados experimentais de Daghrah (2017). O estudo deste autor apoia-se num aparato experimental de um sistema OD que reproduz, em escala reduzida, a operação de um transformador ODAF, como o de interesse nesse trabalho. Deste modo, torna-se possível certificar de que a solução numérica obtida é devida às condições geométricas, operacionais e de contorno impostas, e não à discretização da malha.

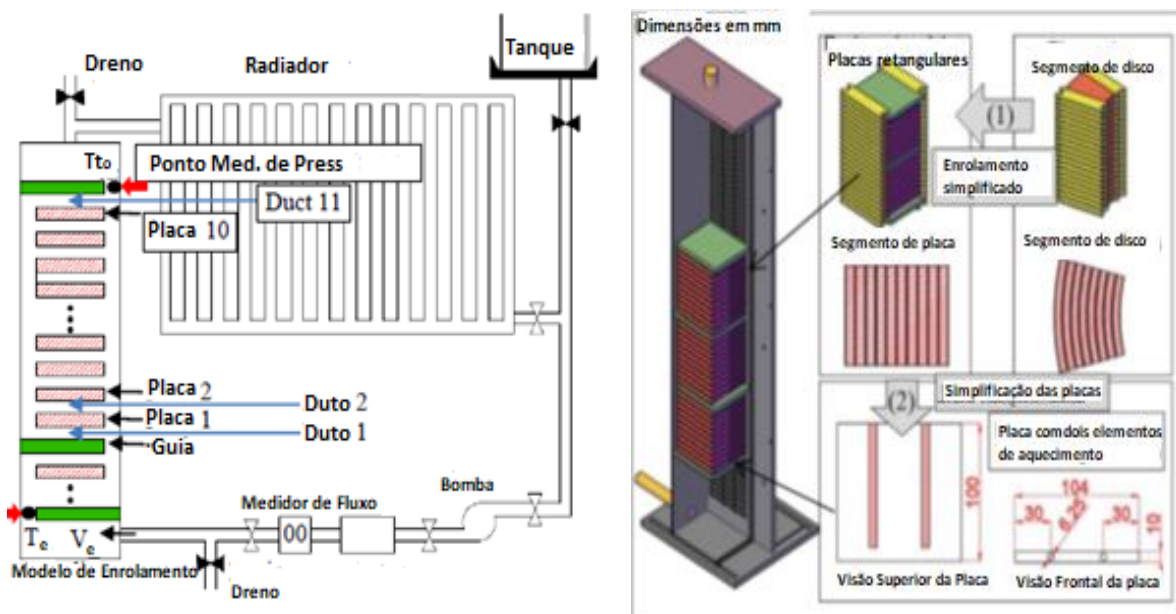
O experimento de Daghrah (2017) é constituído de um radiador, uma bomba, medidor de fluxo e unidade de aquecimento, o qual impõe as perdas térmicas, como em um enrolamento em carga, similarmente ao sistema ODAF empregado no transformador objeto deste estudo. O aparato experimental é estruturado em uma caixa retangular em policarbonato com 55 segmentos em placas de alumínio, cada um com dimensões de  $100 \times 104 \times 10$  mm, com unidades resistivas. Tais placas têm a finalidade de reconstituir os discos do enrolamento cilíndrico imersos em óleo mineral isolante. As unidades resistivas para aquecimento garantem um fluxo de calor uniforme em cada placa com intensidade de 50 W/placa, equivalente a uma perda uniforme de  $2010 \text{ W/m}^2$ . Estas unidades reproduzem, de maneira equivalente, as perdas totais dos enrolamentos e núcleo do transformador. O sistema microprocessado utilizado pelo autor para medição de temperatura foi calibrado (usando água aquecida) para a faixa experimental variando de 0 a  $100^\circ\text{C}$ , apresentando uma exatidão<sup>10</sup> de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  e uma precisão de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Os termopares, usados como elemento sensor e instalados juntos às placas, apresentavam uma incerteza de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

---

<sup>10</sup> A exatidão refere-se a quão próximo do valor real estão as medidas realizadas, enquanto a precisão diz respeito à repetibilidade das medidas.

A Figura 6.1 abaixo apresenta o diagrama esquemático do experimento de Daghrach.

Figura 6.1 - Diagrama esquemático do conjunto experimental.



Fonte: Daghrach (2017, p.93)

A primeira etapa da validação do modelo deste estudo consistirá em implementar no módulo CAD, usando o Ansys-Fluent®, a mesma geometria do artefato experimental e em seguida aplicar as condições de contorno nominais do experimento de Daghrach, como apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Condições de operação na entrada do transformador do estudo experimental

Condições de Contorno	Variável	Unidades	Enrolamento AT
$u_e$	Velocidade de entrada nominal	m/s	0,3
$T_e$	Temperatura de entrada	°C	55,0
$u_d$	Velocidade de deslizamento	m/s	0
$Q'_{enr}$	Perdas nos enrolamentos	W/m <sup>2</sup>	2010
$p_s$	Pressão manométrica na saída	Pa	0

Fonte: Daghrach (2017).

O experimento de Daghrach (2017) adota um esquema de posicionamento de guias alternadas em “zig-zag”, mostrado na Figura 6.2a, mesmo esquema dos enrolamentos de RAT e BT do transformador TM1. No entanto, o enrolamento AT do transformador TM1 possui um posicionamento de guias uniformemente distribuído tipo abas internas-externas, como o esquema da Figura 6.2b, com direcionamento nos dois lados dos discos (“*double concentric*”).

*zig-zag flow*”), que possui canais verticais da direita ligeiramente menores que os da esquerda (vide Tabela 4.1) e as barreiras não obstruem totalmente o fluxo em um dos lados, com em Figura 6.2a.

Figura 6.2 - Tipos de direcionadores: (a) guias alternadas e (b) guias internas/externas



Fonte: (Campelo *et al.*, 2017), adaptado.

Este esquema é mais comumente utilizado quando canal vertical precisa resfriar bobinas de grandes diâmetros internos. Segundo Radakovic (2010), fluxos de óleo em *zigue-zague* ou interno-externo são arranjos preferíveis para arrefecimento OD, de forma que uma maior queda de pressão no enrolamento tem um menor impacto no sistema como um todo, enquanto os aumentos dos coeficientes de transferência de calor por convecção nos canais radiais e na redução dos gradientes de temperatura do enrolamento para o óleo são mais significativos. Ambas as configurações são derivações de um mesmo esquema que tem por objetivo fazer com que o fluxo percorra alternadamente os canais horizontais entre os discos ao longo do enrolamento. Portanto, essa variação do posicionamento das guias não tem impacto sobre a validação da malha, uma vez que os recursos usados na construção da malha para capturar o comportamento fluidodinâmico nas regiões de interface do escoamento (*mesh inflation*) são fundamentalmente os mesmos.

A validação seguirá com a proposição em quatro malhas:  $M_4$ ,  $M_3$ ,  $M_2$ ,  $M_1$ ; sendo  $M_1$  a mais refinada e  $M_4$  a mais grosseira. Em seguida as malhas serão analisadas 3 a 3 ( $M_1$ - $M_2$ - $M_3$  e  $M_2$ - $M_3$ - $M_4$ ) para o cálculo do GCI. Entre todas elas serão usadas uma razão de refinamento  $r$  igual a 2. A norma ASME V&V20-2009 orienta que esta razão não seja inferior a 1,3. O *Fator de Segurança*  $F_s$  usado foi 1,25, como recomendado em Roache (1998). A variável de

interesse selecionada será a elevação de temperatura no ponto mais quente ( $\delta T_{HS}$ ), que no estudo de Daghrah (2017) está localizada no bloco 2.

Na primeira comparação, o método aplicará para as malhas  $M_4$ ,  $M_3$  e  $M_2$  com 44721, 138392 e 511795 elementos, respectivamente. Cada elemento com os tamanhos  $h'_4 = 0,0018$ ,  $h'_3 = 0,0009$  e  $h'_2 = 0,00045$  m.

As compilações serão executadas num processador AMD Opteron 6320 de 2,79 GHz, constituído de dois processadores, 8 núcleos físicos e 16 lógicos, sendo que, para a aplicação CFD, somente os núcleos físicos exercem influência sobre o tempo de processamento.

## 6.2. Estudo das Condições Nominais de Operação

As primeiras análises consideram o transformador (TM1) operando segundo suas condições nominais, bem como sendo geometricamente perfeito, sem defeitos de construção, de montagem ou de projeto. Para tanto, serão implementadas as condições apresentadas na Tabela 6.5.

## 6.3. Estudo das Condições Não-Nominais de Operação Impostas Artificialmente

Nesta etapa serão impostas artificialmente diferentes condições não-nominais e imperfeições estruturais que supostamente podem impactar o desempenho térmico do TM1. Aqui entende-se por *desempenho térmico* a capacidade do transformador simulado em operar de forma segura e estável perante as normas apresentadas (conforme Tabela 2.2) e os catálogos do fornecedor. Nestes termos, verifica-se que as simulações realizadas na seção anterior (seção 6.2), nas condições nominais e com velocidades de entrada de 0,4 m/s e 0,7 m/s, apresentam desempenho térmico satisfatório e compatível com as normas e especificações do fabricante. Logo, ao impor condições não-nominais e imperfeições estruturais, são avaliados os perfis de temperatura, bem como a intensidade e a localização do ponto mais quente, ou seja, se há impacto sobre o desempenho térmico do transformador.

Com base em levantamentos de campo e inspeção da parte ativa (Apêndice A), foi possível avaliar quais regiões do enrolamento de TM1 foram acometidas pela falha e, assim, delimitar as possíveis condições não-nominais e imperfeições estruturais. Desse modo, serão consideradas três hipóteses com impactos sobre o desempenho do sistema de resfriamento:

- i. ineficiência nas trocas térmica por imperfeições de projeto ou montagem, envolvendo posicionamento das guias, capas, anéis de prensagem ou dutos;
- ii. falhas associadas à velocidade imposta na entrada do duto;
- iii. distribuição não uniforme de perdas.



Uma vez que a distribuição do escoamento de óleo pode ser afetada por geometrias adversas inseridas durante a montagem do transformador, o modelo de enrolamento foi alterado criando-se oito cenários de desvios geométricos e operacionais, derivados dessas três hipóteses. Os resultados nestas condições serão comparados com aqueles sob condições nominais, bem como suas correlações com determinados tipos de falhas em enrolamentos de transformadores, especialmente, em relação à falha sob investigação no TM1. Em vista disso, serão propostos os seguintes cenários:

- Cenário 1 – deformação das guias de óleo;
- Cenário 2 – deslocamento dos discos;
- Cenário 3 – obstrução da entrada – *inlet*;
- Cenário 4 – obstrução da saída – *outlet*;
- Cenário 5 – deslocamento da capa base;
- Cenário 6 – efeitos combinados de deslocamento de disco com velocidade reduzida;
- Cenário 7 – efeitos combinados de deslocamento da capa base com velocidade reduzida;
- Cenário 8 – perdas não-uniformes.

Para cada caso, envolvendo alteração da geometria, deverá ser gerada uma nova malha e em seguida serão analisados o perfil de temperatura e os campos de velocidade, conforme a imperfeição imposta.

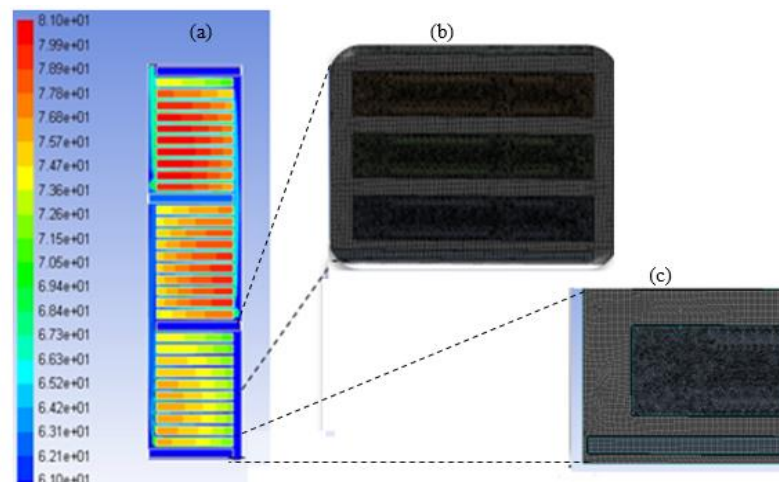
## 7. RESULTADOS

### 7.1. Independência do Tamanho de Malha e Validação do Modelo Matemático

Nesta etapa foram aplicadas à geometria do aparato experimental, apresentado na sessão 6.1, as quatro diferentes malhas:  $M_4$ ,  $M_3$ ,  $M_2$ ,  $M_1$  com execução em duas etapas, comparando as malhas em subgrupos de três.

A Figura 7.1a apresenta a função gráfica *Contours* para distribuição de temperatura aplicada ao enrolamento do experimento, obtida em três blocos do enrolamento de referência, enquanto a Figura 7.1b dá destaque à estrutura da malha  $M_2$  na região de interface dos discos como fluido no bloco 1, a Figura 7.1c detalha a mesma malha, porém na interface guia e fluido. A variável  $\delta T_{HS}$  é avaliada ao longo dos discos do terceiro bloco da bobina, onde localizam-se os pontos com maiores elevações.

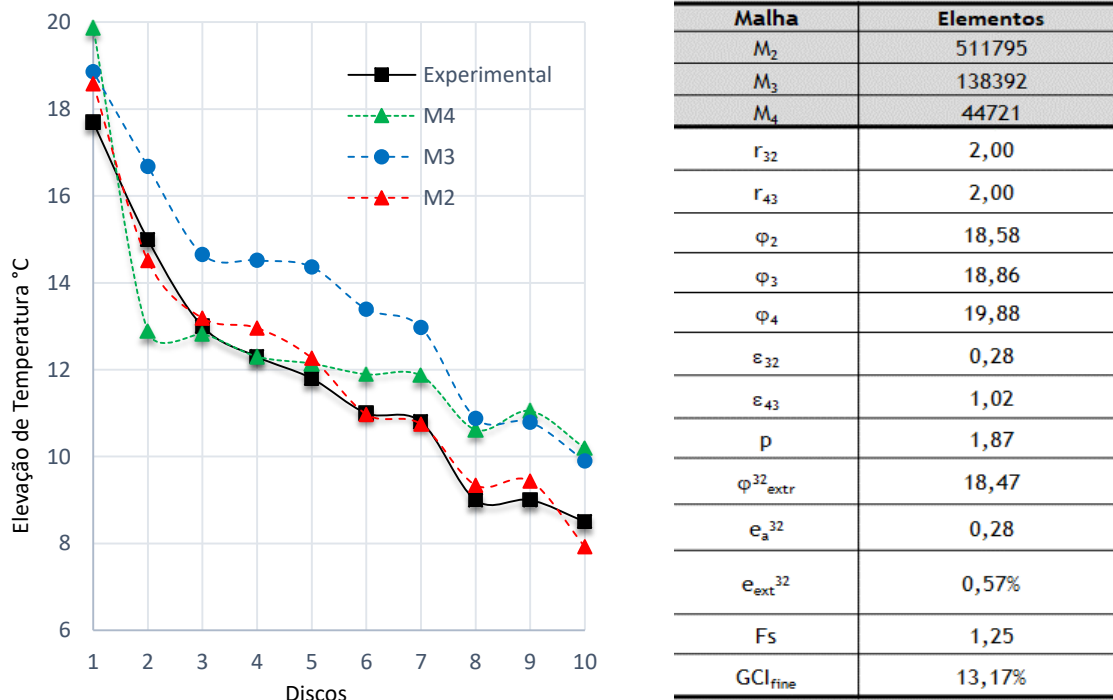
Figura 7.1 - Representação do enrolamento usado no experimento: (a) distribuição de temperatura; (b) detalhe malha na interface dos discos x fluido; (c) detalhe malha interface regiões guias x fluido.



Fonte: autoria própria

Os resultados para as elevações de temperatura para as condições nominais ( Tabela 6.1) são mostradas na Figura 7.2 juntamente com as informações extraídas do procedimento da norma, incluindo o  $GCI_{fine}$ . Nesta figura, observa-se que o primeiro disco do bloco é o que apresenta maior elevação (ponto mais quente) e, portanto, a variável  $\delta T_{HS}$  é comparada como preconizado na norma, neste ponto de interesse no quadro à direita.

Figura 7.2 - Comparação entre as malhas M2-M3-M4 e o resultado experimental ao longo dos diferentes discos e quadro de avaliação GCI para  $\delta T_{HS}$  no primeiro disco



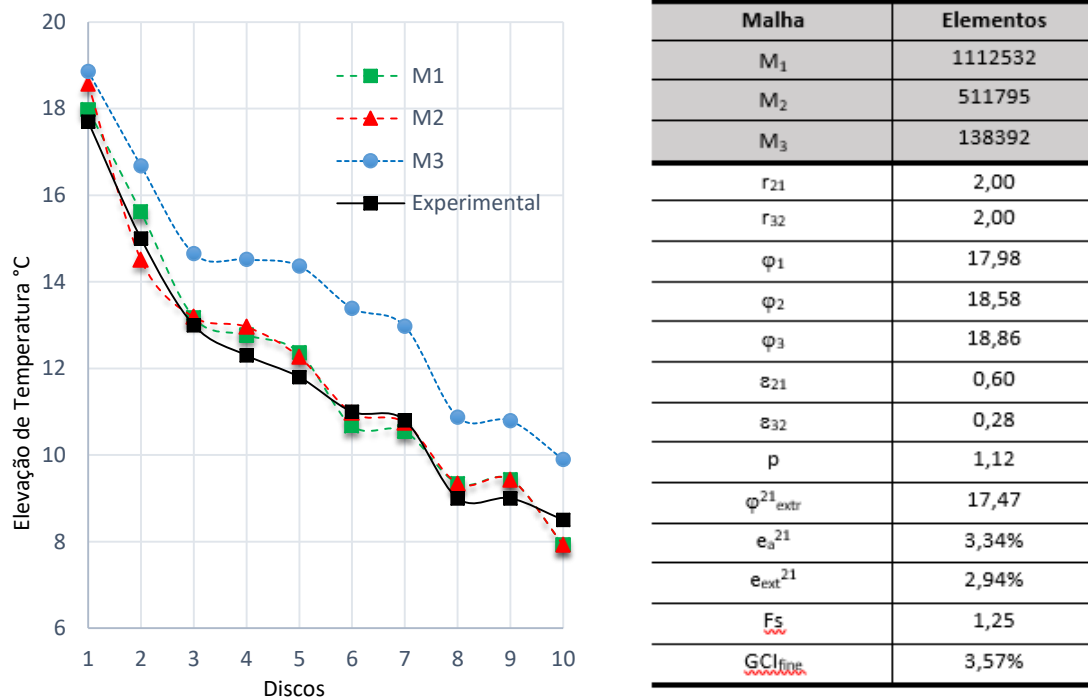
Fonte: autoria própria

Observa-se que o  $\delta T_{HS}$  experimental encontrado foi de 17,7°C, enquanto na malha  $M_2$  foi de 18,58°C, na malha  $M_3$  18,86°C e na malha  $M_4$  19,88°C. Aplicando o critério, o GCI encontrado foi de 13,17%, ou seja, a malha mediana  $M_3$  não é refinada o suficiente. Além disso, ao analisar o comportamento e tendências da distribuição do  $\delta T_{HS}$  ao longo dos discos, é notório que as malhas  $M_4$  e  $M_3$  afastam-se dos dados experimentais, ao passo que a malha  $M_2$  apresenta resultados mais consistentes. Contudo, para assegurar que tal malha é realmente satisfatória, propõe-se uma segunda avaliação do GCI aplicando uma quarta malha mais refinada ( $M_1$ ).

Na segunda avaliação, Figura 7.3, foram usadas as malhas  $M_3$ ,  $M_2$  e  $M_1$ , com 138392, 511795 e 1112532 elementos respectivamente, de tamanhos  $h'_3 = 0,0009$ ,  $h'_2 = 0,00045$  e  $h'_1 = 0,000225$  m.

Nesta etapa, verificou-se que o critério GCI é atingido com 3,45% (idealmente menor que 5%). Mais que isso, observa-se que as malhas  $M_2$  e  $M_1$  garantem uma boa reprodução dos resultados experimentais, em termos de intensidades de  $\delta T_{HS}$  e do perfil de distribuição ao longo dos diferentes discos.

Figura 7.3 - Comparação dos valores de  $\delta T_{HS}$  ao longo dos diferentes discos entre as malhas M<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub> e o resultado experimental.



Fonte: autoria própria

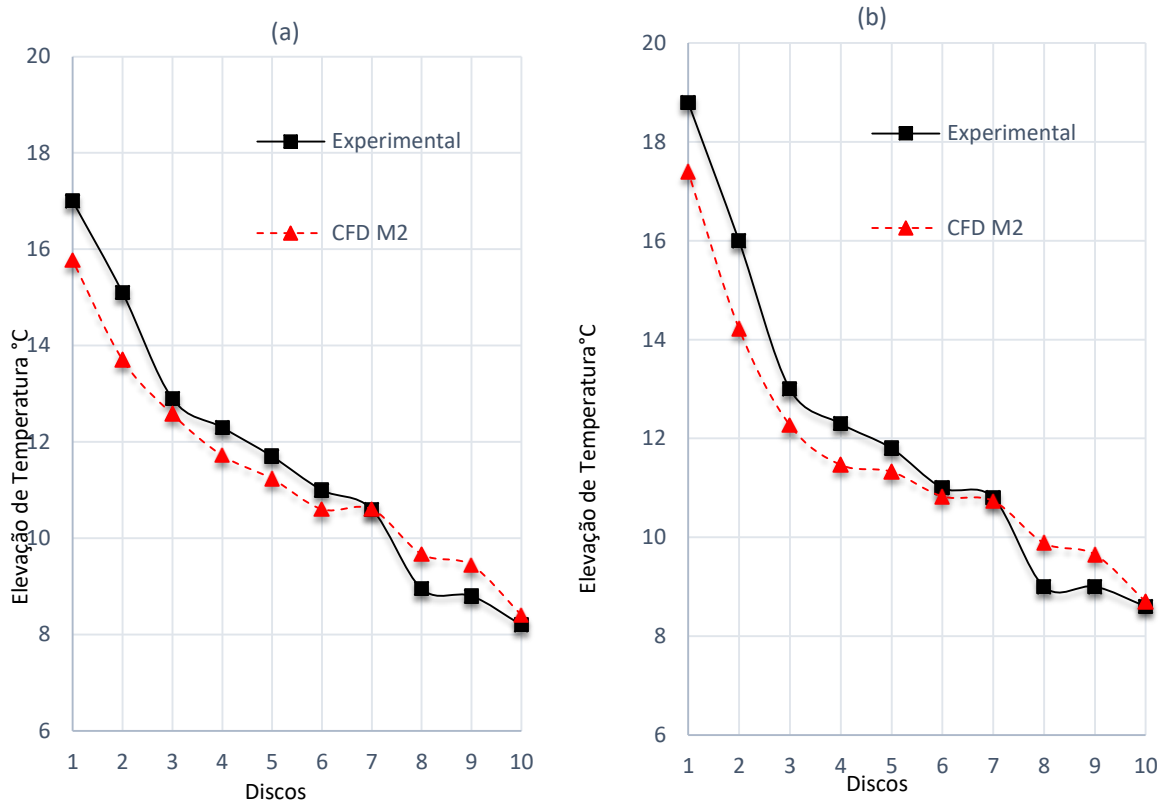
Portanto, a malha intermediária (M<sub>2</sub>) pode ser considerada qualificada o suficiente, com um intervalo de confiança maior que 95%, bem como demanda menor custo computacional comparado com a M<sub>1</sub>.

Segundo os critérios da ASME V&V20-2009, neste ponto é pertinente considerar que, tanto o modelo matemático proposto como a implementação numérica com a malha selecionada M<sub>2</sub>, estão validados experimentalmente. Porém, para assegurar a validação da malha e modelo em diferentes cenários, são propostas outras comparações com resultados experimentais obtidos por Daghrah (2017), variando-se alguns parâmetros operacionais, como a temperatura de entrada, vazão e potência dissipada. Por fim avalia-se os efeitos sobre o  $\delta T_{HS}$  em cada cenário:

- *Primeiro Cenário:* considera-se  $T_e$  igual a 55°C e 75°C para uma velocidade fixa de 0,3 m/s e  $Q = 1$  pu;
- *Segundo Cenário:* considera-se  $V_e$  igual a 0,2m/s e 0,3m/s, mantendo  $T_e = 60^\circ\text{C}$  e  $Q = 1$  pu;
- *Terceiro Cenário:* considera-se  $Q = 0,8$  pu e  $Q = 1,2$  pu, mantendo  $T_e = 60^\circ\text{C}$  e  $V_e = 0,3$  m/s.

A Figura 7.4 compara os resultados numéricos da malha  $M_2$  com os resultados experimentais para o *Primeiro Cenário*, sendo observada uma boa concordância entre os resultados com desvios menores do que  $2^\circ\text{C}$  em relação aos dados de Daghrah.

Figura 7.4 - Comparação elevações de temperatura nos discos, malha  $M_2$  e resultado experimental,  $V_e = 0,3\text{m/s}$  e  $Q=1\text{pu}$ : (a)  $T_e = 55^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_e = 75^\circ\text{C}$



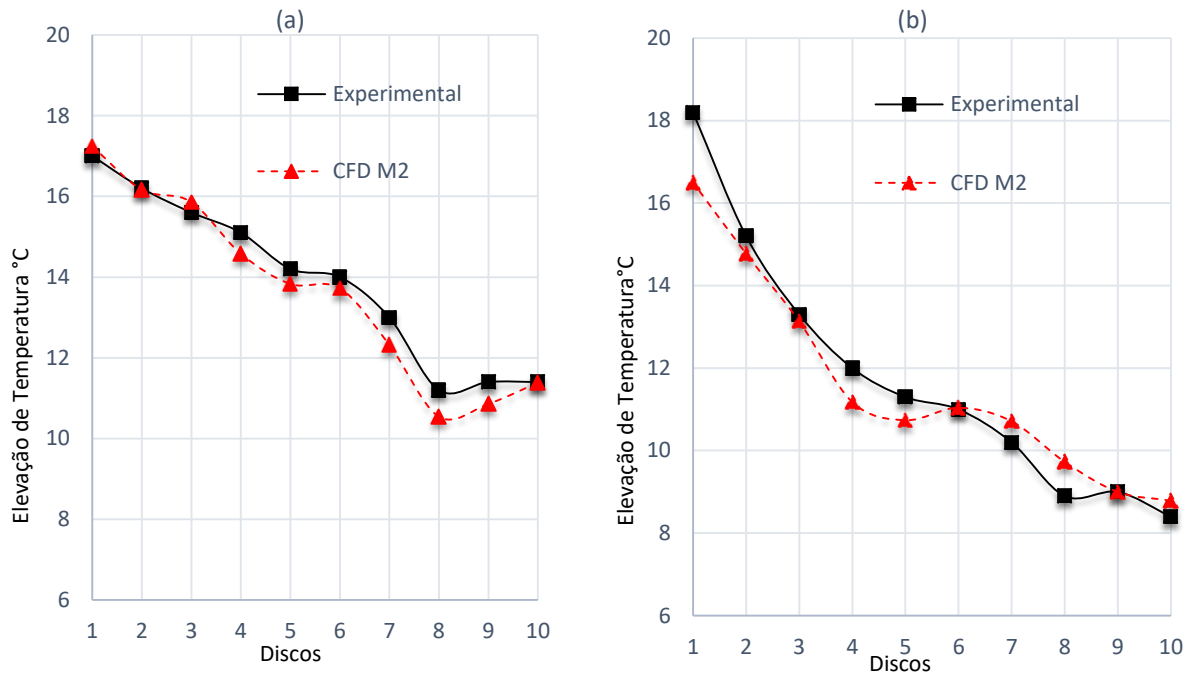
Fonte: autoria própria

Apesar de não haver uma estimativa de incerteza experimental, a variável  $\delta T_{HS}$  deve apresentar incertezas dessa ordem, uma vez que o termopar por si só possui incerteza de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Logo, entende-se que os resultados numéricos, ao se variar a condição de temperatura de entrada, são capazes de reproduzir as tendências e os valores experimentais.

A Figura 7.5 compara os resultados numéricos com a malha  $M_2$  com os resultados experimentais para o *Segundo Cenário*. Nota-se novamente uma boa concordância entre os resultados com desvios menores do que  $2^\circ\text{C}$  em relação aos dados de Daghrah. Para a velocidade de  $0,2\text{ m/s}$  o resultado a comparação é ainda melhor.

Portanto, ao variar-se a condição de velocidade de entrada, os resultados numéricos são capazes de reproduzir os valores experimentais com boa confiabilidade

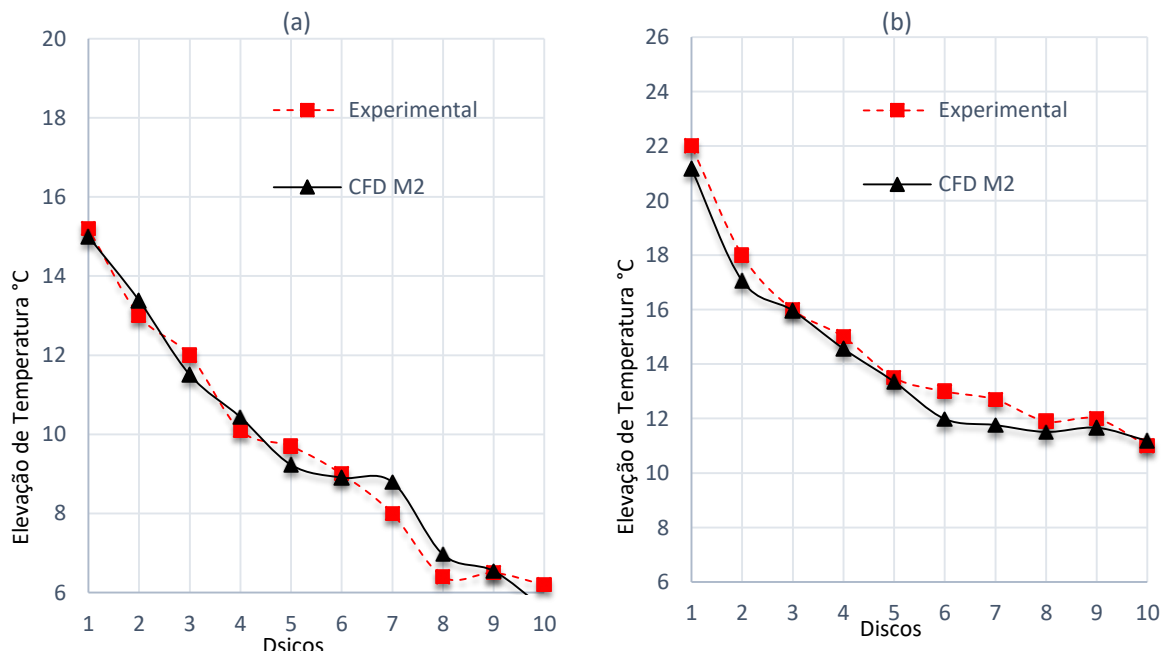
Figura 7.5 - Comparação elevações de temperatura nos discos, malha M2 e resultado experimental,  $T_e = 60^\circ\text{C}$  e  $Q = 1$  pu: (a)  $Ve = 0,2$  m/s; (b)  $Ve = 0,3$  m/s



Fonte: autoria própria

Por fim, a Figura 7.6 compara os resultados numéricos com a malha M2 com os resultados experimentais para o *Terceiro Cenário*.

Figura 7.6 - Comparação elevações de temperatura nos discos, malha M2 e resultado experimental,  $T_e = 60^\circ\text{C}$ ,  $Ve = 0,3$  m/s: (a)  $Q = 0.8$  pu; (b)  $Q = 1,2$  pu

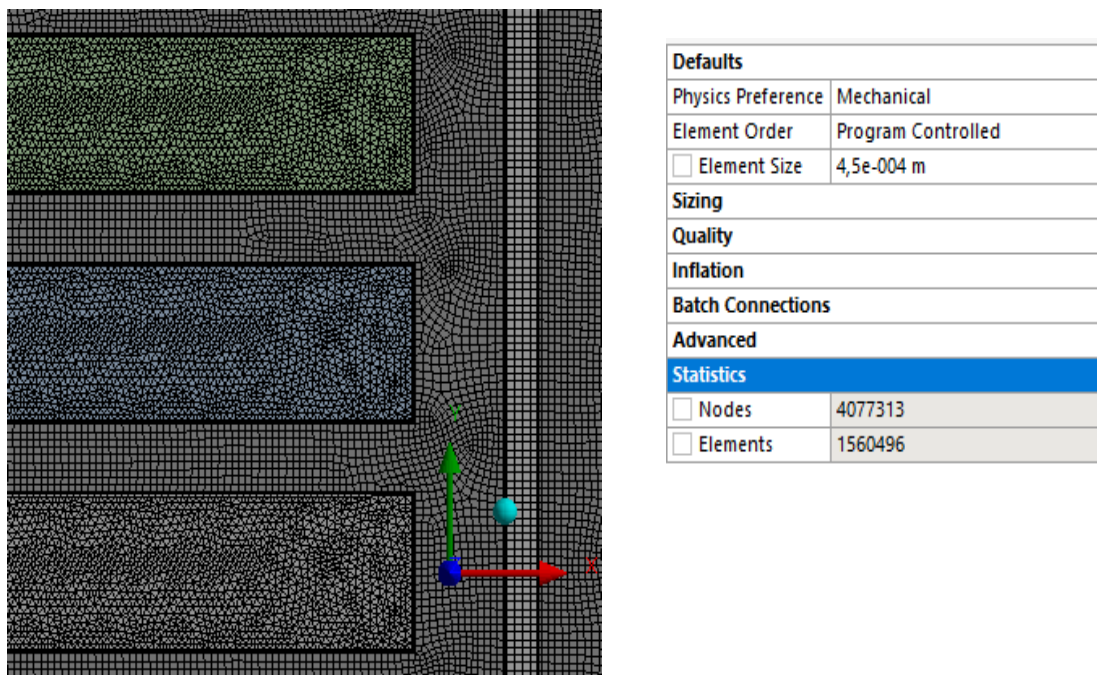


Fonte: autoria própria

Em ambos os casos, é observada uma excelente concordância entre os resultados, com resultados melhores do que os obtidos para 1 pu. Assim, ao variar-se a potência dissipada, os resultados numéricos são capazes de reproduzir os valores experimentais com boa confiabilidade.

Com base no GCI obtido, bem como pela comparação de diversos dados experimentais com os resultados numéricos obtidos para a malha  $M_2$ , pode-se afirmar que o modelo matemático proposto está validado e que a malha empregada está refinada o suficiente para assegurar a qualidade dos resultados numéricos. Por fim, pode-se aplicar a malha selecionada ao domínio de solução do TM1 em estudo, que possui dimensões e algumas características construtivas e operacionais diferentes do trabalho de Daghrach (2017). O domínio 2D foi subdividido em 1.560.496 elementos de mesmo tamanho dos de  $M_2$ , ou seja 0,00045m, como mostrado na Figura 7.7:

Figura 7.7 - Detalhe malha M2 para TM1 e estatística dos elementos.



Fonte: autoria própria

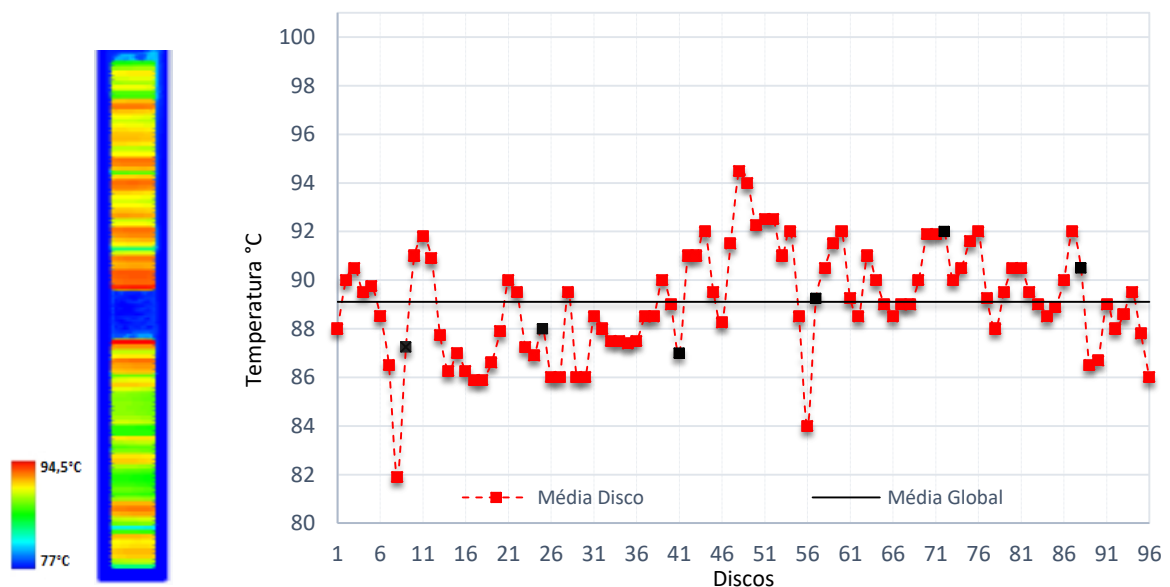
Basicamente foi implementada uma malha estruturada no domínio fluido aplicando o recurso de “inflation” (com Ground Rate =1,2) na região de fronteira sólido-fluido, com o objetivo de melhorar a representação da camada limite e o perfil de velocidade das partículas do fluido nessa região, de maneira análoga ao que fora implementado na malha validada. Com o refinamento proposto da malha  $M_2$ , aplicada aos domínios de estudo do TM1, todas as

simulações das sessões a seguir atingiram o critério de convergência (descrito no item 5.1.2) em cerca de 1h45min para cada cenário, usando um único processador.

## 7.2. Condições Nominais de Operação

As primeiras análises concentram-se em considerar o transformador em estudo (TM1) operando conforme suas condições nominais, bem como sendo geometricamente perfeito, sem defeitos de construção, de montagem ou de projeto. Na Figura 7.8, verifica-se o resultado a distribuição de temperatura média em cada disco ao longo da direção axial para essas condições. Ao lado, encontra-se o contorno gráfico, com escala em barra de cores de acordo com a grandeza medida, fornecido pelo Ansys-Fluent®, que permite uma identificação visual desta distribuição de temperatura ao longo de todo o enrolamento. Além disso, no gráfico de temperaturas à direita, os pontos em negrito indicam quais são os discos que antecedem cada guia de escoamento ao longo do enrolamento (Ver Figura 4.3). Foram consideradas:  $V_e$  fixado em 0,4 m/s; a temperatura de entrada do óleo em  $T_e = 77^\circ\text{C}$  e perda de energia uniforme equivalente a  $Q = 3534,90 \text{ W/m}^3$  por disco (equivalente a 1 pu na potência nominal de 25MVA).

Figura 7.8 - Distribuição de temperatura para condições normais e  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$ .



Fonte: autoria própria

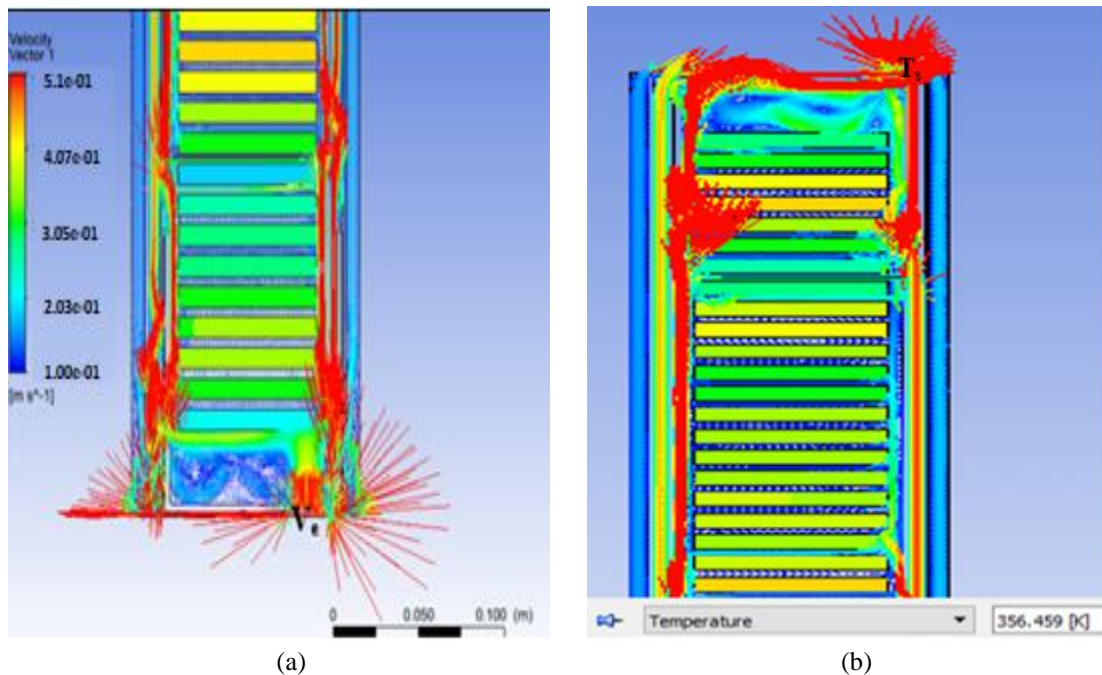
Sob as condições nominais pode-se observar que o ponto mais quente está localizado no disco 48 com  $94,5^\circ\text{C}$ . A maior elevação de temperatura esperada neste ponto é de  $15,7^\circ\text{C}$  (Tabela 5.1) ou seja,  $92,7^\circ\text{C}$ . Contudo, pode-se verificar uma elevação de  $17,5^\circ\text{C}$  em relação a  $T_e$ , ou seja,  $1,8^\circ\text{C}$  acima do esperado. Assumindo que o elemento sensor do fabricante apresenta



incerteza de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , os resultados podem ser considerados consistentes. Além disso, ao analisar os pontos de posicionamento das guias (sob destaque em **negrito** no gráfico) tem-se um indicativo que estes elementos podem evitar elevações bruscas em torno da média que é de  $89,1^\circ\text{C}$ . Nos discos do centro da bobina, 48 e 49, localizados no final do bloco 1 e início do bloco 2, respectivamente, percebem-se maiores temperaturas. O bloco 1, em geral, possui temperaturas menores do que as observadas no bloco 2. Isso deve-se ao fato deste primeiro bloco estar em contato com o óleo de arrefecimento em menores temperaturas na entrada. De maneira global, observa-se uma tendência de menores temperaturas nos discos inferiores e no topo da bobina.

Este comportamento pode ser associado a um maior escoamento de óleo nos dutos extremos do enrolamento, como fica evidenciado no traçado das linhas de fluxo e vetores (função *streamlines* e *vectors*) da Figura 7.9a para a base e Figura 7.9b para o topo.

Figura 7.9 - Traçado linhas de fluxo e vetores do escoamento: (a) detalhe base,  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$ ; (b) topo,  $T_s = 83,46^\circ\text{C}$ .



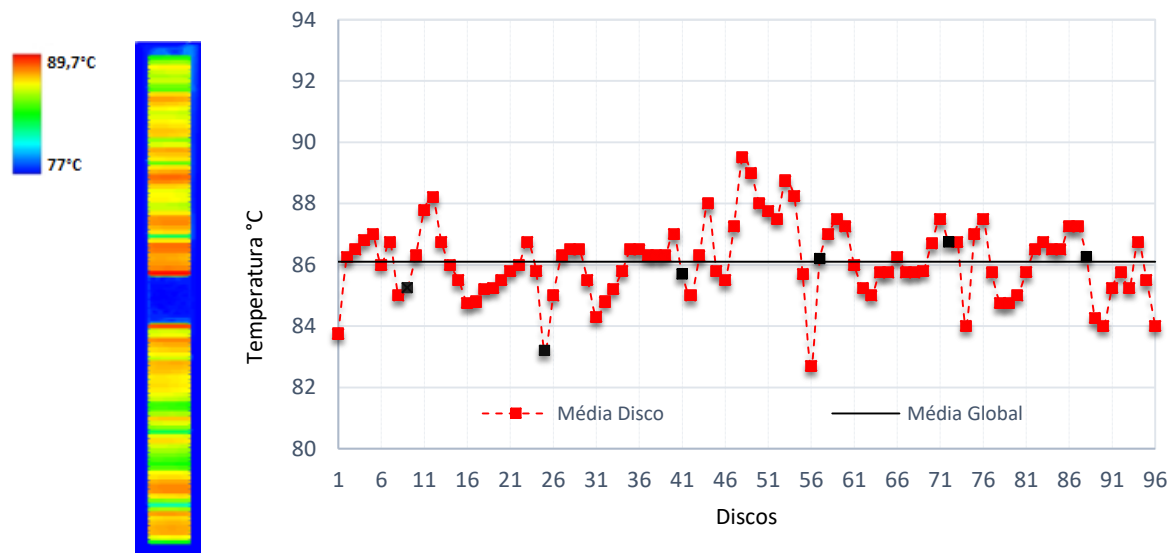
Fonte: autoria própria

Nesta análise, a elevação esperada da temperatura do topo do óleo é  $6,5^\circ\text{C}$ , (Tabela 5.1) o que corresponde a uma temperatura na saída de  $83,50^\circ\text{C}$ , enquanto a verificada na simulação foi  $T_s$  igual a  $83,46^\circ\text{C}$  ( $356,46 \text{ K}$  – função *probe*), também na Figura 7.9b. Por outra análise, a velocidade de operação máxima prevista pelo fabricante é de  $0,7 \text{ m/s}$ .

Estudos (Sens, 2002) apontam que para velocidades de entrada acima de 1 m/s há forte tendência de formação de cargas eletrostática em função do surgimento de vórtices na entrada do duto. Porém, torna-se interessante avaliar a velocidade de entrada em 0,7 m/s, sem modificar a geometria do transformador, e observar quais seriam os impactos sobre os perfis de temperatura.

A Figura 7.10 apresenta os resultados para essa condição, mantendo as demais nominais de temperatura ( $T_e = 77^\circ\text{C}$ ) e perdas uniformes ( $Q = 1$  pu).

Figura 7.10 - Distribuição de temperatura para condições normais e  $V_e = 0,7$  m/s.



Fonte: autoria própria

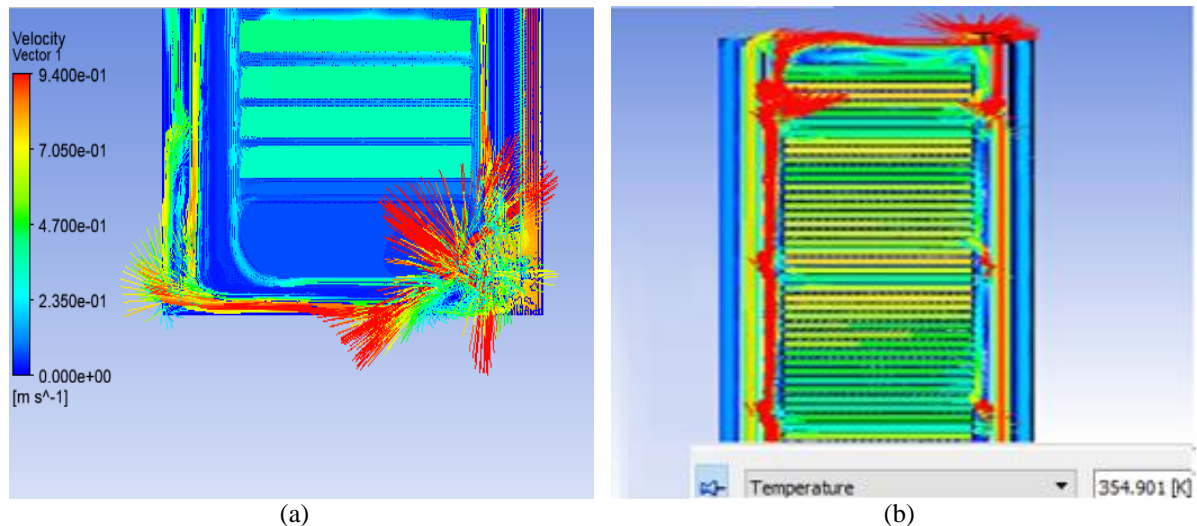
Comparando os resultados das Figura 7.8 e 7.10, nota-se similaridades, mas em velocidades de entrada mais altas obtém-se, primeiramente, uma redução da temperatura média. No presente resultado, a temperatura média sofre redução de  $89,1^\circ\text{C}$  (0,4 m/s) para  $86,1^\circ\text{C}$  (0,7 m/s).

Em sequência, nota-se que uma maior velocidade, e conseqüentemente maior vazão, tende a garantir que o fluido de arrefecimento escoe por todo transformador a uma menor temperatura média. A respeito do ponto mais quente, este se mantém no disco 48, mas a uma temperatura de  $89,5^\circ\text{C}$ . Logo, a elevação de temperatura é consideravelmente menor neste ponto em relação à configuração anterior. Observando os vetores de velocidade, na Figura 7.11a para a entrada e Figura 7.11b para o topo, nota-se o óleo de arrefecimento tem uma temperatura de saída mais baixa, com  $81,90^\circ\text{C}$  (354,9 K), em relação à  $V_e$  em 0,4 m/s. Na figura verifica-se

ainda que há regiões em que o escoamento de óleo chega a 0,94 m/s, valores muito próximos do limite recomendado por IEEE 1538 (2000), que é de 1 m/s.

O registro desses vetores justifica a recomendação do fabricante em limitar a velocidade de entrada em 0,7 m/s, mantendo as condições seguras para os campos de velocidade.

Figura 7.11 - Traçado linhas de fluxo do escoamento: (a) detalhe base com  $V_e = 0,7$  m/s ; (b) detalhe topo,  $T_s = 81,90^\circ\text{C}$ .



Fonte: autoria própria

Por fim, como esperado, em nenhuma das duas condições analisadas (0,4 m/s e 0,7 m/s) verificou-se elevação de temperatura acima do recomendável nos discos inferiores do bloco 1 que explicasse algum ponto de falha verificado no transformador inspecionado TM1. Isto leva a crer que é possível que alguma imperfeição operacional ou construtiva tenha desencadeado uma série de eventos que levaram o transformador TM1 a um sinistro. Neste contexto, a sequência deste trabalho concentra-se na imposição artificial dessas imperfeições e na análise dos seus efeitos sobre o desempenho térmico do transformador.

### 7.3. Condições Não-Nominais de Operação Impostas Artificialmente

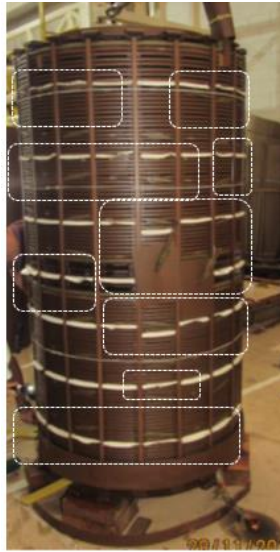
Nesta sessão são impostas artificialmente oito diferentes cenários com condições não-nominais e imperfeições estruturais, impostas artificialmente no software, que supostamente podem impactar o desempenho térmico do TM1.

#### 7.3.1. Cenário 1 - Deformação das Guias de Óleo

O Cenário 1 considera a possível influência dos desvios geométricos das guias de escoamento de óleo ao longo do arranjo dos 96 segmentos de discos. O posicionamento correto das guias de óleo é fundamental para garantir a circulação adequada do óleo ao longo dos dutos

do enrolamento e para a limitação da velocidade de passagem do óleo. Guias mal posicionadas ou com dimensões diferentes dos padrões podem afetar diretamente os perfis de temperatura como demonstrado por Yaqoob (2013) e Zhang *et al*, (2017). A Figura 7.12 demonstra a condição das guias durante a inspeção visual do enrolamento de AT do TM1. Pela imagem, fica evidente a presença de um número considerável de guias deformadas ao longo da coluna.

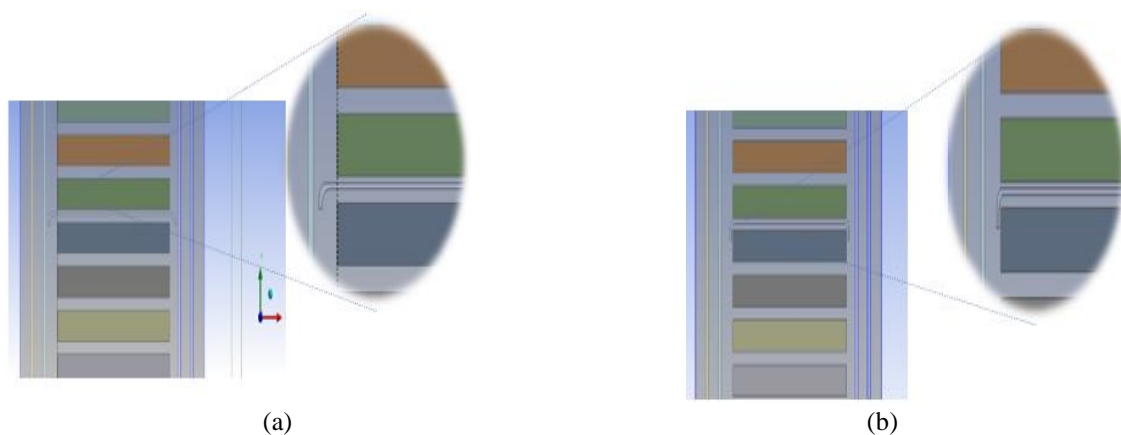
Figura 7.12 - Enrolamento AT de TM1 com guias de escoamento deformadas



Fonte: autoria própria

Nesse sentido, a proposta deste cenário busca reproduzir tal condição e identificar o seu grau de influência sobre o perfil de temperatura original. A Figura 7.13a apresenta o destaque para o posicionamento original das guias de óleo, e a Figura 7.13b mostra como esse deslocamento foi reproduzido, sendo tomada uma deformação das guias com redução de 3,5 mm nas abas.

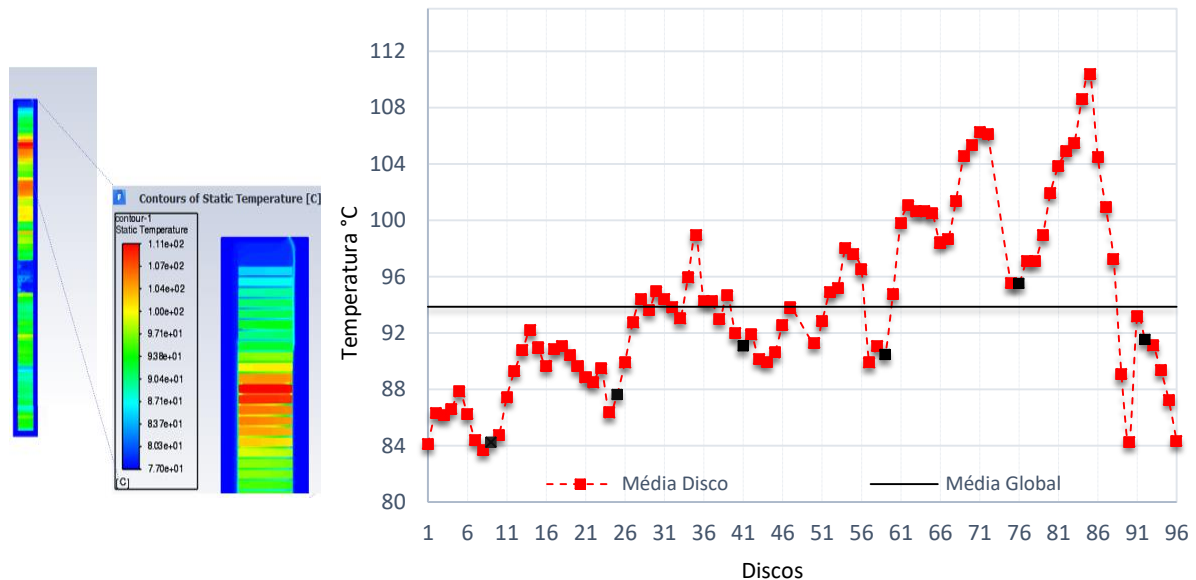
Figura 7.13 - Deformação das dimensões das guias: (a) posicionamento correto; (b) guia deformada.



Fonte: autoria própria

A Figura 7.14 apresenta o perfil de temperatura obtido para velocidade de entrada de 0,4 m/s e demais condições, conforme Tabela 7.1. O contorno gráfico à direita traz o destaque para a região do bloco 2, com indicação de maiores temperaturas.

Figura 7.14 - Distribuição de temperatura – Cenário 1:  $V_e=0,4\text{m/s}$ .

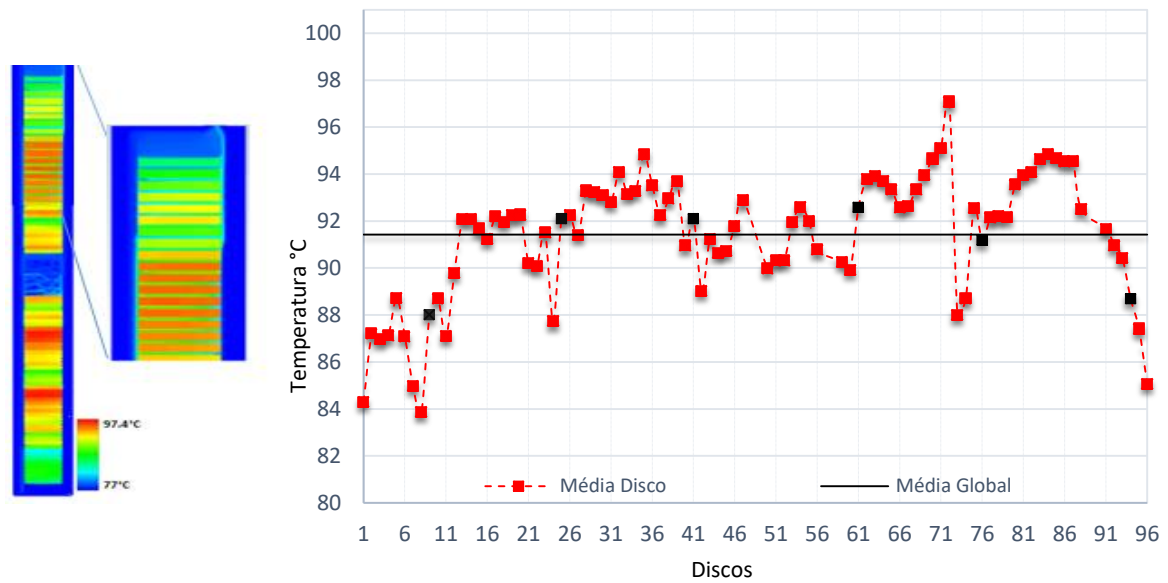


Fonte: autoria própria

À velocidade  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$ , verifica-se um deslocamento do ponto mais quente para o disco 85, em relação ao nominal (Figura 7.9), chegando a  $110,38^\circ\text{C}$ . A temperatura média chega à casa dos  $93,86^\circ\text{C}$ . Portanto, o desempenho térmico do transformador é diretamente impactado por esse tipo de falha estrutural das guias. A partir de  $105^\circ\text{C}$ , geralmente as concessionárias utilizam funcionalidades do indicador digital de temperatura para emissão de alarmes para os centros de monitoramento, informando que os valores medidos estão próximos dos limites admissíveis da Tabela 2.1, e que, portanto, o transformador por vir a falhar.

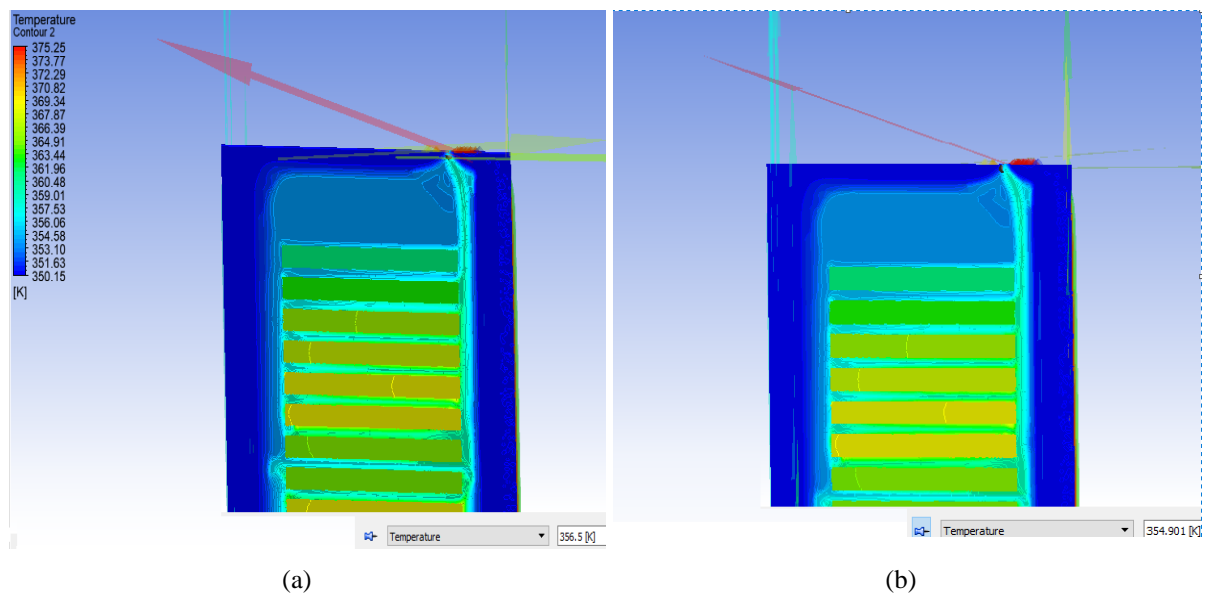
A Figura 7.15 traz os resultados deste cenário imposto para velocidade de entrada  $V_e = 0,7 \text{ m/s}$  mantendo os demais parâmetros inalterados. Neste caso, observa-se que o ponto mais quente fica agora localizado no disco 72, com intensidade de  $97,09^\circ\text{C}$ , apresentando queda expressiva de temperatura, em relação à condição de entrada com  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$ , quando a temperatura neste disco era de  $106,13^\circ\text{C}$ .

No entanto, as quedas mais acentuadas ocorreram nos discos 8, 24, 73 e 90. Nesta configuração, a temperatura de  $105^\circ\text{C}$  não é superada em nenhum disco e há uma redução da temperatura média global, em relação a  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$ , para  $91,42^\circ\text{C}$ .

Figura 7.15 - Distribuição de temperatura – Cenário 1:  $V_e = 0,7$  m/s.

Fonte: autoria própria

Por fim, e não menos importante, observa-se que a temperatura de saída do óleo é comprovadamente mantida nos mesmos patamares da configuração nominal,  $83,5^{\circ}\text{C}$  para  $0,4$  m/s, Figura 7.16a, e  $81,90^{\circ}\text{C}$  para  $0,7$  m/s, Figura 7.16b. Assim, conforme esperado, nota-se que alterações estruturais não devem afetar a temperatura de saída do óleo em relação às condições nominais.

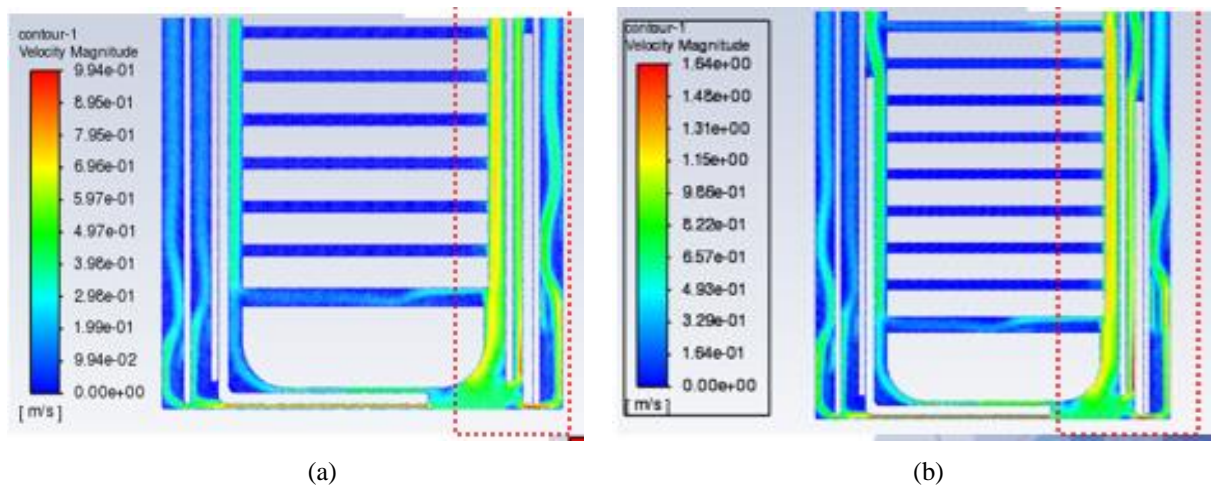
Figura 7.16 - Contorno temperatura de saída - Cenário 1: (a)  $V_e = 0,4\text{m/s}$  ; (b)  $V_e = 0,7\text{m/s}$ .

Fonte: autoria própria

As elevações de temperatura para este cenário, nas duas velocidades de entrada, ao serem comparados com os resultados em condições nominais, podem ser explicados pela má distribuição de fluxo ocasionada pela sobreposição das guias, o que restringe em alguns pontos o contato entre o óleo de arrefecimento e o disco. Isso faz com que a temperatura local do disco aumente, elevando as temperaturas médias, intensidades e locais dos pontos mais quentes.

Por fim, pode-se avaliar a influência das guias deformadas sobre o campo de velocidade ao longo dos discos, que é diferente entre as várias seções do enrolamento. Após uma análise inicial dos resultados, selecionaram-se as regiões mais críticas. Os campos de velocidades da Figura 7.17a, para a velocidade de entrada de 0,4 m/s, detalham as regiões mais críticas que estão na base do enrolamento: (i) próximos à entrada; (ii) entre os 8 primeiros discos e, (iii) o duto vertical direito. Note que há regiões em que o escoamento de óleo chega a 0,79 m/s. Por sua vez, a Figura 7.17b para velocidade de entrada de 0,7 m/s, notam-se valores acima do limite recomendado por IEEE 1538 (2000), que é de 1 m/s, chegando a aproximadamente 1,3 m/s. A extrapolação do limite de velocidades de escoamento pode resultar em uma elevação da *Tendência de Carregamento Eletrostático* –TCE, como abordado na seção 2.6, porém os efeitos multifísicos desse fenômeno não serão objeto de simulação neste estudo, mas devem ser tomados como fatores de risco para falhas.

Figura 7.17 - Campos de velocidade Cenário 1: (a)  $V_e = 0,4$  m/s; (b)  $V_e = 0,7$  m/s

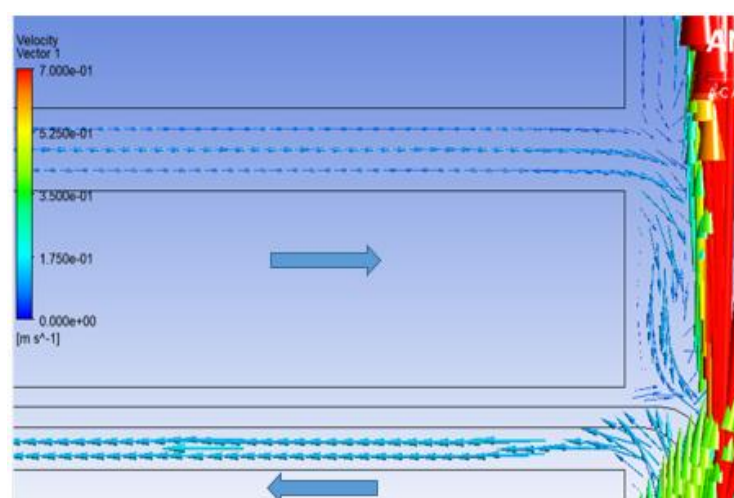


Fonte: autoria própria

Outro destaque interessante deste cenário é a ocorrência do fluxo reverso para as duas velocidades simuladas, conforme mostra a Figura 7.18 para 0,4 m/s. O fluxo reverso se caracteriza pela presença de velocidades de escoamento em diferentes orientações, ou simplesmente ao apresentar valores positivos e negativos dentro de uma passagem horizontal,

conforme ilustra a figura. A ocorrência do fluxo reverso pode afetar o perfil de velocidade no duto axial e evitar que o óleo entre no primeiro canal horizontal da passagem a jusante. Além disso, uma região de baixa pressão gerada perto das guias pode aspirar parte do óleo que flui no segundo canal horizontal e redirecioná-lo para o primeiro duto (em vez de deixá-lo fluir na ascendente). Esses efeitos contribuem para uma troca de calor menos efetiva deteriorando o desempenho térmico do sistema de arrefecimento do transformador.

Figura 7.18 - Fluxo reverso canal horizontal para velocidade  $V_e = 0,4$  m/s.



Fonte: autoria própria

Por fim, os resultados apresentados no Cenário 1 acarretam um impacto considerável sobre o desempenho térmico do transformador e podem explicar alguns casos de falhas. Porém, nota-se que na região do disco 1 e 2, local da falha em estudo no TM1, não se verificou extrapolação dos limites da temperatura. Assim, a imperfeição inserida nesse cenário pode ter auxiliado na redução da vida útil do TM1, porém não seria o principal motivo do sinistro.

### 7.3.2. Cenário 2 - Deslocamento dos Discos

O Cenário 2 considera uma alteração da altura do duto de arrefecimento horizontal entre os discos 1 a 4, reduzindo de 4 mm e para 2 mm. A ABNT NBR 5356-16:2018 restringe a espessura radial dos dutos entre discos, proporcionada pelos espaçadores entre discos, de tal modo que ela não deve ser menor que 3 mm. Contudo, o deslocamento de discos pode ser um comportamento característico de ações de esforços mecânicos, de origem eletromagnética, quando os enrolamentos são submetidos a curtos-circuitos de alta intensidade ou surtos de manobras (transformadores conectados em paralelo, correntes de magnetização, conexões de bancos de capacitores). As normas brasileiras estabelecem limites máximos de amplitude e duração de um curto-circuito simétrico e assimétrico. Por outro lado, tais valores podem



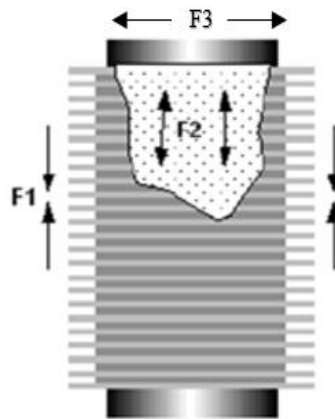
eventualmente ser excedidos quando ocorrem curtos-circuitos de alta energia cujas proteções do transformador não atuam num tempo suficientemente curto ou falham.

Durante os esforços, os discos tendem a cisalhar os espaçadores, reduzindo os espaços entre discos. Esses efeitos, por sua natureza dinâmica, podem comprometer os sólidos isolantes, tanto mecanicamente quanto a sua capacidade dielétrica, submetendo as bobinas ao colapso.

A estrutura de prensagem das bobinas fornece à parte ativa considerável resistência mecânica, tendo em vista que os esforços dinâmicos têm força atuante sobre os condutores proporcional ao quadrado da corrente durante o curto (BRECHARA, 2010). Desse modo, o equipamento pode ser submetido tanto a deformações elásticas, ou seja, reversíveis e que não necessariamente impliquem em mudança estrutural das bobinas; quanto plásticas, irreversíveis, que podem promover o deslocamento e quebra dos suportes isolantes, espaçadores e calços.

Os esforços, por sua vez, são resultantes de forças atuantes nos enrolamentos, decompostas basicamente em dois tipos: as axiais ( $F_1$  e  $F_2$ ), que surgem devido às componentes não perpendiculares do campo magnético  $\vec{B}$  (Maschio *et al*, 2020); e as radiais ( $F_3$ ), que devido às correntes circulantes em sentidos opostos, são de repulsão. A Figura 7.19 demonstra essas forças atuantes nos enrolamentos.

Figura 7.19 - Esforços de compressão e expansão por efeito eletrodinâmicos.



Fonte: IEEE (1991, p.25-42) adaptado.

Nesta figura, em  $F_1$  os esforços de compressão axial atuam em direção ao centro dos enrolamentos e provocam o deslocamento dos condutores. Estes esforços são maiores nas extremidades das bobinas, onde há ação intensa da componente radial do campo magnético. Em  $F_2$  tem-se os esforços de expansão axial, que atuam em direção aos elementos de prensagem de blocos de bobinas (julgos e anéis de prensagem), provocando o deslocamento e quebra de partes com possibilidade de danos ao núcleo em função de contatos dos discos energizados. De

maneira análoga, a frequência de oscilação da componente alternada das correntes de curto circuito leva  $F_3$  a movimentos alternados radialmente e com uma característica vibratória dos discos, que podem afetar os componentes estruturais do enrolamento, caso os enrolamentos não sejam projetadas adequadamente.

A intensidade desses esforços depende, além das correntes de curto-circuito presumidas, da simetria dos canais entre os discos e do alinhamento das bobinas em relação ao núcleo. Eventuais assimetrias podem ser verificadas durante os testes de fábrica, por meio de ensaios de resposta em frequência - SFRA (do inglês *Sweep Frequency Response Analysis*), que é uma técnica não-intrusiva destinada a identificar, por meio das frequências naturais de oscilação dos enrolamentos, discrepância de impedâncias terminais entre os enrolamentos, como resultado de possíveis deslocamentos entre bobinas, deformações no núcleo ou trechos em curto-circuito. Segundo Ishii (2019), pelas experiências dos fabricantes de equipamentos de SFRA, desvios nas curvas na frequência abaixo de 2 kHz podem ser indicadores de falhas dessas natureza.

A Tabela 7.1 apresenta um modelo de memorial de cálculo sobre a capacidade de suportar esforços mecânicos para os enrolamentos durante o efeito eletrodinâmico de curto-circuito para um transformador de 25 MVA com três enrolamentos:

Tabela 7.1 - Memorial de cálculo de suportabilidade a esforços por curto-circuito

Para Forças Radiais	Unidade	Enrolamentos		
		RAT	AT	BT
Componente Resistiva da Impedância - X	%	1,116	1,116	1,116
Componente Indutiva da Impedância - R	%	19,97	19,97	19,97
Corrente de Curto-Circuito Assimétrica	kA	0,876	0,876	5,46
Máxima Corrente de Fase /Espira	A	67,1	67,1	418,37
Número de Espiras para Máxima Corrente	espiras	286	1419	410
Número de Fios por Espira	fios	13	30	7
Medidas Enrolamento Vista Radial	mm	35	81	50
Diâmetro de Bobina	mm	926	720	497
Limite de Elasticidade do Fio	N/mm <sup>2</sup>	60	90	90
Suportabilidade a Esforços	N/mm <sup>2</sup>	64	81	46
Força Média	N	76,3	572	2415
Tensão Mec. Específica	N/mm <sup>2</sup>	1,4	24,5	17,3
<b>Para Forças Axiais</b>				
Forças de Compressão para Enrolamento Axissimétrico	t	5	56,6	57,2
Máxima força para os julgos (inf. e sup.)	t		44,3	0,1

Fonte: Cemig (2012a), adaptado.

A avaria mostrada Figura 7.20 se refere a um transformador de projeto semelhante ao do TM1, porém com derivações: 138x69-24,5x13,8 kV. Na imagem observa-se que a deformação dos enrolamentos provocou a quebra de elementos de prensagem, curto entre espiras e curto entre os discos e núcleo magnético do enrolamento de RAT, com comprometimento dos demais de AT e BT.

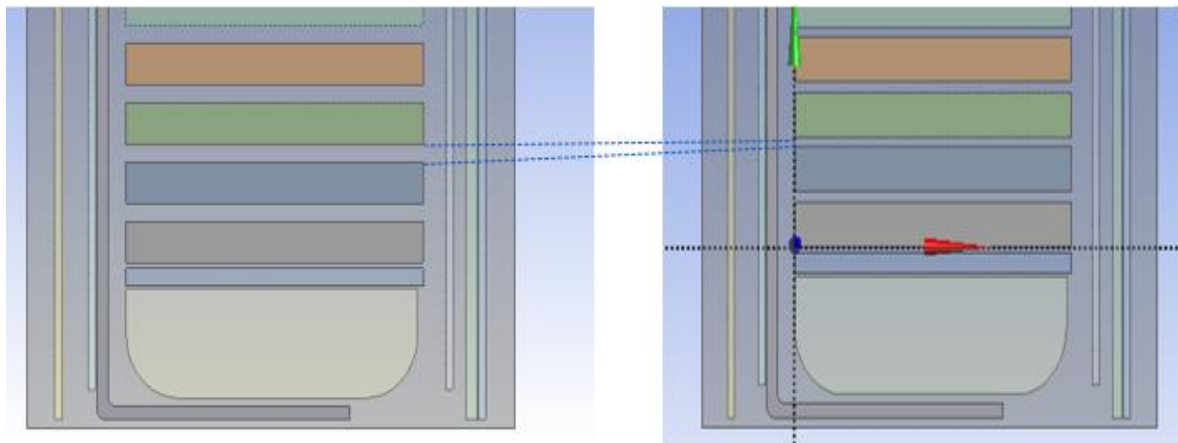
Figura 7.20 - Bobina RAT em falha com deformação e curto-circuito entre espiras.



Fonte: autoria própria

Assim sendo, a simulação efetuada neste cenário procura reproduzir as condições de esforços e deslocamentos, o que resultaria na redução das alturas dos canais entre discos 1 e 4 do primeiro bloco da bobina, como mostrado na Figura 7.21, com implicações fluidodinâmicas importantes a ponto de comprometer as trocas térmicas na base do enrolamentos, ponto central da investigação.

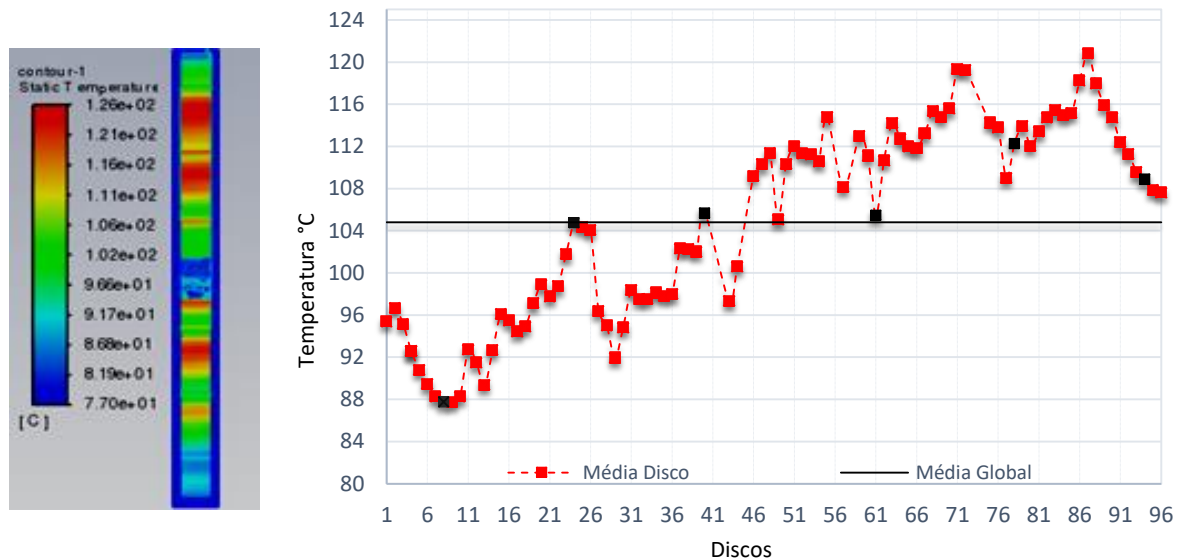
Figura 7.21 - Alteração da geometria de TM1 com redução dos canais entre discos considerado no Cenário 2.



Fonte: autoria própria

O perfil de temperatura para as condições de  $T_e$  mantida em  $77^\circ\text{C}$ , enquanto  $V_e$  é fixado em  $0,4 \text{ m/s}$  e as perdas configuradas em  $Q = 1 \text{ pu}$ , mostrado na Figura 7.22.

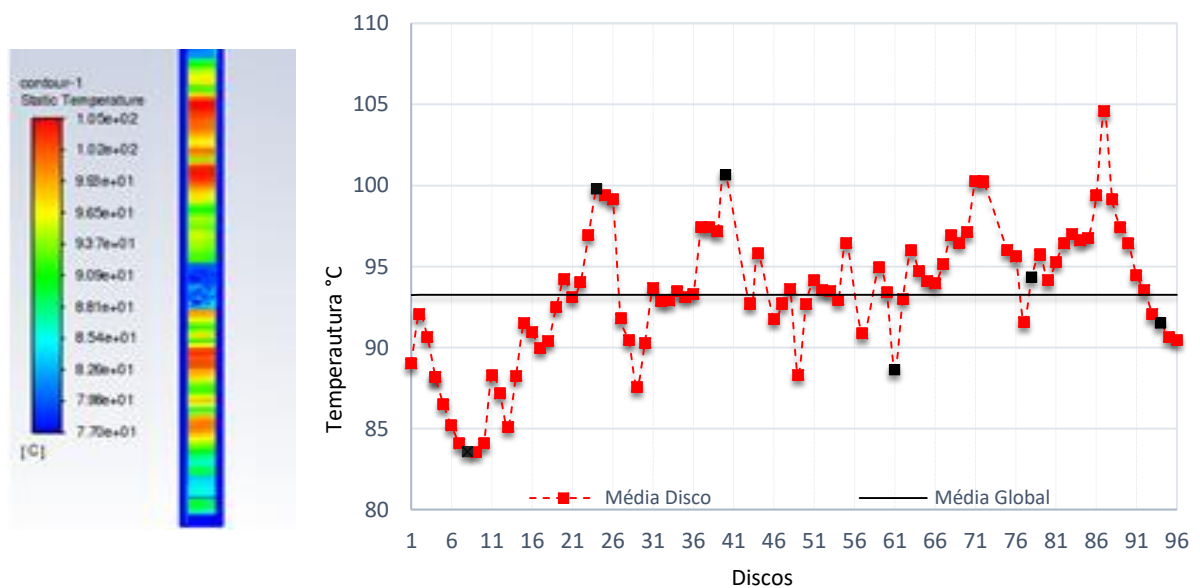
Figura 7.22 - Distribuição de temperatura – Cenário 2 -  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$



Fonte: autoria própria

Os resultados mostram que, com  $V_e = 0,4 \text{ m/s}$ , o ponto mais quente ocorre no disco 87 como  $120,88^\circ\text{C}$ . Essa condição excede os limites da Figura 7.23, porém não poderia ser associado a um sobreaquecimento estabelecido nos discos 1 e 2, ponto de falha do TM1. A temperatura média verificada foi de  $104,80^\circ\text{C}$ . A Figura 7.23, por sua vez, apresenta resultados para  $V_e$  de  $0,7 \text{ m/s}$ , mantendo as demais condições inalteradas.

Figura 7.23 - Distribuição de temperatura – Cenário 2 -  $V_e = 0,7 \text{ m/s}$



Fonte: autoria própria

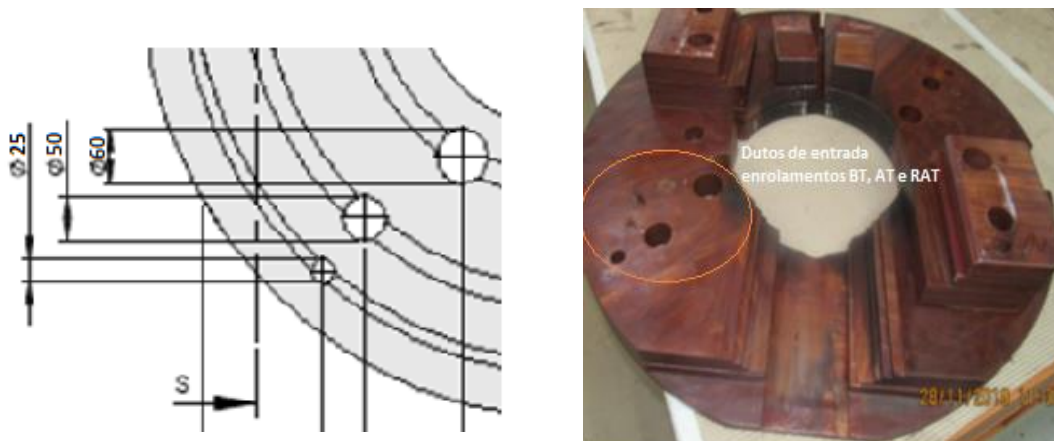
Na condição para  $V_e = 0,7$  m/s a simulação também apresenta uma elevação de temperatura em praticamente todos os discos, sendo o ponto mais quente localizado no disco 87, com  $104,60$  °C. A temperatura média verificada foi de  $93,25$ °C, uma queda importante em relação à velocidade anterior  $V_e = 0,4$  m/s, porém uma elevação de mais de  $6$ °C em relação à nominal. Portanto, os resultados do Cenário 2, isoladamente, poderiam explicar ocorrências de falhas em transformadores de natureza eletrodinâmica, no entanto, não geram preocupação em relação aos limites de temperatura, tão pouco poderiam ser associados a uma falha local na base da bobina, como no TM1.

Outros modos de falha envolvendo fenômenos de natureza eletromagnética transitória de alta frequência (causada por curtos circuitos na rede elétrica), ou de natureza dielétrica associados à ressonância interna dos enrolamentos, podem ser desenvolvidos em modelos futuros mais específicos, complementando simulações fluidodinâmicas com as de mecânica estrutural e de campos eletromagnéticos, permitindo uma abordagem multifísica mais integrada.

### 7.3.3. Cenário 3 - Obstrução de Entrada

O Cenário 3 refere-se a uma possibilidade de obstrução dos dutos de entrada de óleo de arrefecimento na bobina, decorrente do mal posicionamento de uma ou mais bobinas em relação aos anéis de compressão, impedindo parte da seção transversal do canal. A Figura 7.24 apresenta os anéis para as três colunas de enrolamentos, com destaque para os dutos de entrada de óleo impressos no anel. Cada duto entrada dos enrolamentos de BT, AT e RAT têm respectivamente os diâmetros de 60, 50 e 25 mm (do mais interno para o mais externo) e são montados tanto na base quanto no topo do enrolamento.

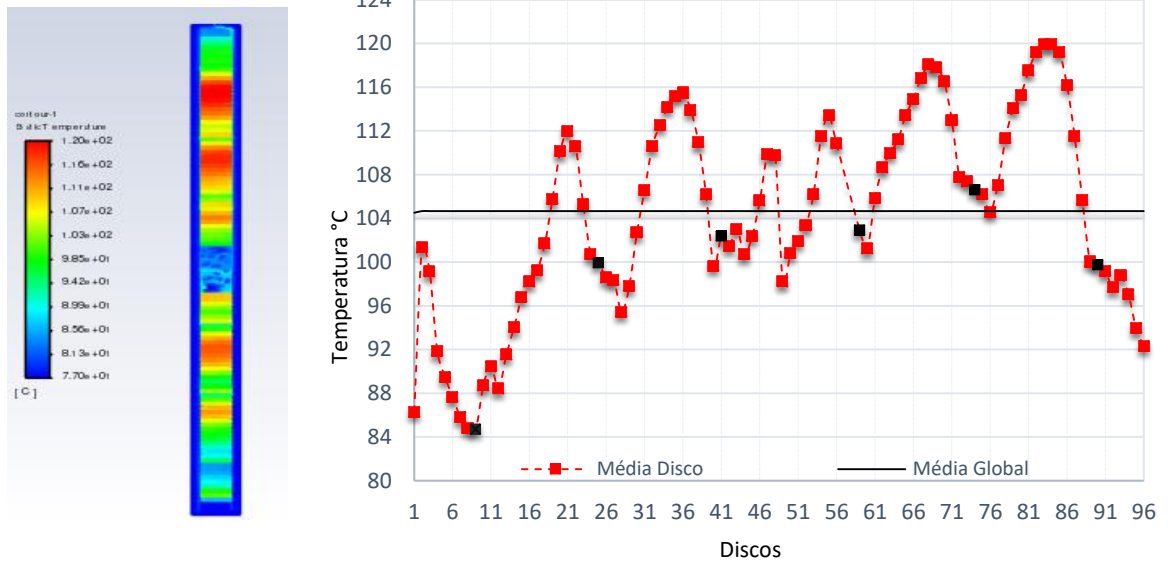
Figura 7.24 - Dutos de entrada de óleo e anéis prensagem inferiores.



Fonte: autoria própria

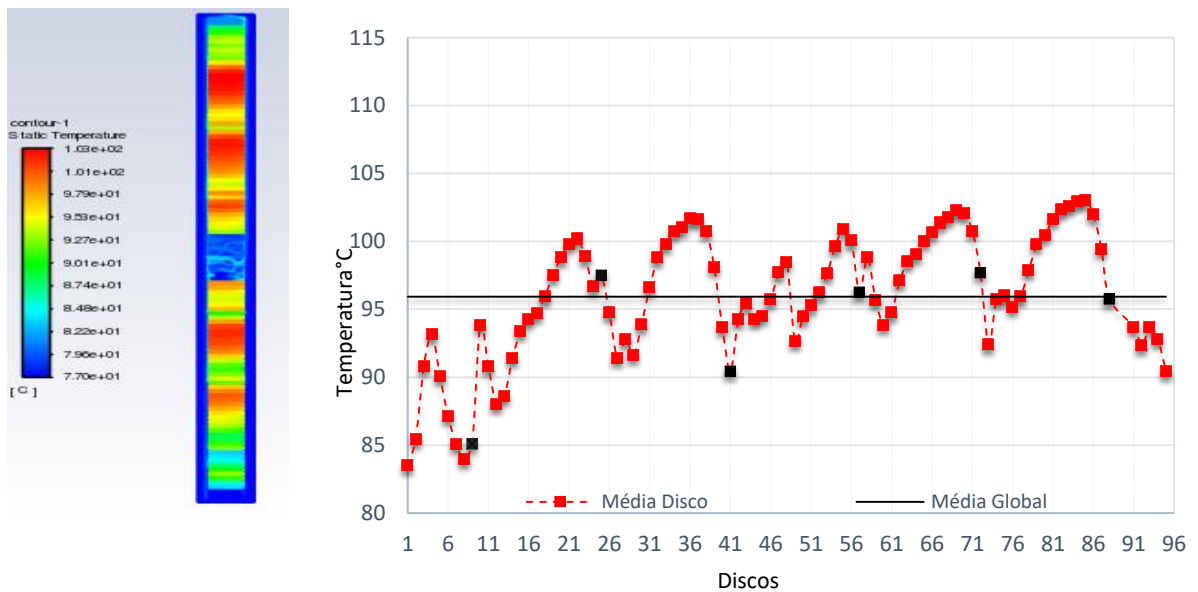
Na simulação do Cenário 3 foi considerada uma obstrução parcial de 40 % do diâmetro do duto de entrada do enrolamento de AT. A obstrução, por sua vez, foi implementada alterando-se as medidas do “Inlet” definidas no módulo de desenho CAD “Design Modeler”. A Figura 7.25 apresenta o perfil de temperaturas médias nos discos para  $V_e$  de 0,4 m/s,  $T_e$  em 77°C e Q em 1 pu, enquanto a Figura 7.25 considera  $V_e$  de 0,7 m/s.

Figura 7.25 - Distribuição de temperatura – Cenário 3 -  $V_e = 0,4$  m/s.



Fonte: autoria própria

Figura 7.26 - Distribuição de temperatura – Cenário 3 -  $V_e = 0,7$  m/s.



Fonte: autoria própria

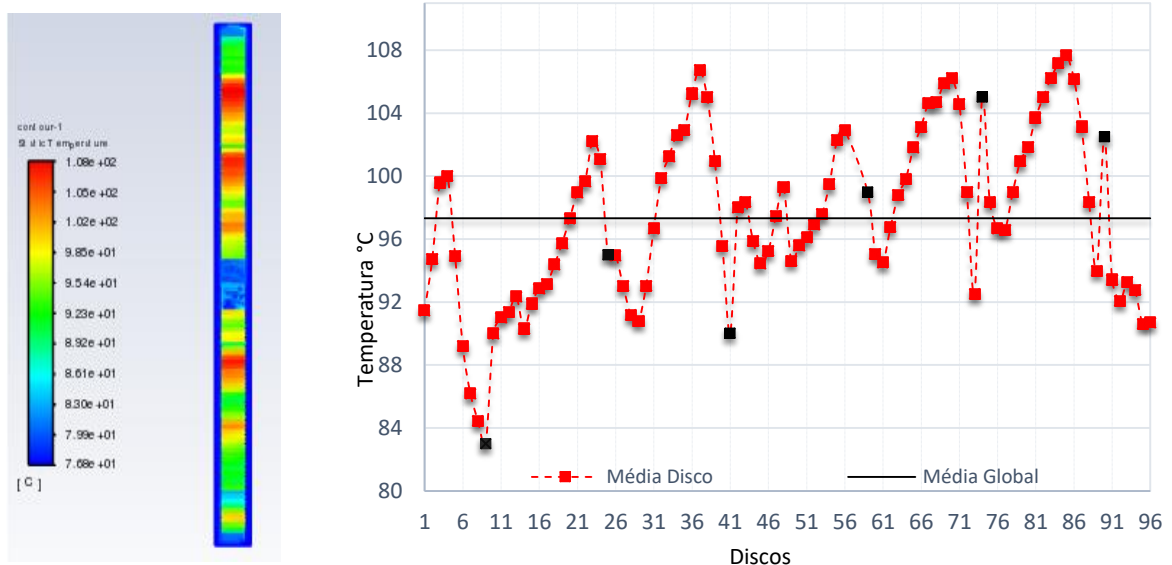
Para  $V_e$  de 0,4 m/s, nota-se um aumento acentuado na temperatura média do disco 2, o que não havia sido observado nos cenários anteriores, chegando a 101,3°C. O ponto mais quente está no bloco 2, com temperaturas de 119,94°C no disco 84, enquanto a temperatura média global nos discos foi de 104,67°C. Enquanto para  $V_e$  de 0,7 m/s, o disco 2 não apresenta temperaturas elevadas, e o ponto mais quente está localizado no disco 85 a 103,03°C e a temperatura média global foi de 95,92°C.

Apesar das notórias elevações de temperatura em trono da média global, especialmente no caso de  $V_e$  em 0,4 m/s, em ambas as condições, não houve extrapolação dos limites de temperatura em ambos os blocos do enrolamento. Por outro lado, o Cenário 3 indica uma influência potencial no local da falha do TM1. Assim, juntamente com outros fatores, a obstrução parcial do duto de entrada pode colaborar para a o aumento da temperatura nos primeiros discos da bobina de AT.

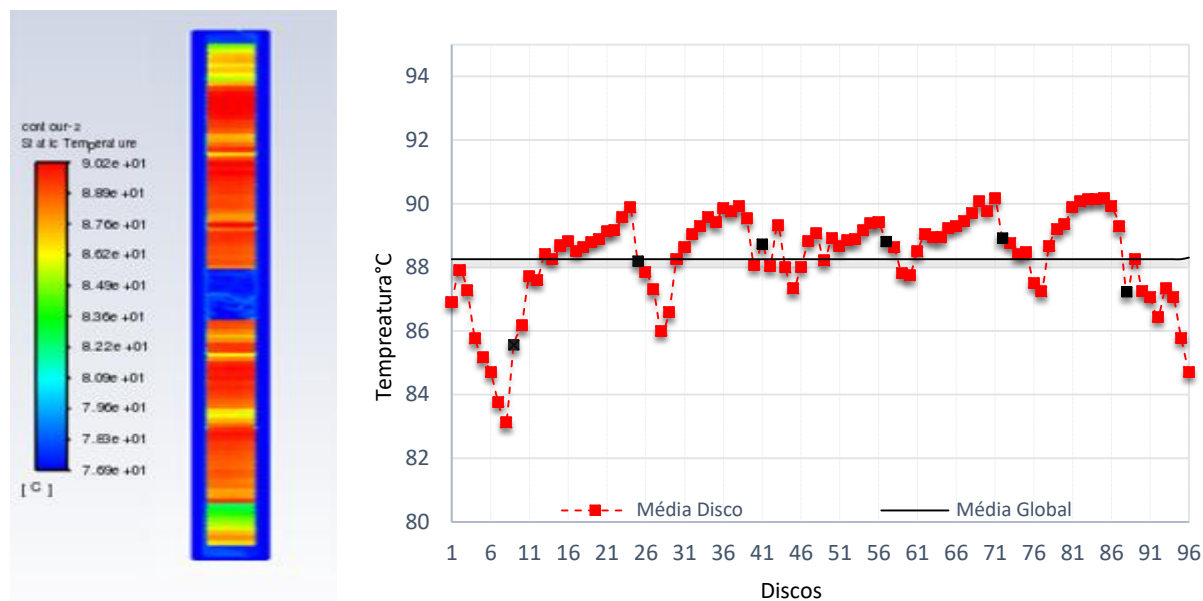
#### 7.3.4. Cenário 4 - Obstrução de Saída

De maneira similar ao Cenário 3, o Cenário 4 propõe uma obstrução parcial dos dutos de saída, os quais possuem as mesmas características e dimensões que os dutos de entrada. A Figura 7.27 apresenta o perfil de temperaturas médias nos discos para  $V_e$  em 0,4 m/s,  $T_e$  de 77°C e  $Q$  em 1 pu. A Figura 7.28 varia apenas  $V_e$  para 0,7 m/s. Para  $V_e$  de 0,4 m/s e 0,7 m/s, respectivamente, o ponto mais quente foi verificado no disco 85 a 107,67°C e 90,15°C, com temperaturas médias no enrolamento iguais a 97,33°C e 88,25°C

Figura 7.27 - Distribuição de temperatura – Cenário 4 –  $V_e = 0.4\text{m/s}$ .



Fonte: autoria própria

Figura 7.28 - Distribuição de temperatura – Cenário 4 –  $V_e = 0,7$  m/s.

Fonte: autoria própria

Comparativamente com o Cenário 3, nota-se primeiramente que a obstrução do duto de saída causa um menor sobreaquecimento do longo do transformador, resultando em menores temperaturas médias e intensidades dos pontos mais quentes em relação à condição nominal. Logo, o Cenário 4 traz impactos menos importantes sobre o desempenho térmico do transformador em relação a todos os cenários anteriores.

Notoriamente, esse cenário não explica o sinistro observado nos discos 1 e 2 em TM1, tão pouco suas temperaturas estão acima dos limites da norma, sendo o maior valor verificado no disco 2 em 94,72 °C, para o  $V_e = 0,4$  m/s. Porém, não descarta uma necessidade em relação à atenção sobre o posicionamento dos anéis de prensagem em correto alinhamento com os dutos.

### 7.3.5. Cenário 5 – Deslocamento da Capa Base

O Cenário 5 prevê uma alteração do canal vertical por meio do reposicionamento da capa base, que é responsável por melhorar o isolamento para núcleo e direcionar o óleo para os dutos verticais. Esse cenário pode ser estabelecido, eventualmente, durante um processo de montagem falho, forçando uma provável estagnação de óleo na base do enrolamento. A Figura 7.29 mostra o posicionamento original das capas bases montadas na bobina de AT.

A implementação deste cenário se dá por meio da alteração do desenho CAD do transformador, conforme traz a Figura 7.30a com a posição original e Figura 7.30b, com a imposição do deslocamento em relação à distância original da capa. Com isso ocorre a redução do duto vertical na entrada (entre discos e capa) de 5 mm para 2 mm. Tal deslocamento pode



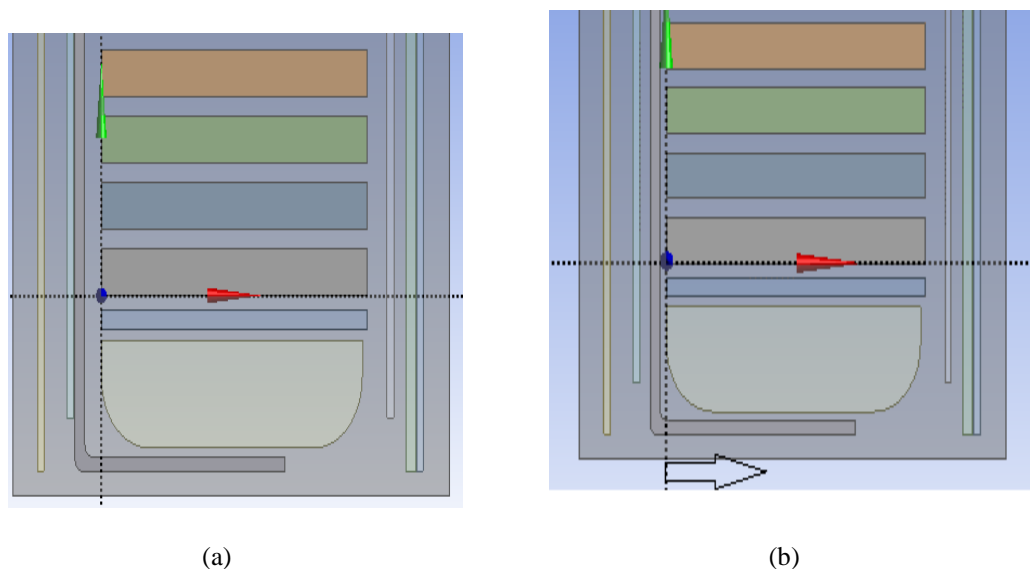
afetar tanto a vazão de óleo entre os dutos verticais quanto entre os horizontais dos quatro primeiros discos do bloco 1.

Figura 7.29 - Detalhe capa de proteção base da bobina AT- TM1



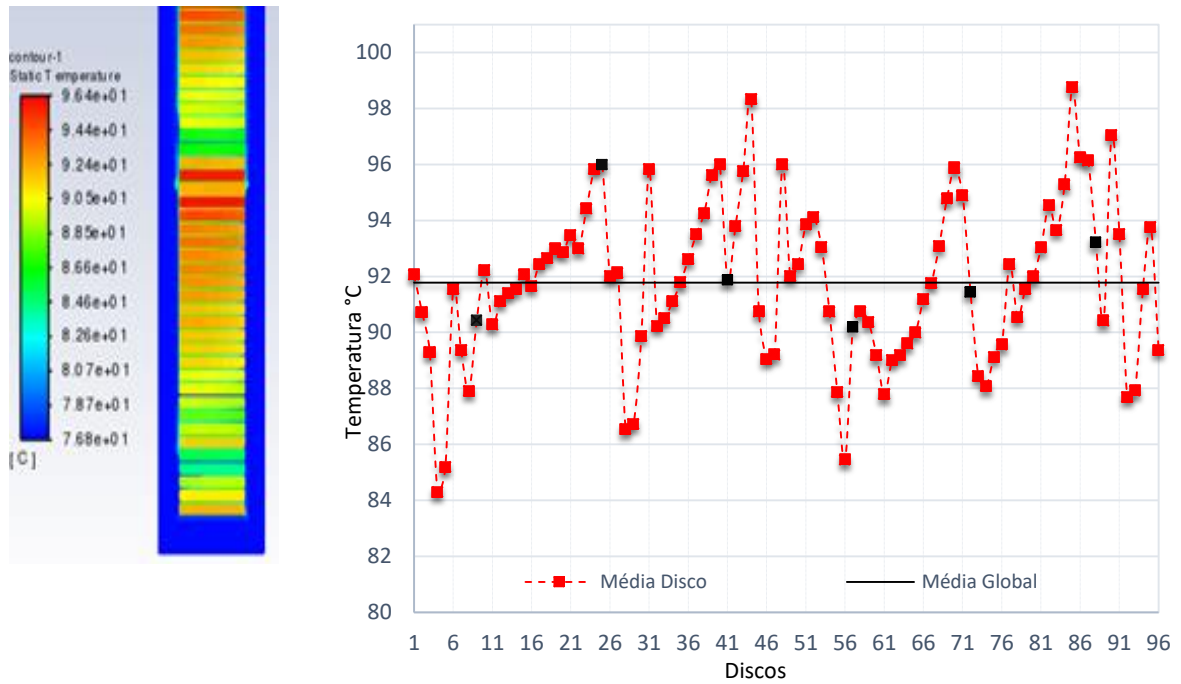
Figura 7.30 - Deslocamento da capa base - Cenário 5: (a) posição original; (b) posição modificada

Fonte: autoria própria

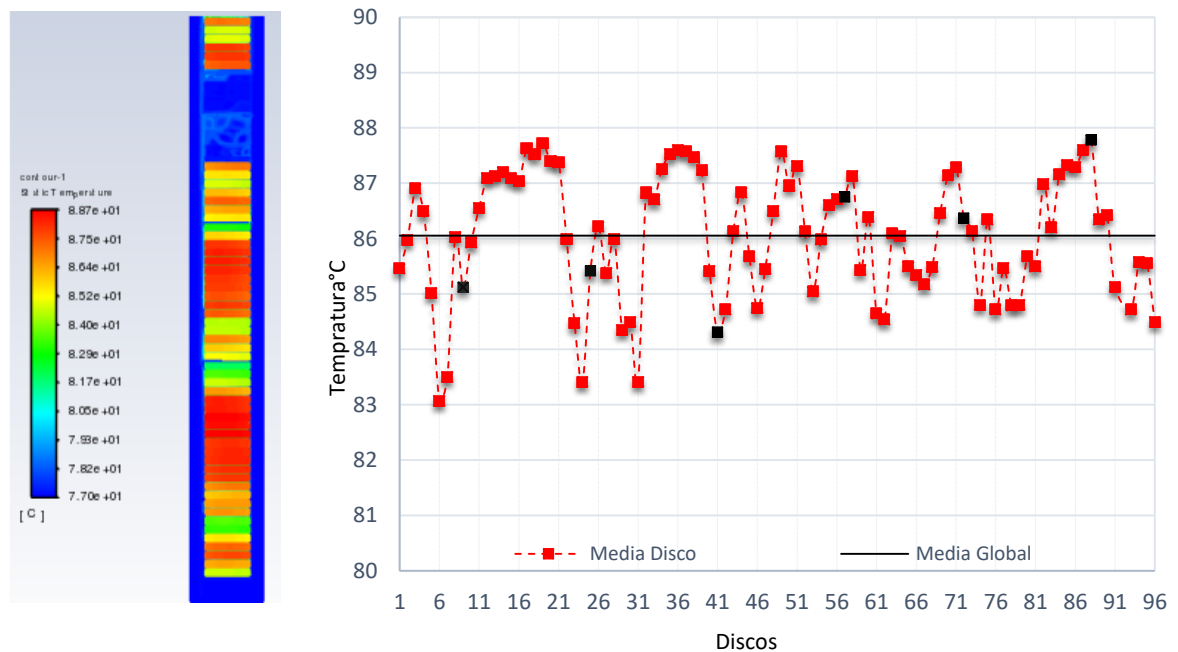


Fonte: autoria própria

A Figura 7.31 apresenta o perfil de temperatura para  $V_e$  de 0,4 m/s,  $T_e$  de 77°C e  $Q$  em 1 pu. Alterando a condição para  $V_e = 0,7$  m/s obtém-se o perfil de temperatura da Figura 7.31.

Figura 7.31 - Distribuição temperatura – Cenário 5 –  $V_e = 0,4$  m/s.

Fonte: autoria própria

Figura 7.32 - Distribuição temperatura – Cenário 5 –  $V_e = 0,7$  m/s.

Fonte: autoria própria

Para a velocidade de 0,4 m/s os desvios geométricos próximos ao anel de prensagem inferior fizeram com que a distribuição do escoamento de óleo no disco 1 sofresse importante elevação de temperatura em relação à operação nominal, subindo de 88°C para 92,06°C. Por

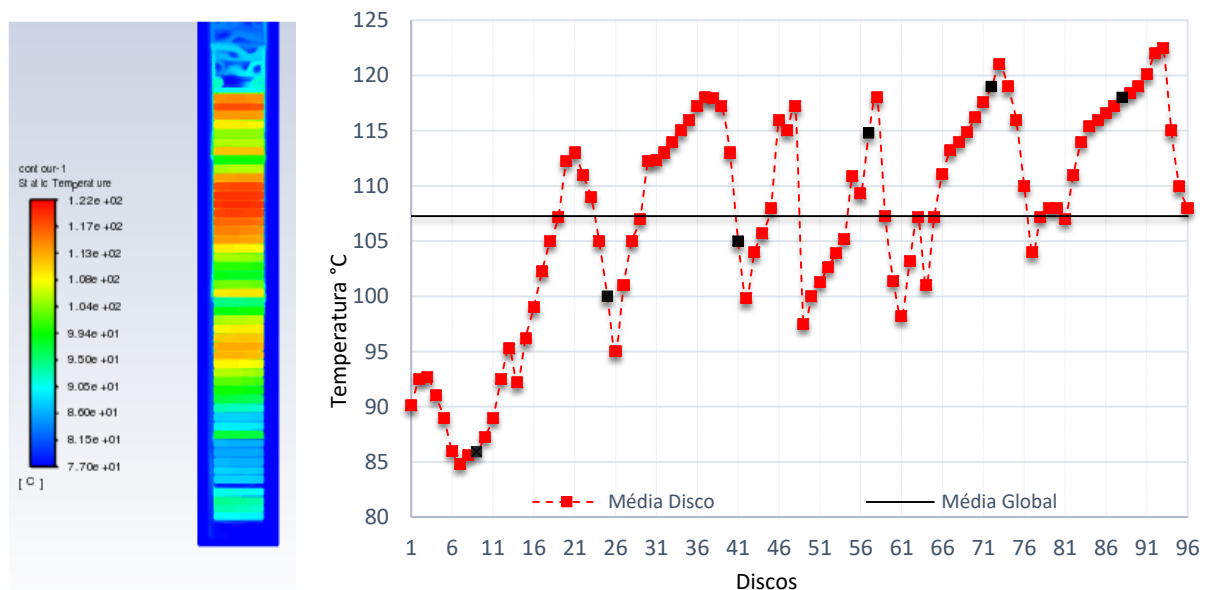
outro lado, o disco 2 não apresentou elevação significativa (de 90,10°C para 90,74). Os discos com as maiores temperaturas foram os 44 e 85, com 98,35°C e 98,76°C, respectivamente. Já para 0,7 m/s, o ponto mais quente está localizado no disco 88 com 87,78°C. Os discos 1 e 2 chegam a 85,45°C e 85,98°C, respectivamente, o que, a princípio, não comprometeria os isolamentos dessa região. Logo, nota-se que a alteração proposta no Cenário 5, isoladamente, pouco impacta sobre o desempenho térmico do transformador, elevando suas temperaturas médias para 91,78°C e 86,05°C, para as velocidades  $V_e$  de 0,4 m/s e de 0,7 m/s respectivamente, em comparativo com o caso nominal.

### 7.3.6. Cenário 6 – Efeitos Combinados: Deslocamento de Disco com Velocidade Reduzida

O Cenário 6 prevê a combinação efeitos, em que se impõe o deslocamento do disco com uma velocidade de entrada abaixo da nominal de 0,4 m/s. O deslocamento do disco fora explicado no Cenário 2. A velocidade reduzida pode resultar da ocorrência de vazamentos em junções, servoválvulas, registros; ou ainda caso as bombas apresentassem uma vazão abaixo da esperada devido a perdas de carga mais elevadas do que as previstas em projeto, ou ainda, ao mau funcionamento do sistema de bombeamento.

Neste cenário, portanto, considera-se uma velocidade de entrada de 0,3 m/s combinada com a geometria já apresentada no Cenário 2. A Figura 7.33 apresenta o resultado para a distribuição de temperatura média ao longo do transformador, sendo mantidas as demais condições de temperatura e potência dissipada ( $T_e=77^\circ\text{C}$  e  $Q=1\text{pu}$ ).

Figura 7.33 - Distribuição temperatura – Cenário 6 -  $V_e = 0,3\text{ m/s}$ .



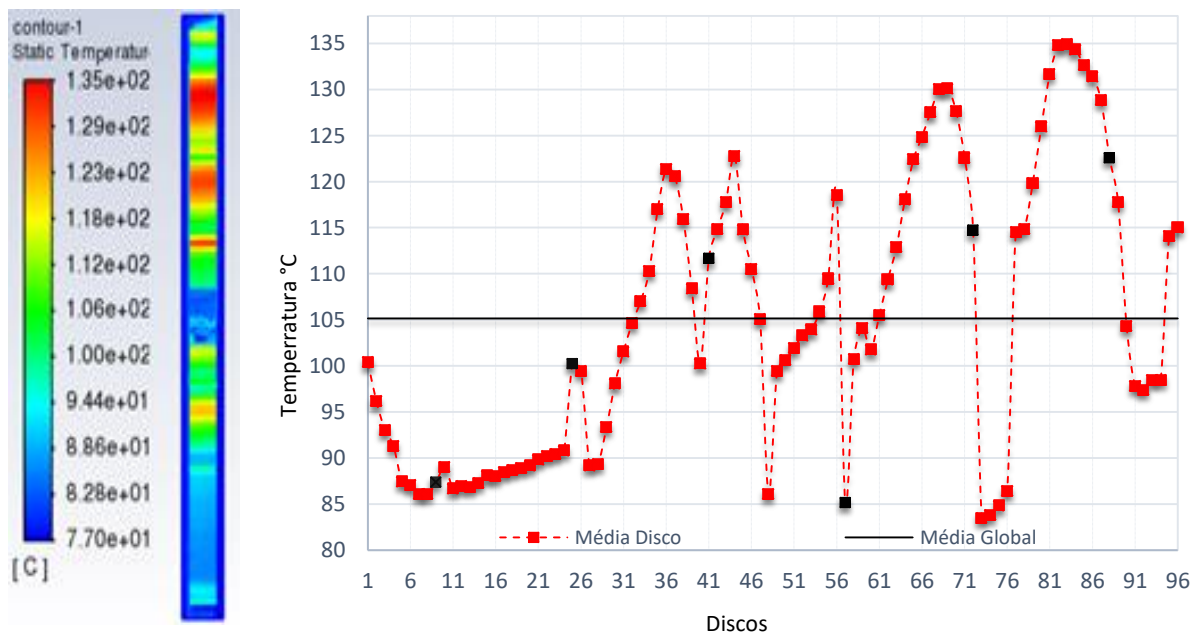
Fonte: autoria própria

Verifica-se uma extrapolação dos limites de temperatura com 122,50 °C no disco 93, porém no disco 1 e 2, pontos de falha em TM1, não há elevação acima dos valores normalizados, com 90,10 e 92,50°C, respectivamente. A temperatura média global nos discos é de 107,26°C. Portanto, o presente cenário poderia explicar eventuais falhas em transformadores, mas não esclarece particularmente o sinistro ocorrido no TM1, localizado nos discos 1 e 2.

### 7.3.7. Cenário 7 – Efeitos Combinados: Deslocamento de Capa Base com Velocidade Reduzida

Assim como no Cenário 6, aqui também se impõe a combinação de dois efeitos: o deslocamento da capa base com uma velocidade de entrada abaixo da nominal de 0,4 m/s. O deslocamento da capa base, já foi abordado no Cenário 5, bem como a velocidade de entrada reduzida com  $V_e = 0,3$  m/s que é mantida. As condições de temperatura de entrada e de potência dissipada são as mesmas. A Figura 7.34 apresenta o resultado da simulação, em que há uma clara alteração no perfil em estudo entre os discos 10 e 24, onde há uma tendência de uniformidade de temperatura, enquanto o discos do segundo bloco tem uma importante elevação extrapolando os limites admissíveis.

Figura 7.34 - Distribuição temperatura – Cenário 7 -  $V_e = 0,3$  m/s.

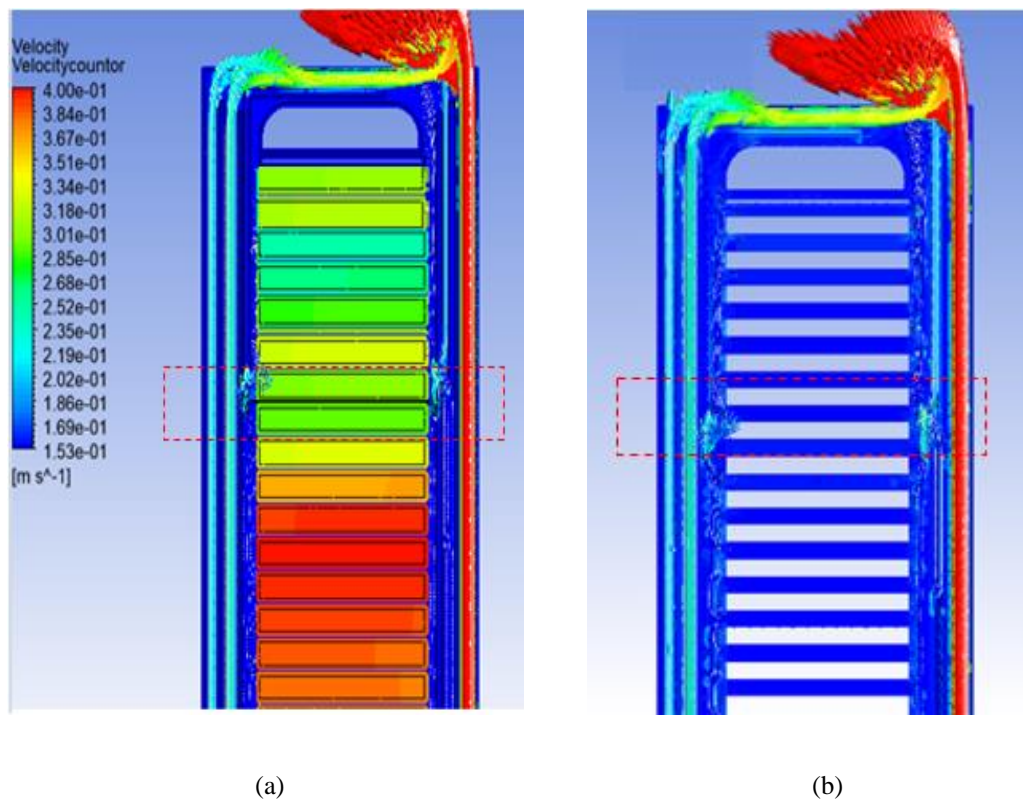


Fonte: autoria própria

Nesse cenário, observa-se a presença do ponto mais quente no disco 83 com 134,92 °C, atingindo um patamar em que os isolamentos poderiam ficar comprometidos. Nos discos 1 e 2, apesar de haver uma elevação da temperatura em relação ao caso nominal, esses valores isoladamente não representariam um risco de danos a estes discos inferiores. No entanto, este cenário pode ser associado a falhas comumente localizadas no segundo bloco dos enrolamentos deste tipo de transformador.

A Figura 7.35a apresenta o contorno para os campos de velocidade no topo do bloco 2 da bobina, com escala em barra de cores à esquerda. No domínio sólido, está o detalhe contorno da temperatura (mesma escala da Figura 7.34), enquanto a Figura 7.35b traz somente o domínio fluido com os campos de velocidade com destaque para a região da guia direcional. Nesta visão é possível observar que os vetores de velocidade do chegam minimamente a 0,153 m/s. Após direcionamento promovido pela última guia do bloco, o sólido demonstra retomar menores patamares de temperatura.

Figura 7.35 - Campos de velocidade para Cenário 7: (a) com domínio sólido; (b) sem domínio sólido com detalhe do direcionamento do óleo.



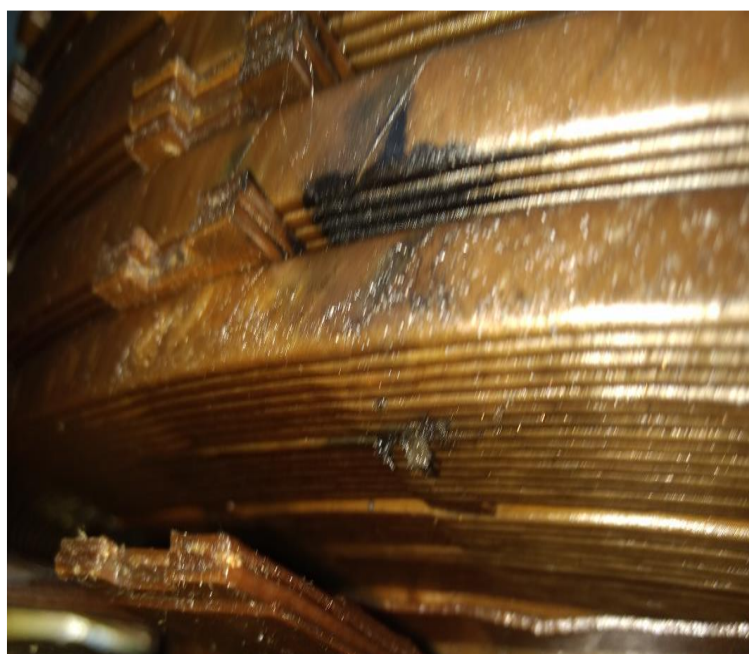
Fonte: autoria própria

Portanto, este Cenário traz conclusões semelhantes ao Cenário 6. Apesar de atingir valores elevados nos primeiros discos do bloco 1, uma maior atenção deve ser dada aos limites de temperatura extrapolados no segundo bloco, diferentemente da falha característica de TM1. Atingindo tais patamares, muito provavelmente o equipamento estaria exposto a uma falha iminente.

### 7.3.8. Cenário 8 - Perdas Não Uniformes

Há dois fatores de maior relevância que podem afetar o desempenho térmico do transformador: a má distribuição do escoamento de óleo, analisada em cenários anteriores; e a distribuição não-uniforme das perdas elétricas, sendo este último abordado no Cenário 8. A observação sobre a Figura 7.36 levanta a hipótese de uma ruptura de isolamento, predecessora ao sinistro de TM1, pode ter culminado num curto entre espiras no disco 1, e conseqüentemente ter se expandido para o disco 2 (vide Apêndice A). Fundamentalmente, o que se pretende analisar é se um curto-circuito entre espiras, seja por deficiência do material, seja por efeitos eletrodinâmicos, ao promover uma distribuição não-uniforme de perdas nesta região, poderia elevar temperatura local a ponto de comprometer todo o enrolamento.

Figura 7.36 - Curto entre espiras discos 1 e 2



Fonte: autoria própria

As deformações e curtos-circuitos entre espiras observados em bobinas de AT, uma vez evidenciadas como pré-existentes à falha permanente, podem ser atribuídas a alguns fatores:

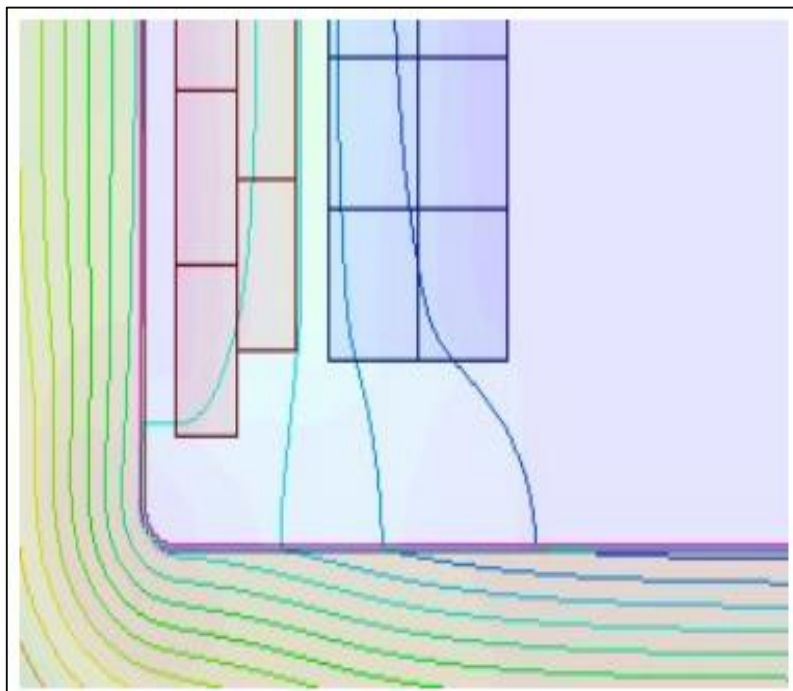
- maior concentração de *Tendência de Carga Eletrostática* – TCA:
- ruptura dos materiais celulósicos por:
  - impacto mecânico durante a montagem;
  - atrito entre espiras por dispersão do fluxo eletromagnético (WIJAYA *et al*, 2012).

Neste último fator, segundo Maschio (2020), o núcleo magnético pode vibrar com até chegar ao dobro da frequência de excitação senoidal do equipamento, o que levaria a uma avaria por atrito, com ruptura dos dielétricos ou sobreaquecimento locais em determinados discos causando, finalmente, um curto-circuito entre elas. Em se tratando de um modelo de transformador não ideal, apesar de bastante eficiente, os enrolamentos não conseguem fazer com que todo o fluxo eletromagnético gerado pelas correntes de fase fique completamente confinado no núcleo de ferrosilício (permeabilidade não infinita) (FITZGERALD, 2003). Algumas das linhas de campo magnético são dispersas e causam o surgimento de algumas regiões de elevada densidade de fluxo, o que pode gerar tais efeitos vibratórios degradando os isolamentos ou causando sobreaquecimento local. Essas regiões dependem fundamentalmente da geometria por onde circulam as linhas de fluxo eletromagnético e das características dos materiais no entorno. Por isso, evitar a estabelecimento de arestas na parte ativa é tão importante para eludir “caminhos” para fluxos dispersos ou descargas parciais.

Tratando-se de um transformador com três enrolamentos sobrepostos, o fluxo disperso gerado por um deles acaba por atingir o outro: o RAT atinge o de AT e BT; e por sua vez, o de AT atinge o de BT. Uma vez que se tem um condutor percorrido por uma corrente elétrica imerso em um campo magnético, surgem forças magnéticas que podem exceder as forças de compressão impostas nos enrolamentos, particularmente quando o transformador já foi submetido a repetidos eventos de magnetização, surtos de manobra, transitórios na rede, ou, mais raramente, curtos-circuitos de baixa impedância.

Desse modo, os maiores valores de compressão estão nos condutores exteriores, ou seja, os mais externos à concentração de linhas de fluxo no meio dos enrolamentos, que seriam os enrolamentos de AT e BT. Tal fato pode ser explicado pela presença de uma maior componente radial do fluxo disperso quando decomposto, como no estudo de Maschio (2020). A componente radial do fluxo é a responsável pelos esforços axiais nos enrolamentos, como mostrado na Figura 7.37:

Figura 7.37 - Detalhe componentes radiais de fluxo eletromagnético disperso.



Fonte: Maschio (2020, p.6)

Portanto, os projetos da parte ativa devem se ater a fatores que contribuam tanto para dispersão do fluxo, como para amortecimento do efeitos eletrodinâmico durante curtos-circuitos. Dentre esses fatores, como ressaltado por Mendes (1995), pode-se destacar:

- Dimensionamento adequado para as condições de curto-circuito, analisando a simetria entre os enrolamentos e diferentes condições de ligações de espiras com os taps de regulação (derivações);
- Dimensionamento de enrolamentos de regulação compatíveis com as solicitações mecânicas máximas de curto-circuito, incluindo análise de suportabilidade mecânica dos suportes das extremidades;
- Distribuição de ligações e transposições evitando cruzamentos entre condutores e risco de corte de isolação por cisalhamento mecânico;
- Controle de forças de prensagem dos enrolamentos compatíveis com as forças associadas a curto-circuito ou descargas de alta energia;
- Observar condições de encolhimento associadas a impregnação definitiva com o óleo isolante;
- Evitar folgas mecânicas nos enrolamentos e calços.



Com base na suportabilidade a correntes de curto-circuito durante eventos no sistema elétrico que demandam esforços mecânicos dos enrolamentos, é possível simular uma falha local que reproduza o efeito térmico nos discos a partir da introdução de uma dada potência de curto-circuito submetendo o enrolamento a perdas não uniformes.

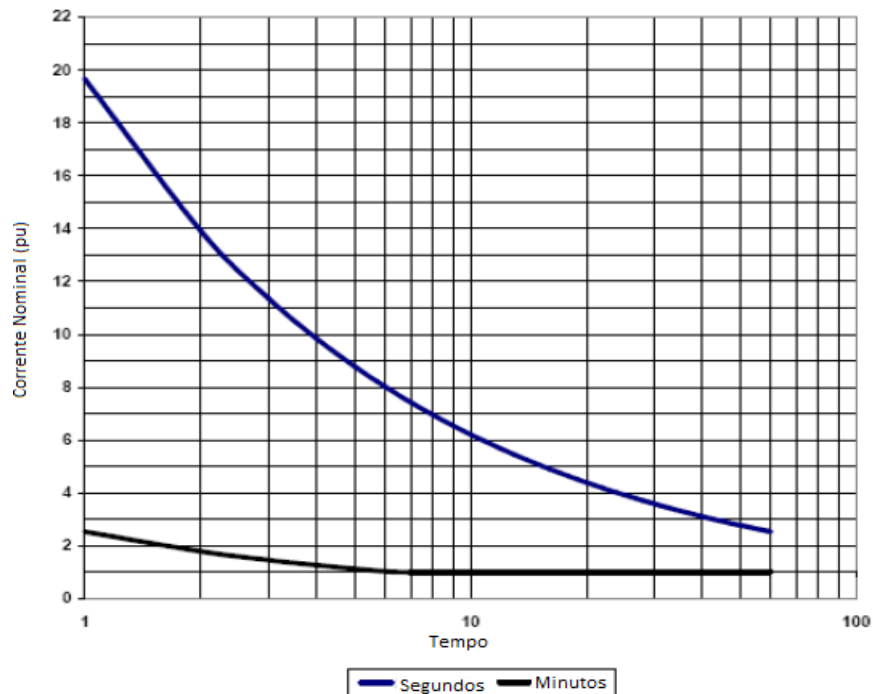
A partir da lei de Joule, pode-se calcular as perdas térmicas dissipadas para a corrente de curto-circuito:

$$\text{Perdas térmicas} = I_{cc}^2 \cdot R_{th} \quad (7.1)$$

em  $I_{cc}$  que é o valor eficaz da corrente de curto-circuito (A) e  $R_{th}$  é o componente resistivo da impedância equivalente de curto-circuito ( $\Omega$ ).

A Figura 7.38 apresenta as correntes máximas de curto-circuito sustentadas durante o tempo de acordo com a capacidade térmica dos materiais empregados. Neste gráfico verifica-se que o transformador deve ser capaz de suportar, por exemplo, uma corrente de curto-circuito -  $I_{cc}$  igual a 2,5 pu (2,5 x corrente nominal  $I_n$ ) por 1 minuto, sem extrapolar os limites de elevação de temperatura da Tabela 2.2.

Figura 7.38 - Curva de corrente de curto-circuito suportável ( $I \times t$ ) para o limite de capacidade térmica.



Fonte: Memorial de Cálculo de Curto-circuito – Cemig (2012a)

Nesse contexto, considerando a resistência equivalente  $R_{th}$  constante, pode-se agora tomar a hipótese de que na região dos discos 1 e 2 havia uma não uniformidade em relação às perdas e aplica-se  $Q'$  em 5 pu (simulando uma  $I_{cc}$  de 2,25 pu) que seria suportável pelo

equipamento por pouco mais de 1 minuto. Nos demais discos manteve-se  $Q' = 1$  pu, como na Tabela 7.2.

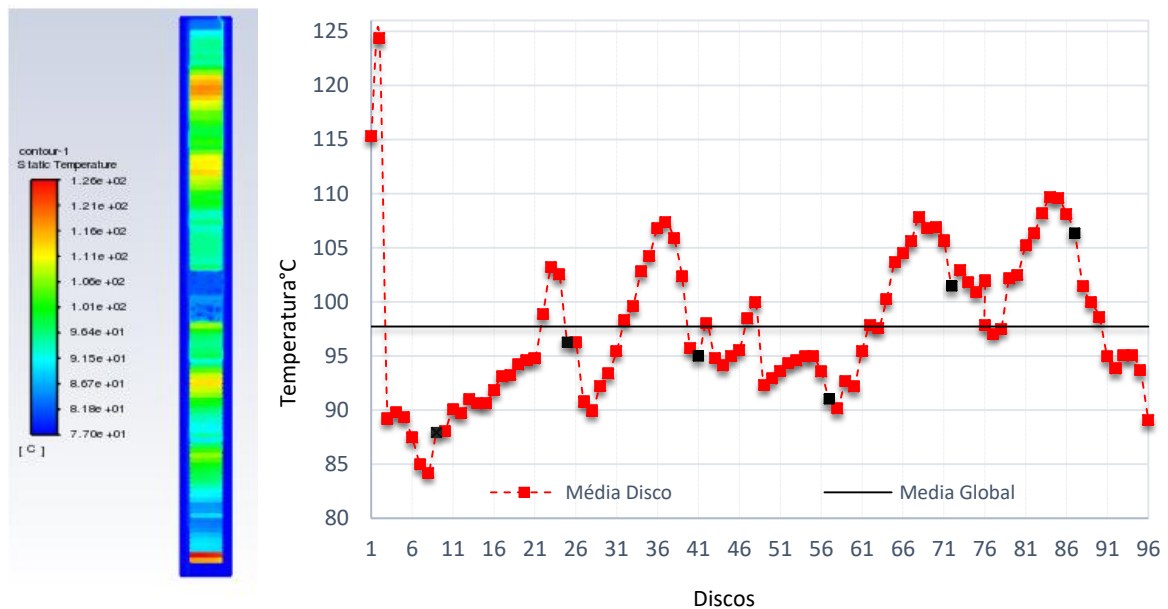
Tabela 7.2 - Relações correntes x perdas aplicadas.

Grandeza	Valores equivalentes simulados <sup>11</sup>	Discos
$I_n$	135,57 A	1 pu 3 a 96
$I_{cc}$	305,03 A	2,25 pu 1 e 2
$Q$	3534,90 W/m <sup>3</sup> disco	1 pu 3 a 96
$Q'$	17.674,5 W/m <sup>3</sup> disco	5,0 pu 1 e 2

Fonte: elaborado pela autora

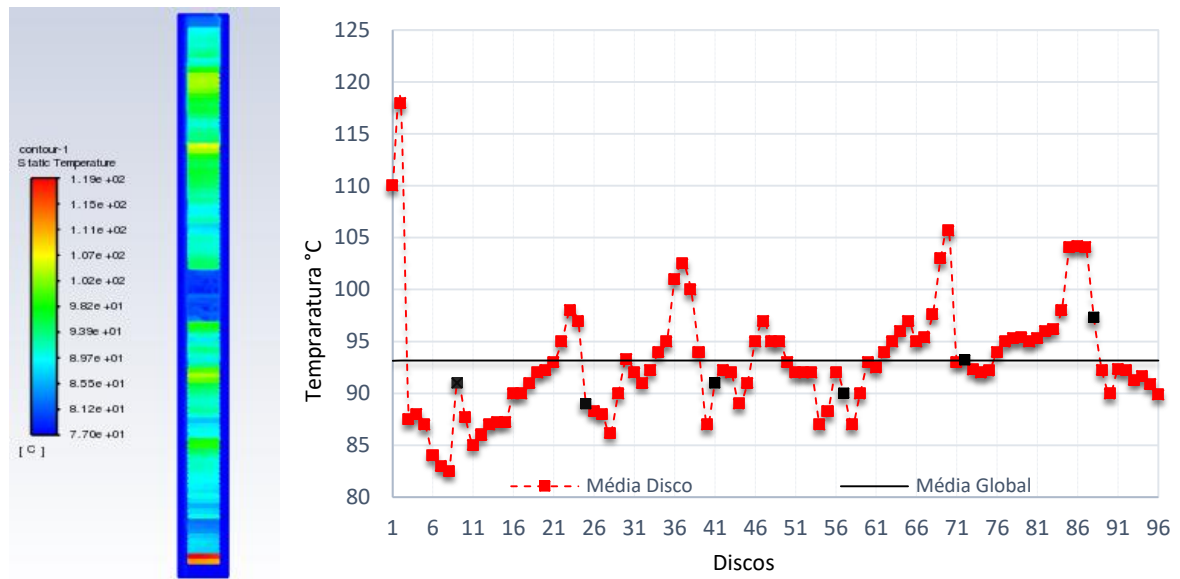
A Figura 7.39 apresenta o resultado da distribuição da temperatura média em cada disco ao longo do transformador utilizando as condições para as perdas térmicas da Tabela 7.2. Foram consideradas também a velocidade  $V_e$  em 0,4 m/s e temperatura do óleo na entrada  $T_e$  em 77°C. Para o resultado da Figura 7.40, a velocidade considerada foi de  $V_e$  de 0,7 m/s.

Figura 7.39 - Distribuição de temperatura - Cenário 8:  $Q' = 5$  pu,  $Q = 1$  pu,  $V_e = 0,4$  m/s,  $T_e = 77^\circ\text{C}$ .



Fonte: autoria própria

<sup>11</sup> Tomado na menor derivação de tensão

Figura 7.40 - Distribuição de temperatura - Cenário 8:  $Q' = 5$  pu,  $Q = 1$  pu,  $V_e = 0,7$  m/s,  $T_e = 77^\circ\text{C}$ .

Fonte: autoria própria

Para ambas as condições, observa-se nitidamente que o ponto mais quente está localizado nos discos 1 e 2. Para a velocidade de 0,4 m/s verifica-se uma temperatura de  $124,38^\circ\text{C}$  no disco 2 (maior temperatura), enquanto no disco 1 a temperatura é de  $115,31^\circ\text{C}$ . Além disso, ao longo do enrolamento, os discos 37 e 85 chegam a  $107,38$  e  $109,7^\circ\text{C}$  respectivamente. A temperatura média global dos enrolamentos fica em  $97,70^\circ\text{C}$ . Por sua vez, à velocidade de 0,7 m/s verifica-se no disco 2 uma elevação de temperatura de  $117,95^\circ\text{C}$ , enquanto no disco 1 a temperatura é de  $110,68^\circ\text{C}$ , enquanto a temperatura média global dos enrolamentos fica em  $93,16^\circ\text{C}$ . Logo, não há elevações de temperatura preocupantes nos demais discos.

Nestas condições, caso o transformador já estivesse com uma dispersão de fluxo eletromagnético maior, ou mesmo com curto-circuito entre espiras, dificilmente os relés de proteções por elevação de temperatura seriam sensibilizados antes das proteções elétricas por correntes diferenciais, uma vez que estas têm atuações mais rápidas a este tipo de falha. Portanto, estes resultados indicam que um curto entre espiras com baixas correntes, podendo ser sustentadas por tempo maior, se comparadas a correntes de curto de altas intensidades (2 a 20 vezes a corrente nominal – Figura 7.41) por curtíssimo período, podem explicar a ocorrência do sinistro do TM1, submetendo o equipamento a perdas não uniformes na região dos discos 1 e 2 a ponto de comprometer os isolamentos, dados os valores de temperatura atingidos. Contudo, não se descarta a presença de outras condições fora das nominais, conforme abordado nos cenários anteriores, que potencializariam a ocorrência do sinistro.

#### 7.4. Discussões Gerais dos Resultados

O modelo matemático proposto, implementado no Ansys-Fluent® e validado com resultados experimentais, permitiu a abordagem de diferentes cenários baseados em situações operacionais que são plausíveis de ocorrerem devido a uma má operação, montagem ou projeto do transformador. Porém, para a estruturação de cada cenário, as condições não nominais e as imperfeições estruturais foram inseridas artificialmente, sendo impostas alterações em vazões, dimensões, ou valores de outras variáveis, baseados na experiência da autora dessa dissertação, bem como na inspeção de perícia, realizada pela própria, sobre o transformador sinistrado.

A partir dos resultados das simulações, é possível extrair o perfil de temperaturas médias em cada disco, bem como a localização e magnitude do ponto mais quente ao longo do transformador. A Tabela 7.3 apresenta o sumário das condições impostas em cada cenário, incluindo as condições nominais, a localização e intensidade dos pontos mais quentes.

Tabela 7.3 - Sumário dos resultados obtidos.

Condição Simulada	Velocidade na entrada do duto $V_e$ (m/s)	Perdas (pu)	Ponto mais quente (disco/°C)
Nominais de Operação	0,4	1	48/94,50
	0,7	1	48/89,51
Cenário 1 - Deformação de Guia	0,4	1	85/110,38
	0,7	1	72/97,09
Cenário 2 - Deslocamento do disco	0,4	1	87/120,88
	0,7	1	87/104,62
Cenário 3 - Obstrução de entrada	0,4	1	84/119,94
	0,7	1	85/103,03
Cenário 4 - Obstrução de saída	0,4	1	85/107,67
	0,7	1	85/90,15
Cenário 5 - Deslocamento de capa	0,4	1	85/98,76
	0,7	1	88/87,78
Cenário 6 - Efeitos combinados: velocidade abaixo da nominal e disco deslocado	0,3	1	93/122,51
Cenário 7 - Efeitos combinados: velocidade abaixo da nominal e capa deslocada	0,3	1	83/134,92
Cenário 8 - Perdas não uniformes	0,4	1-5	2/124,38
	0,7	1-5	2/117,98

Fonte: elaborado pela autora

De posse dessas informações, pode-se levantar alguns aspectos relevantes acerca do modelo estudado, obtendo uma análise global sobre as características e vulnerabilidades do equipamento, como apresentado no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 - Considerações sobre Cenários Simulados.

Condição Simulada	$V_e$ (m/s)	Considerações
Nominais	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A troca térmica foi mais efetiva ocorreu nos discos 08 e 56, ambos próximos às guias.</li> <li>• A maior elevação de temperatura foi constatada nos discos do centro da bobina, fim do bloco 1 e início do bloco 2.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído.</li> <li>• A troca térmica foi mais efetiva entre os discos 25 e 56, ambos próximos às guias.</li> <li>• A maior elevação de temperatura ocorreu nos discos do centro da bobina, fim do bloco 1 e início do bloco 2.</li> </ul>
Cenário 1	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A maior elevação de temperatura ocorreu nos discos do centro do segundo do bloco.</li> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu nos extremos das bobinas dos blocos 1 e 2. Há regiões na entrada do bloco 1 em que o escoamento de óleo chega a 0,79 m/s.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído, com destaque para troca térmica mais significativa entre os discos 08 e 73, ambos próximos às guias.</li> <li>• A maior elevação de temperatura ocorreu nos discos do centro da bobina, fim do bloco 1 e início do bloco 2.</li> <li>• Há regiões na entrada do bloco 1 em que o escoamento de óleo chega a 1,3 m/s.</li> </ul>
Cenário 2	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A maior elevação de temperatura nos discos do centro do segundo do bloco 2, excedendo os limites da norma.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído.</li> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu no intervalo dos discos 2 a 16 do bloco 1.</li> </ul>
Cenário 3	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu no intervalo dos discos 3 a 16 do bloco 1.</li> <li>• A maior elevação de temperatura ocorreu nos discos do centro do segundo do bloco.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído.</li> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu no intervalo dos discos 2 a 9 do bloco 1.</li> </ul>
Cenário 4	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído.</li> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu no intervalo dos discos 4 a 10 do bloco 1.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído.</li> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu no intervalo dos discos 3 a 9 do bloco 1.</li> </ul>
Cenário 5	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura menos uniforme.</li> <li>• Há notória elevação no disco 1 do bloco 1.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura mais uniformemente distribuído.</li> <li>• A troca térmica mais significativa ocorreu no disco 6 do bloco 1.</li> </ul>
Cenário 6	0,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura com importantes elevações a partir do disco 14 do bloco 1.</li> <li>• Houve extrapolação dos limites da norma nos discos 73, 92 e 93.</li> </ul>
Cenário 7	0,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura com importantes elevações a partir do disco 24 do bloco 1, mantendo-se estável entre os discos 6 e 22.</li> <li>• A partir do disco 34 houve elevação de temperatura acima dos limites da norma em vários discos do bloco 1 e 2.</li> </ul>
Cenário 8	0,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A maior elevação de temperatura ocorreu no disco 1 próximo aos limites por norma e disco 2 em extrapolação.</li> </ul>
	0,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A elevação de temperatura mais importante ocorreu no disco 2, sem extrapolação dos limites da norma.</li> </ul>

Fonte: elaborado pela autora

Com base nas discussões apresentadas, podem ser destacados os seguintes aspectos:

- Alterações no posicionamento das guias, deslocamentos de discos e obstruções dos dutos de entrada têm maior impacto sobre o perfil de temperatura do transformador e podem atingir valores muito acima do gradiente de temperatura esperado ( $15,7^{\circ}\text{C}$  – Tabela 5.1);
- Na maioria dos casos simulados, o ponto mais quente encontrado ficou localizado entre os discos 82 e 88, mostrando que esta região está mais suscetível quaisquer deformidades geométricas e requer maior atenção ou reforço no posicionamento das guias de forma a melhorar as trocas térmicas nestes discos;
- Na maioria dos casos simulados, a imposição de velocidade de entrada em  $0,7\text{ m/s}$  produziu perfis de temperatura mais bem distribuídos, mesmo com algumas deformidades impostas, à exceção de anomalias nas guias em que houve extrapolação dos limites de velocidades nos canais verticais inferiores, o que aumentaria a exposição à TCE;
- O Cenário 7 mostrou que um possível deslocamento da capa base, estreitando o duto vertical de entrada, pode impactar mais fortemente o ponto mais quente, extrapolando os limites suportáveis pelos materiais isolantes;
- O Cenário 1 e o Cenário 8 apresentaram condições que podem impor maior risco de avaria entre os discos 1 e 2, podendo estes serem associados à falha identificada em TM1, em função da extrapolação dos limites de velocidade do óleo nesta região de entrada e dos limites de temperatura impostos por uma possível dispersão de fluxo eletromagnético ou curto-circuito entre espiras, causando uma distribuição não uniforme de perdas na bobina;
- Os demais cenários, por sua vez, podem explicar a ocorrência de diversos sinistros em transformadores similares ao TM1. Assim, os cenários implementados e simulados, bem como o modelo elaborado neste trabalho por meio do Ansys-Fluent® poderão ser utilizados futuramente como uma ferramenta de pesquisa para avaliar e explicar possíveis falhas em transformadores com sistema de arrefecimento com óleo dirigido.

## 8. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi motivado pela ocorrência de uma falha precoce em um transformador móvel de 25 MVA da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). A ocorrência de sinistros em transformadores causa diversos transtornos sociais e econômicos, de forma que uma investigação sobre os diferentes modos de falhas de natureza fluidodinâmicas tem grande valia na prevenção de incidentes futuros. Neste contexto, essa dissertação de mestrado estudou o modelo matemático para este problema e o implementou em um software CFD, com o objetivo de avaliar o comportamento termo-hidráulico de um transformador móvel com enrolamento tipo disco e arrefecimento tipo ODAF, com uma falha localizada.

Após a implementação numérica, foi realizado um estudo de independência do tamanho de malha espacial e validação do modelo matemático proposto foi realizado utilizando a metodologia do GCI. Os resultados simulados tomando como base os resultados experimentais, obtidos por Daghrah (2017) para um modelo similar, sendo observada uma boa concordância em relação às faixas de temperaturas avaliadas, bem como da sua distribuição ao longo dos discos do transformador.

De posse da validação do modelo e da malha espacial selecionada, foi considerado o sistema ODAF em operando em condições nominais e, posteriormente, foram elaborados oito cenários artificiais, com variações operacionais e/ou geométricas além das nominais, e verificado os impactos sobre os campos de escoamento e distribuição de temperatura. Em seguida foi avaliado como tais problemas interferem nos campos de velocidade ou distribuição de temperatura, ocasionando sobreaquecimentos locais e se tais resultados podem estar associados à falha precoce apresentada pelo transformador em estudo.

Foi identificado que o Cenário 1, com a deformação das guias de óleo, e o Cenário 8, com perdas não uniformes, são as situações que apresentaram maior potencial para uma falha nos primeiros discos do enrolamento de Alta Tensão. Verificou-se que vazão de entrada afeta diretamente a uniformidade do perfil de temperatura desenvolvido e que, problemas de isolamento ou montagem do núcleo podem expor os enrolamentos a temperaturas acima das admissíveis, colocando em risco a vida útil do transformador.

Por fim, os resultados numéricos demonstraram que os desvios geométricos dos discos, guias, ou dutos de arrefecimento axial podem aumentar demasiadamente a temperatura do ponto mais quente, extrapolando em diversas situações a norma ABNT NBR 5356:2. Esses desvios geométricos devem ser minimizados durante o processo de fabricação do transformador, desde que bem dimensionados e montados.

Portanto, o modelo matemático proposto e implementado demonstrou ser uma ferramenta consistente para a compreensão do comportamento térmico e a localização do HST, podendo ser aplicada por concessionárias, fabricantes e seguradoras, como um importante recurso de investigação sobre diferentes modos de falha. Mais que isso, outras falhas em transformadores tipo ODAF podem vir a ser esclarecidas, uma vez implementadas as particularidades de cada transformador.

### 8.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao logo deste estudo foram identificadas uma série de melhorias e sugestões para trabalhos futuros apresentados a seguir:

- Modelagem e simulação em CFD considerando a transferência de calor por radiação;
- Modelagem do transformador para escoamento regime transiente;
- Incluir modelos de turbulência a partir de vazões acima das nominais;
- Implementar simulações para outros modelos de barreiras de direcionamento de óleo, como aquelas do tipo *labirinto*, *zig-zag* para enrolamento em camada, etc.
- Análise de simulações multifísicas incluindo modelo de acoplamento eletromagnético e térmico;
- Ampliação do domínio simulando o acoplamento das três bobinas (AT-BT-RAT) sobrepostos e avaliar os efeitos térmicos;
- Estudo da degradação e estimativa da vida útil do isolante sólido a partir das elevações de temperatura a longo prazo;
- Fazer estudo de relacionamento de causas de falhas anteriores em transformadores similares ou até mesmo futuros sinistros em transformadores tipo ODAF, criando um banco de dados para consulta e inferência da temperatura interna dos transformadores de diferentes potências;
- Incluir diferentes efeitos transitórios de origem elétrica, bem como vibração mecânica complexa, originária do efeito de magnetostricção do núcleo, acoplados ao modelo térmico;
- Incluir avaliação de desempenho em transitório e capacidade de sobrecarga, particularmente para transformadores que sofrem variações de carga diárias significativas.



## 9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5356-2:2007 Transformadores de Potência Parte 2: Aquecimento**, 2007.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7034:1991 Aplicação de Carga em Transformadores de Potência – Procedimento**, 1991.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5356-2:2007 Transformadores de Potência. Parte 7: Guia de Carregamento para Transformadores Imersos em Líquido Isolante, 2017.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR5356-16 Transformadores de Potência. Parte 16: Transformadores para Aplicação em Geradores Eólicos**, 2018.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR5356-7 Transformadores de Potência. Parte 7: Guia de Carregamento para Transformadores Imersos em Líquido Isolante**, 2018.

ASME American Society of Mechanical Engineers. **V&V 20 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer**. New York: ASME; 2009.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. Módulo 4 -**Transmissão, Distribuição e Comercialização de Energia Elétrica**. Disponível em [http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4\\_uni1\\_sl6.html](http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl6.html). Acesso em: 11 novembro de 2021.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 674, de 11 de agosto de 2015**. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 13 dezembro de 2021.

ANSYS. **Fluent Theory Guide** – 2013. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/academic>. Acessado em 19 outubro de 2021.

ANSYS. **ESSS - Garantia de maior robustez numérica com o novo gerador de malha do Workbench**. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/garantia-de-maior-robustez-numerica-com-o-novo-gerador-de-malha-do-workbench/>. Acessado em 19 novembro de 2021.

AZIS, N.; LIU, Q.; WANG, Z.D. **Assessment of Transformer Paper Insulation Through Post Mortem Analysis**. IEEE Transactions On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, pp. 845-853, 2014.

BARROSO, R. **Simulation and Experimental Validation of the Core Temperature Distribution of a Three-Phase Transformer**. COMSOL Conference. Curitiba: [s.n.], 2014.

BRECHARA, R. **Análise em Falhas em Transformadores de Potência** – Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica de São Paulo – São Paulo, 2010.

BUSTIN, W. M.; Dukek, W. G. **Eletrostatic Hazards In The Petroleum Industry** – Research Studies Press LTD. England, 1983.

CAMPELO, H. M.R.; FERNANDEZ, X. M. L.; PICHER, P.; TORRIANO, F. **Advanced Thermal Modelling Techniques in Power Transformers. Review and Case Studies**. ARWTR2013 - Advanced Research Workshop on Transformers, Baiona, October 2013.

CAMPELO, H.M.R.; LABBÉ, P.; PICHER, P. **Assumptions and Numerical Parameters Influencing the Accuracy of Thermal Models for Core-Type Power Transformer Windings 4th International Colloquium**. IEEE Transformer Research and Asset Management, Pula, Croatia, May 10 – 12, 2017.

CAMPOS, A. R. T.; MARISCAL, I. C.; HERNANDEZ, S. G. **Simulation of a Distribution Transformer**. WSEAS Transactions on Fluid Mechanics, v. 07, p. 106, 114, July 2012.

CELG D - Companhia Energética de Goiás. **Especificação Técnica CELG D UAT001 – Subestação Móvel de 33MVA 138kV X 69kV/34,5kVx13,8kV**, 2017

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Memoriais de Curto-Circuito Transformador de Força**, 2012a;

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Data Book – Transformador Regulador Telecomandado**, 2012b;

CESAR, L.C; VIEIRA, S.; SENS, M.A.; MARINS, L. E.; FERNANDEZ, J.B. – CEPEL **Carregamento Eletrostático do Óleo Dielétrico para Transformadores**. X SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 1989.

CGPOWER. **Manual do Fabricante – Subestações Móveis 25 MVA**, 2014.

CHEIM, L.; SILVEIRA, J.G.; BRAVATI, S.; JOVELLI, A. **New Model for The Calculation Of Dynamic Loading Of Transformers** – IEEE, 2009.

CIGRE - Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos. **Transformer Thermal Modelling**, CIGRÈ Working Group A2.38, IEEE, 2016.

COLEMAN, H. W.; STERN, F. **Uncertainties and CFD Code Validation**, *ASME Journal Of Fluids Engineering*, vol. 119, December 1997, pp. 795–803.

DAGHRAH, M., WANG Z., ZHONGDONG, W., QIANG, L., JARMAN, P., WALKERB D. **Flow and Temperature Distributions in a Disc Type Winding-Part I: Forced and Directed Cooling Mode**. *Applied Thermal Engineering*, 2020.

DAGHRAH, M. **Experimental Study of Transformer Liquid Flow and Temperature Distributions**. Thesis (The Degree of Master), The University of Manchester, 2017.

D'ALMEIDA E SILVA, V.L.; MORAIS, R. M. **Evolução de produtos de degradação do papel em mineral isolante durante o envelhecimento térmico**. IV Seminário de Materiais no Setor Elétrico, Curitiba, 1994.

HARITHA, V. S.; Rao T. R.; AMIT J.; RAMMAMORTY M.; **Thermal Modeling of Electrical Utility**. Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, India, December 27-29, 2009.

FITZGERALD, A.; Kingsley, C. Jr.; Uman, S. D. **Electric Machinery**, 6th Ed., Vol. 319, nº. 4. Mc Graw Hill, 2003.

FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.Jr.; ALEXANDER, K. **Máquinas Elétricas**. 7. Ed. McGraw-Hill, 2014.

FONTE, C. M.; LOPES, J. C.; DIAS, M.M.; SOUSA R. G.; CAMPELO, H.M.; LOPES, R. C. **CFD Analysis of Core Type Power Transformers**. 21ª International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt 6-9, Jun 2011.

FOSTER, M. D., **The Dissipation of Electrostatic Charges in Purified Petroleum Products.** **Inst. Phys. Conf. Series** nº 4, p 78-88, 1967.

HAMZA, S.; Herskind, T. **Dynamic Thermoelectric Modelling of Oil-Filled Transformers for Optimized Integration of Wind Power in Distribution Networks.** Conference: CIRED Madrid, 2019.

IEC International Electrotechnical Commission. IEC 60076-2: **Power Transformers Part 2: Temperature Rise for Liquid-Immersed Transformers**, Ed 3.0 February 2011.

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. **Standard C57: 91:1995.** Guide for Load Mineral-Oil-Immersed Transformers, 1995.

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. Transformer Committee of The Power Engineering Society, **Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors**, Nov 1991.

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE 1538:2000. **Guide for determination of Maximum Winding Temperature Rise in Liquid Filled Transformers**, 2000.

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. **STD 1276:1997. Trial-Use Guide for the Application of High-Temperature Insulation Materials in Liquid Immersed Power Transformers**, 1997.

ISHII, R. **Análise de Falha – Transformador para SE Móvel Transformador Trifásico, 25MVA, 138x69/34,5x13,8kV** – fev. 2020.

JARMAN, P.; ZHANG, X; DAGHRAH, M.; LIU Q.; WANG, Z.; DYER, P.; GYORE, A.; SMITH, P.; MAVROMMATIS, P.; NEGRO, M. **Prediction of The Oil Flow Distribution In Oil-Immersed Transformer Windings By Network Modelling and Computational Fluid Dynamics;** IET Electric Power Applications, February 2012.

KHANDAN, S.; TENBOHLEN, S.; BREUER, C.; LEBRETON, R. **CFD Study of Fluid Flow and Temperature Distributions in a Power Transformer Winding.** 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom, June 2017.

LORENCINI do BRASIL, Catálogo Fabricante **Transformadores de potência e Reatores de Derivação**, 1999. Disponível em <https://www.lorencini.com.br/blog/caracteristicas-constitutivas-dos-transformadores-de-potencia/>. Acessado em 18.02.2022.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª Edição, ISBN: 9788521613961, 2004.

MASCHIO, G.; MEDEIROS, L. H.; BENDER, V.; MARCHESAN, T. B. **Análise de Esforços de Curto-Circuito em Transformadores empregando o Método de Elementos Finitos Laboratório de Ensaios de Média Tensão – INRI Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria**, Jul 2020.

MENDES, J. C. **Redução de Falha em Transformadores de Alta Tensão –Tese (Doutorado) – Escola Politécnica de São Paulo – 1995.**

NOGUEIRA, G. C; MEDEIROS, L. H.; OLIVEIRA, M.; BARTH D. N.; BENDER, V.C.; FALCÃO C. E. G.; MARCHESAN T.B. **Análise Térmica de Transformadores de Potência com Diferentes Sistemas de Refrigeração Através da Dinâmica de Fluidos Computacional - Instituto de Redes Inteligentes**, 2019.

NORDMAN, H.; LAHTINEN, M. **Thermal Overload Tests on a 400-MVA Power Transformer with a Special 2.5-pu Short Time Loading Capability**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 107–112, 2003.

NYNAS, AB. **Product Data Sheet: Nytro 11GBX-US**, 2014.

OLIVER, A. J. **Estimation of Transformer Winding Temperatures and Coolant Flows Using A General Network Method**; Roc. vol. 127, pt. c, no. 6, pp. 395–405, Nov. 1980.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Requisitos Técnicos Complementares aos Requisitos Funcionais para Transformadores Reatores do SIN**, 2016.

ORTIZ, C.; SKOREC, A.W.; LAVOIE M.; BENARD P. **Parallel CFD analysis conjugate heat transfer in a dry-type transformer**. IEEE Transactions on industry applications, v. 45, p. 1530 - 1534, Julho/Agosto 2009.

PARAMANE, S.B.; JOSHI K.R.; VEKER, W.V.; SHARMA, A. **CFD Study ON Thermal Performance of Radiators in a Power Transformer: Effect of Blowing Direction and Offset of Fans**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 29, p. 2597, 2604, 2014.

PICHER, P.; TORRIANO, F.; CHAABAN, M; GRAVEL, S.; RAJOTTE, C.; GIRARD, B. **Optimization of Transformer Overload Using Advanced Thermal Modelling**. CIGRÈ Session, Paris, 2010.

RADAKOVIC, Z.R.; SORGIC, M.S. **Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 790–802, abril de 2010.

RECORDSA - Catálogo: **Medidores de Temperatura**. Disponível em [www.recordsa.com.br](http://www.recordsa.com.br). Acessado em 18/12/2021.

ROACHE, P. J. **Verification and Validation In Computational Science and Engineering**, **Hermosa Publishers**, Albuquerque, 1998.

ROSILO, M. E.; HERRERA, C. A.; JARAMILLO, G. **Advanced Thermal Modeling and Experimental Performance of Oil Distribution Transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery V. 27, P. 1710 – 1717, 2012.

SANTISTEBAN, A.; ORTIZ, F.; CARLOS, J. R.; PEREZ, S.; MENDEZ, C.; FERNÁNDEZ, C.D. **Thermal Modeling of a Power Transformer with Different Dielectric Liquids XI National and II International Engineering Thermodynamics Congress – 2019**.

SEN, P. C. **Principles of Electrical Machines – Second Edition –1997**.

SENS, M.A. **Ocorrência de Carregamento Eletrostático no Óleo Mineral Isolante de Transformadores – Colóquio Técnico sobre Óleo Mineral Isolante**, Florianópolis, junho, 2002.

SHIMIZU, S.; MURATA, H; HONDA, M. – **Electrostatic in Power Transformer** IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems. Vol. Pas-98, Nº 4, Ed. Julho/Agosto 1979.

SILVA, C. V. **Introdução ao Ansys CFX**. URI - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2019.

SILVA, J. R. **Modelagem para Monitoramento Térmico de Transformadores em Operação e Avaliação do Envelhecimento em Função do Perfil de Carregamento**; Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, R.G. **Modelagem Térmica de um Transformador de Potencial Capacitivo com uso de CFD**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco – 2017.

SKILLEN, A.; REVELL, A.; LACOVIDES, H.; WU, W.; WANG, Z. **Numerical Prediction of Local Hot-Spot Phenomena in Transformer Windings**. Applied Thermal Engineering, 2011.

SUSA, D.; LEHTONEN, M. **Dynamic Thermal Modeling of Power Transformers: Further development Part I**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 4, pp 1971 – 1980, october, 2006.

TORRIANO, F.; Campelo, H.M.; Quintela, B.; Labbéa, P. M.; Pichera, P.; **Numerical and Experimental Thermal Fluid Investigation of Different Disc-Type Power Transformer Winding Arrangements**. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018.

TORRIANO F., CHAABAN M., PICHER P. **Numerical Study of Parameters Affecting the Temperature Distribution in a Disc-Type Transformer Winding**. Applied Thermal Engineering, vol. 30, no. 14, pp. 2034-2044, 2010.

TORRIANO, F.; PICHER, P.; CHAABAN, M. **Numerical Investigation of 3D Flow and Thermal Effects in a Disc-Type Transformer Winding**. Applied Thermal Engineering, 2012.

TSILI, M. A.; AMOIRALES, E.I.; KLADAS, A.G.; SOUFLARIS, A.T. **Power Transformer Thermal Analysis by Using an Advanced Coupled 3D Heat Transfer and Fluid Flow FEM Model**. International Journal of Thermal Sciences, v. 53, p. 188 201, 2012.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **Computational Fluid Dynamics**. London: Pearson, 2007.

VIANA, E.C. **Simulação Numérica de Escoamentos com Condições de Contorno dependentes do Tempo na Entrada do Domínio de Cálculo**. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista, 2005.

VITA, A.; BALDAUF, J.; PATROCINIO, P.; CAPINOS, I.; GOMES, A. **Ciclo de Sobrecarga Diário em Transformadores e sua Experiência e Sugestões para Ensaio de Elevação de Temperatura para Verificação ao Atendimento ANEEL 191**. XXII SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – Brasília, outubro, 2013.

WEG. Catálogo do Fabricante - Design Review: **Transformador Regulador Telecomandado**, 2020;

WEG. **Manual de Instruções: Transformador Regulador Telecomandado**, 2014.

WIJAYA J.; GUO W.; CZASZEJKO T.; MARTIN D.; LELEKAKIS N.; SUSAN D.; **Temperature Distribution in a Disc-Type Transformer Winding**, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012.

WHITE, F.M. **Viscous Fluid Flow**. McGraw Hill, 3rd ed., p. 30, 2006.

YAMAZAKI, L **Principales Aspectos para Especificar Transformadores de Potencia - JORNADAS TÉCNICAS - ABB EN CHILE**, 10 ABRIL, 2017.

YANG, H.; YU, T.; XU, R.; PENG, C. **Simulation Study on Ventilation & Cooling for Main Transformer Room of an Indoor Substation**. Journal of Multimedia, v. 9, p. 1040, 1047, 2014.

YAQOOB, M. T. **Transformer Thermal Model of the Disk Coils with Non-Directed Oil Flow**. A Thesis (The Degree of Master), University Hussein On Malaysia, January 2013.

ZANINI, B. K. **Análise Comparativa entre o uso de Transformadores a Seco e a Óleo em Subestações de Média Tensão**. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ZHANG X., DAGHRAH M., WANG Z.D., LIU Q., JARMAN P., NEGRO M. **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, vol. 33, no. 4, 2018.

ZHANG X.; WANG Z.D.; LIU Q.; **Interpretation of Hot Spot Factor for Transformers in OD Cooling Modes**. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017.



ZHANG, X.; ZHONGDONG, W.; DAGHRAH, M.; QIANG, L.; **Flow and Temperature Distributions in a Disc Type Winding-Part II: Natural Cooling Modes**, IEEE, 2020.

## APÊNDICE A – INSPEÇÃO INVESTIGATIVA SOBRE DE FALHA DE TRANSFORMADOR MÓVEL

O objetivo desse apêndice é ilustrar algumas das etapas de inspeção investigativa no transformador TM1 para identificação das áreas afetada, relacionando os pontos de falta a prováveis causas da falha do transformador. As etapas de inspeção visual executadas por esta autora foram fundamentais para o levantamento das principais hipóteses adotadas no presente trabalho e incluí-las nos cenários reproduzidos computacionalmente na seção 6.3. As inspeções foram executadas em duas fases de investigação, sendo a primeira ocorrida entre 21/11/2019 e 23/11/2019 e a segunda entre 28/10/2020 a 29/10/2020.

A Tabela A.1 traz a cronologia operacional do transformador e seus dados básicos de placa.

Tabela A.1 – Características nominais

<b>Características</b>	<b>Dados</b>
Ano de Fabricação / Início operação	2013
Ano da falha	2019
Tensão	138x69-34,5x13,8 kV
Frequência	60Hz
Potência	25 MVA
Refrigeração	ODAF
Comutador sob carga	Lado AT
Comutador sem carga	Religação AT e BT
Volume de óleo	14.425 Litros
Peso total	38.480 kg
Avaliado em	R\$ 4.214.000,00

Fonte: elaborado pela autora, extraído de Cemig (2012b).

A Figura A.1 ilustra a carreta da Subestação Móvel, na qual o transformador opera com todo o conjunto de aerotermos, circuito hidráulico e demais equipamentos de manobra para interligação do transformador ao sistema elétrico.

Figura A.1. - Subestação Móvel com Transformador de 25 MVA



Fonte: autoria própria

A primeira etapa da inspeção consistiu na retirada da tampa do tanque principal do transformador permitindo o acesso à parte ativa, conforme visualizado na Figura A.2.

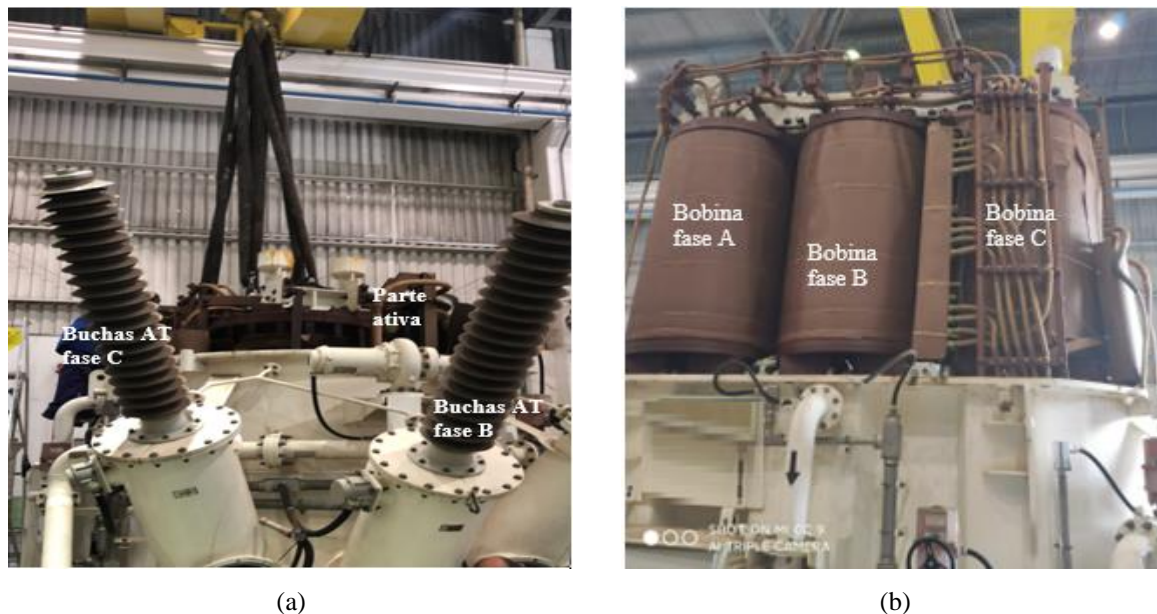
Figura A.2 - Retirada da Tampa Superior do Transformador



Fonte: autoria própria

A Figura A.3a, segue com a vista frontal da etapa de içamento da parte ativa do tanque principal, à frente visualiza-se as buchas de alta tensão e na Figura A.3b têm-se, pela vista lateral com a parte ativa completamente extraída do tanque.

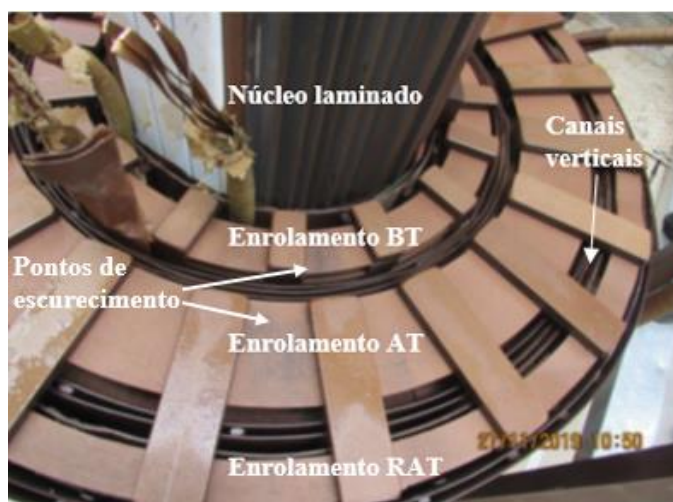
Figura A.3 - Içamento parte ativa do tanque principal: (a) vista frontal, buchas fase C e B; (b) parte ativa vista lateral bobinas fase A, B e C.



Fonte: autoria própria

A Figura A.4 apresenta a vista superior de colunas com as bobinas montadas junto ao núcleo laminado. Na figura pode-se visualizar os enrolamentos de BT, AT e RAT, bem como os canais verticais de circulação de óleo. As indicações de ponto de escurecimento nos calços superiores remetem às investigações do Cenário 4.

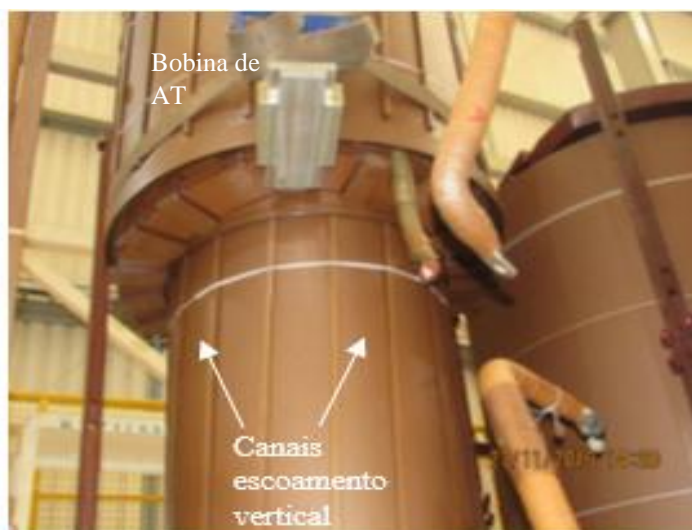
Figura A.4 - Vista superior de uma das colunas com os três enrolamentos BT, AT e RAT.



Fonte: autoria própria

Na etapa de descolunamento, Figura A.5, os enrolamentos são separados um a um até que se tenha acesso tanto ao interior das bobinas quanto ao núcleo magnético laminado. Sob a bobina de AT, é possível visualizar a bobina de BT bem como os espaçadores que criam os canais de escoamento verticais.

Figura A.5 - Processo de descolunamento bobina AT.



Fonte: autoria própria

Na Figura A.6 abaixo apresenta o enrolamento de AT, agora sem as capas. Na foto há indicativos dos vários pontos de guias deformadas, bem como a indicação do local da falha. Esta visão permitiu associar se associar a falha às hipóteses simuladas no Cenário 1.

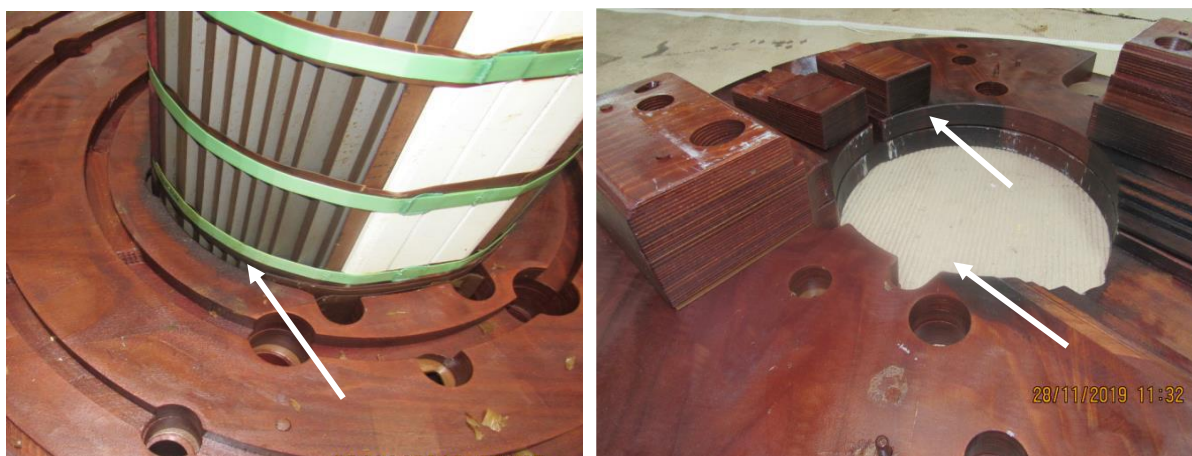
Figura A.6 –Enrolamento AT com indicações do ponto de ruptura na base da bobina e demais guias deformadas.



Fonte: autoria própria

No registro seguinte da Figura A.7a, já com o núcleo exposto, é possível ter a visão dos anéis de prensagem inferiores e dos dutos de entrada. Próximo ao núcleo magnético há sinais de sobreaquecimento, enquanto na Figura A.7b, de maneira análoga observa-se regiões de carbonização próximas aos dutos de saída do enrolamento AT. Essas verificações foram associadas a condições impostas nos Cenários 3, 5, 7 e 8.

Figura A.7 - Detalhe núcleo e anéis de prensagem inferior: (a) destaque para sinais de sobreaquecimento próximo à coluna; (b) detalhe sinais de sobreaquecimento no diâmetro interno do anel de prensagem.



(a)

(b)

Fonte: autoria própria

Enquanto na Figura A.8 observa-se sinais de sobreaquecimento nas tiras de papelão que envolvem o núcleo próximos à base da bobina, além há alguns pontos de deformação das chapas laminadas caudadas por provável impacto mecânico. Essas verificações estão associadas aos Cenários 3, 5, 7 e 8.

Figura A.8 Detalhe Núcleo: (a) pontos de aquecimentos no julgo inferior; (b) pontos de deformação por possível impacto



(a)

(b)

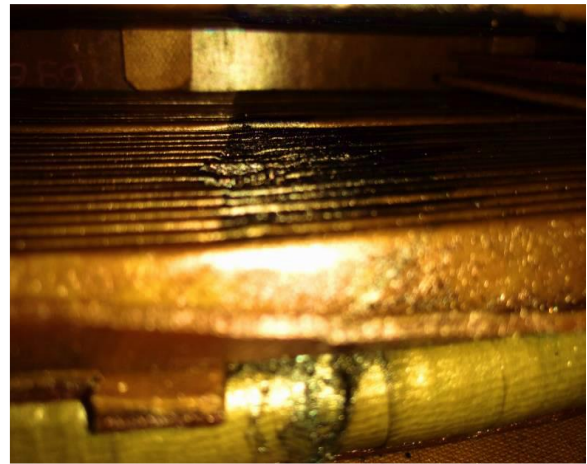
Fonte: autoria própria

Por fim, a Figura A.9a apresenta sinais claros de rompimento dos dielétricos, com impressões de trilhamentos elétricos no papel que envolve o condutor de cobre do disco 1 em direção ao disco 2. Figura A9b traz as evidências do ponto de falha entre espiras, secundário de um comprometimento dos dielétricos dos discos. Essas verificações foram associadas aos Cenários 1, 2, 6 e 8.

Figura A.9 - Enrolamento AT: (a) Discos 1 e 2 com sinais de trilhamentos elétricos; (b) sinais de curto entre espiras no disco 2.



(a)



(b)

Fonte: autoria própria