

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CHRISTIANO WENDT DOS SANTOS

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SOLUÇÃO UTILIZANDO O
MODELO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL E MODELOS DE
REDE APLICADOS AO ESCOAMENTO INTERNO DO ÓLEO NO ENROLAMENTO
PRIMÁRIO DE UM AUTOTRANSFORMADOR

FOZ DO IGUAÇU

2018

CHRISTIANO WENDT DOS SANTOS

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SOLUÇÃO UTILIZANDO O MODELO DE
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL E MODELOS DE REDE
APLICADOS AO ESCOAMENTO INTERNO DO ÓLEO NO ENROLAMENTO
PRIMÁRIO DE UM AUTOTRANSFORMADOR

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Ricardo da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Volmir Eugênio Wilhelm

FOZ DO IGUAÇU

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

CHRISTIANO WENDT DOS SANTOS

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SOLUÇÃO UTILIZANDO O MODELO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL E MODELOS DE REDE APLICADOS AO ESCOAMENTO INTERNO DO ÓLEO NO ENROLAMENTO PRIMÁRIO DE UM AUTOTRANSFORMADOR

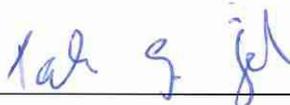
Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Métodos Numéricos em Engenharia.



Prof. Dr. Juliano Ricardo da Silva
Orientador – UNIOESTE



Prof. Dr. Eduardo Cesar Dechechi
UNIOESTE



Eng. Msc. Tales Gottlieb Jahn
Fundação PTI

Foz do Iguaçu, 10 de dezembro de 2018.

Dedico este trabalho ao grupo de pesquisa GT Alta Tensão do Ceasb-PTI

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus, pelas escolhas que tomei durante a minha caminhada na vida.

Agradeço aos meus pais, Jeneci Maria Wendt e Saulo dos Santos pelo incentivo durante esta jornada.

Agradeço ao meu orientador, professor Juliano Ricardo da Silva, pela dedicação em me orientar e por todo o conhecimento compartilhado ao longo deste trabalho.

A todos os meus colegas do Ceasb: Alexandra, Christian, Débora, Edson, Luis Sucapuca, Luiz Fernando, Rodrigo, Edivaldo, Luiz Pinheiro, Pablo e Rafael que me proporcionaram o incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

A Gislaine Siebre Cezar, por todo o carinho, empenho e dedicação e respeito ao longo desta jornada.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus professores por toda a dedicação e comprometimento durante a minha formação nesta pós-graduação.

RESUMO

Os transformadores de potência são equipamentos essenciais para transmissão e distribuição de energia elétrica. Possuem a finalidade de modificar os níveis de tensão e corrente do sistema elétrico, proporcionando a transmissão de grandes blocos de energia com baixas perdas. A capacidade de transmissão de potência do transformador está relacionado com o seu desempenho térmico, assim a temperatura dos enrolamentos torna-se um parâmetro importante para determinar condições de operação do equipamento e seu limite de carregamento. Para avaliar a eficiência do equipamento e o envelhecimento precoce no isolamento é necessário determinar os valores de temperatura no interior do transformador. Desta forma, pode-se determinar o comportamento do óleo nos dutos de resfriamentos dos enrolamentos, na etapa de projeto, por meio de modelos matemáticos. Entre esses, tem-se o modelo de rede térmico-hidráulico, em que utiliza-se uma rede com parâmetros concentrados que representam os arranjos dos dutos, a qual determinam as velocidades, pressões e temperaturas médias em cada duto. Com a evolução dos recursos computacionais facilitou a utilização de modelos numéricos em problemas físicos de geometria complexas, solucionando as equações governantes, Navier Stokes, entre elas está a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), que permite modelar detalhes do fluxo de óleo dentro dos dutos de resfriamento. O trabalho tem como objetivo a comparação entre a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), e o modelo de rede termo-hidráulico, com o intuito de avaliar a discrepância dos valores de temperatura em cada duto de resfriamento de um enrolamento do tipo disco entrelaçado, determinando assim, a localização dos pontos mais quentes nos dutos de óleo em ambos os métodos. Uma vez que existem dificuldades em determinar, exatamente, a localização e os níveis de temperatura por meio de medição direta. O estudo é realizado em um autotransformador, com potência de 470MVA, 50 Hz e tensões 525/241.5/13.8 kV, com modo de operação de arrefecimento ODAF e ODAN. Por fim o resultados foram comparados com os resultados fornecidos pela fabricante.

Palavras-chave: Autotransformadores. Enrolamento tipo disco. Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Modelo de Rede.

ABSTRACT

The Power transformers are essential equipment for the transmission and distribution of electricity. They have the purpose of modifying the voltage and current levels of the electrical system, providing the transmission of large blocks of energy with low losses. The power transmission capacity of the transformer is related to its thermal performance, so the winding temperature becomes an important parameter to determine the operating conditions of the equipment and its load limit. To evaluate the efficiency of the equipment and the early aging in the insulation it is necessary to determine the temperature values inside the transformer. In this way, the behavior of the oil in the cooling ducts of the windings, in the design stage, can be determined by means of mathematical models. Among these, the thermal-hydraulic network model is used, in which a network with concentrated parameters representing the pipeline arrangements is used, which determines the average velocities, pressures and temperatures in each duct. With the evolution of the computational resources, it facilitated the use of numerical models in complex physical geometry problems, solving the governing equations, Navier Stokes, among them is Computational Fluid Dynamics (CFD), which allows modeling details of the oil flow inside the ducts cooling. The objective of this work is to compare the Computational Fluid Dynamics (CFD) and the thermohydraulic network model, in order to evaluate the discrepancy of the temperature values in each cooling duct of a interlaced disk type winding, thus determining the location of the hot spots in the oil ducts in both methods. Since there are difficulties in accurately determining the location and temperature levels by direct measurement. The study is performed in an autotransformer, with power of 470MVA, 50 Hz and voltages 525 / 241.5 / 13.8 kV, with ODAF and ODAN cooling operation mode. Finally the results were compared with the results provided by the manufacturer in addition to being compared to each other, in this case the temperature elevation presented coherent in both models. And in relation to the hottest point the CFD model had close values provided by the manufacturer.

Keywords: Autotransformers, Winding Disc, Computational Fluid Dynamics (CFD), Network Model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Variação do coeficiente convectivo local ao longo de uma placa plana.	20
FIGURA 2 - Camada limite hidrodinâmica laminar desenvolvida.....	21
FIGURA 3 - Camada limite térmica desenvolvida em um tubo de calor circular	22
FIGURA 4 - Núcleo de ferromagnético.....	23
FIGURA 5 - Circuito elétrico de um transformador.....	24
FIGURA 6 - Transformador com a representação do seu fluxo disperso.....	26
FIGURA 7 - Esquema elétrico de um autotransformador.....	27
FIGURA 8 - Disposição dos enrolamentos.....	28
FIGURA 9 - Fluxo do campo magnético.....	30
FIGURA 10 – (a) Correntes parasitas em um núcleo único sólido (b) Correntes parasitas em um núcleo laminado.....	31
FIGURA 11 – Transformador	33
FIGURA 12 - Empilhamento de diversos fios isolados em um único condutor	33
FIGURA 13 - (a) Montagem dos enrolamentos com os respectivos núcleos (b) Aspecto físico do núcleo	34
FIGURA 14- Circuito de refrigeração: (a) fluxo direcionado (b) fluxo não direcionado	34
FIGURA 15 - Fluxograma da metodologia CFD.....	38
FIGURA 16 – Seção do modelo de rede de um enrolamento do tipo disco.....	40
FIGURA 17 - Esquema da enumeração das variáveis de interesse.....	41
FIGURA 18 - Geometria do autotransformador.....	48
FIGURA 19 - Condutor de cobre.....	50
FIGURA 20 - Papel de isolamento sobre os condutores.....	50
FIGURA 21 - Espaçadores Radiais.....	51
FIGURA 22 - Defletores do óleo.....	51
FIGURA 23 - Enrolamento primário do autotransformador	52
FIGURA 24 - Duto de óleo do enrolamento primário do autotransformador	52
FIGURA 25 - Formação dos blocos na geometria.....	53
FIGURA 26 – Malha computacional dos dutos de resfriamento do enrolamento série	54
FIGURA 27 - Malha Computacional do modelo	54
FIGURA 28 – Ilustração do dutos de resfriamento do enrolamento série	56

FIGURA 29 - Entrada do modelo numérico.....	57
FIGURA 30 - Saída do modelo numérico.....	57
FIGURA 31 - Parede dos papeis de isolamento.....	58
FIGURA 32 - Parede dos Espaçadores	58
FIGURA 33 - Esquema elétrico da conexão dos enrolamentos	60
FIGURA 34 – Fonte de calor no enrolamento	60
FIGURA 35 – Erro Residual da conservação de massa e momento.....	62
FIGURA 36 - Erro Residual da conservação de energia	62
FIGURA 37 – Convergência da velocidade.....	63
FIGURA 38 - Convergência da temperatura	64
FIGURA 39 – Campo de velocidade ao longo do circuito hidráulico do enrolamento	65
FIGURA 40 - Distribuição da temperatura do óleo no circuito hidráulico do enrolamento.	66
FIGURA 41 – Localização dos pontos quentes no circuito hidráulico do enrolamento.	67
FIGURA 42 - Temperatura média do óleo no duto vertical externo do circuito hidráulico.....	68
FIGURA 43 –Fluxograma do modelo de rede do cálculo das velocidades	69
FIGURA 44 - Fluxograma do modelo de rede do cálculo das temperaturas	70
FIGURA 45 - Modelo de rede da seção do enrolamento primário, identificando os dutos verticais interno e externo.	71
FIGURA 46 - Velocidades nos dutos verticais interno e externo ao longo do enrolamento	71
FIGURA 47 - Velocidades nos dutos horizontais da última seção do enrolamento...	72
FIGURA 48 - Perfil de temperatura média do óleo mineral nos dutos verticais interno e externo ao longo do enrolamento.....	73
FIGURA 49 - Distribuição da velocidade e temperatura do óleo mineral nos dutos de resfriamento da última seção do enrolamento série.....	73
FIGURA 50 - Temperatura dos discos ao longo do enrolamento.....	74
FIGURA 51 - Temperatura dos discos da última seção do enrolamento série.....	75

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Qualidade dos elementos da malha	55
QUADRO 2 - Estudo da Independência da Malha	55
QUADRO 3 - Características do condutor.....	59
QUADRO 4 – Propriedades do óleo mineral.....	61
QUADRO 5 –Velocidade médias no circuito hidráulico do enrolamento	65
QUADRO 6 – Comparação da temperatura de saída do modelo.....	66
QUADRO 7 – Comparação das temperaturas de ambos modelos	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVO	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ESCOAMENTO INTERNO	19
2.1.1 Convecção	19
2.2 NOÇÕES FUNDAMENTAIS SOBRE TRANSFORMADORES	22
2.2.1 Princípio de funcionamento	22
2.2.2 Autotransformador	27
2.3 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	28
2.3.1 Perdas no enrolamento	29
2.3.1.1 Perdas Ôhmicas	29
2.3.1.2 Perdas por Correntes de Foucault	30
2.3.2 Rendimento	31
2.4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE TRANSFORMADORES A ÓLEO	32
2.4.1 Parte Ativa: Enrolamentos	33
2.4.2 Óleo Isolante	35
2.5 MÉTODOS NUMÉRICOS	35
2.5.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional	38
2.5.2 Ansys CFX	39
2.6 MODELO DE REDE	40
2.6.1 Determinação da Pressão e Velocidade do Óleo	41
2.6.2 Temperatura do Óleo e do Condutor	44
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3 MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
4 MODELO NUMÉRICO POR VOLUMES FINITOS (CFD) DO CIRCUITO HIDRÁULICO DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO	50
4.1 GEOMETRIA TRIDIMENSIONAL	50
4.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO	53
4.3 CONFIGURAÇÃO DA FÍSICA DO MODELO	56

4.3.1 Perdas por Efeito Joule Devido a Passagem de Corrente no Enrolamento	59
4.3.2 Definição das Propriedades Físicas do Óleo.....	61
4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	61
4.4.1 Convergência Numérica.....	61
4.4.2 Convergência da Física.....	63
4.4.3 Avaliação dos Resultados do Modelo Numérico	64
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5 MODELO DE REDE DO CIRCUITO HIDRÁULICO DO ENROLAMENTO	
PRIMÁRIO	69
5.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE REDE.....	69
5.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO DE REDE	70
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO POR VOLUMES FINITOS	
COM O MODELO DE REDE.....	77
6.1 ANÁLISE DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE OS MODELOS	77
6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
7 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos essenciais para transmissão e distribuição de energia elétrica pela finalidade de modificar os níveis de tensão e corrente do sistema elétrico. Devido a importância do equipamento é necessária a garantia da continuidade de funcionamento do equipamento, na qual uma falha pode resultar em prejuízos devido ao alto custo de interrupção de energia para as empresas de energia. Logo, é necessário quantificar a vida útil do equipamento, a fim de, adotar políticas de operação e manutenção preventivas para o equipamento.

Quando o transformador opera em regiões fora do ponto de projeto, ou seja, em regiões de sobretensão, haverá um desgaste acelerado dos papéis de isolamento, pois estes garantem o isolamento elétrico da parte ativa do equipamento, em razão das elevadas temperaturas que ocorrem no interior do equipamento, antecipando assim, o fim da vida útil do transformador. Logo é de expressa importância o monitoramento de sua temperatura.

Atualmente, a Itaipu Binacional monitora os transformadores da subestação da margem direita a partir da temperatura no topo de óleo de forma direta e as temperaturas dos enrolamentos de forma indiretas. Devido à medição da temperatura do enrolamento ser de forma indireta, na qual utilizam-se correções na medição de temperatura no topo de óleo, os valores monitorados podem sofrer divergências dos valores reais da temperatura do enrolamento.

De acordo com Silva (2005), para determinar com precisão o comportamento da temperatura do óleo interno ao transformador é pode-se utilizar a modelagem numérica do processo físico, sendo está capaz de detalhar o funcionamento, por completo, do equipamento.

Logo este trabalho aborda a avaliação do desempenho térmico dos dutos de resfriamentos do transformador, localizado na subestação da margem direita de Itaipu, uma vez que o único parâmetro medido de forma direta é a temperatura do óleo no topo do tanque.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Susa (2005), o transformador de potência é um dos componentes mais caros em um sistema de elétrico. Conhecer o equipamento é essencial para valorizar o investimento e reduzir o custo associado à operação do transformador. A temperatura do ponto quente do enrolamento é um dos parâmetros mais importantes para determinar as condições térmicas, com o intuito do aumento da eficiência operacional do equipamento e minimizar a probabilidade de interrupções inesperadas.

Algumas grandezas físicas são de difícil modo de medição em transformadores de potência, entre elas estão em conhecer os níveis de temperatura no interior dos enrolamentos e do material ferromagnético do núcleo do transformador. Devido à dificuldade de medição direta de temperatura, utiliza-se um sistema de predição analítica, conhecida como imagem térmica para conhecer as temperaturas mais quentes do interior do equipamento.

De acordo com o Silva (2015), diversos autores e especialistas desenvolvem métodos que determinam as medidas internas do transformador, porém esses métodos não quantificam corretamente a dinâmica do aquecimento no interior da parte ativa do equipamento, pois as constantes de tempo dos enrolamentos e do óleo são diferentes. Desta forma, o aquecimento excessivo nos enrolamentos, ocorrido devido à dinâmica do fenômeno físico, não são mensurados pelos sensores de imagem térmica.

Para conseguir estimar as temperaturas internas do equipamento neste trabalho é utilizado a modelagem numérica dos processos físicos por dois métodos diferentes: o modelo de redes e CFD. Os métodos consideram a geometria do problema, modelando em função das variáveis de interesse de forma a considerar por completo funcionamento do equipamento.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é confrontar os métodos relacionados ao CFD e o modelo de Rede (MR) com o intuito de avaliar e comparar os seus valores de temperatura.

Para atingir o objetivo geral, serão propostos os seguintes objetivos específicos, sendo:

- a) Obter o modelo geométrico tridimensional do enrolamento primário do autotransformador T5 por meio da ferramenta CAD SolidWorks;

- b) Analisar os resultados do modelo numérico (CFD) do circuito hidráulico do enrolamento série do autotransformador T5 por meio dos campos de velocidade e temperatura, comparando com os valores fornecidos pelo fabricante;
- c) Avaliar os resultados do modelo de rede do circuito hidráulico do enrolamento série do autotransformador T5 por meio das velocidades e temperaturas médias, confrontando com os valores fornecidos pelo fabricante.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em sete capítulos, sendo:

Capítulo 2. Apresenta o referencial teórico, a qual realizou uma breve revisão bibliográfica dos conceitos abordados do trabalho, sendo: Escoamento em dutos, Noções fundamentais sobre transformadores, caracterizas de desempenho, características construtivas em transformadores à óleo e métodos numéricos.

Capítulo 3. Descreve a metodologia aplicada no enrolamento primário, conhecido como enrolamento série, de um autotransformador.

Capítulo 4. Apresenta o desenvolvimento do modelo numérico por volumes finitos do circuito hidráulico do enrolamento primário, neste caso dividiu o capítulo de acordo com a metodologia CFD: Criação da geometria, discretização do domínio, configuração da física, resultados da simulação e conclusão do capítulo.

Capítulo 5. Apresenta o desenvolvimento do modelo do modelo de rede do circuito hidráulico do enrolamento primário

Capítulo 6. Comparou os resultados dos dois métodos descritos nos capítulos anteriores.

Capítulo 7. Por fim, o último capítulo apresenta às conclusões do respectivo trabalho, analisando os objetivos alcançados tanto o geral quanto os específicos. Além disso, neste capítulo apresenta os temas a serem estudados

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os aspectos da física e construtivos de transformadores de potência, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento do trabalho. Além de apresentarem os modelos numéricos e modelos analíticos utilizados em projetos de resfriamento destes equipamentos.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ESCOAMENTO INTERNO

A transmissão de calor é a área envolvida em múltiplos problemas de engenharia, englobando os processos que envolvem a transferência da energia na forma de energia térmica.

Segundo Incropera et al (2012, p. 2) a transferência de calor é retratada como uma “energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”. Ao existir uma diferença de temperatura entre dois meios, haverá necessariamente a transferência de energia por meio do calor.

A transferência de calor é evidente em sistemas que não estão em equilíbrio termodinâmico, logo a transmissão do calor tem como objetivo em manter equilíbrio no sistema, ou seja, se houver o equilíbrio termodinâmico não haverá transferência de calor, pois não haverá diferença de temperatura entre os sistemas. (ÇENGEL E GHAJAR, 2012).

Tanto a primeira quanto à segunda lei da termodinâmica são enunciadas e respeitadas na transmissão de calor, pois quantificam todas as transformações de energia (Kreith, 1977, p.1).

A transferência de calor não é expressa por uma única relação, mas por uma combinação de leis independentes que regem a transmissão de calor. De acordo com Çengel e Ghajar (2012) o calor pode ser transferido de três modos diferentes, sendo por condução, convecção e por radiação. Esses três mecanismos necessitam de uma mesma força motriz para garantir a transferência de calor, ou seja, necessitam de uma diferença de temperatura para impulsionar a transmissão do calor.

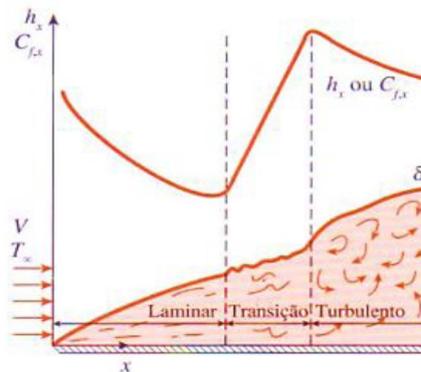
2.1.1 Convecção

Incropera et al (2012) definem a transferência de calor por convecção como a conciliação simultânea de dois mecanismos da transferência de calor, havendo a

combinação do transporte de energia pelo movimento do fluido (transporte de massa) com a difusão térmica entre as moléculas do fluido (fenômeno de condução).

De acordo com Kreith (1977) e Incropera et al (2012) o coeficiente convectivo (h) é uma complexa função do escoamento tal que os seus valores numéricos não são constantes ao longo da superfície, como pode ser observado na FIGURA 1. Este coeficiente convectivo representa os parâmetros que influenciam na transferência de calor, como as propriedades térmicas, geometria da superfície e a velocidade do fluido.

FIGURA 1 - Variação do coeficiente convectivo local ao longo de uma placa plana.



FONTE: Çengel e Ghajar (2012)

De acordo com Holman (1983) quando o fluido entra em contato direto com uma superfície sólida, este adere à superfície devido ao efeito da viscosidade do fluido, restringindo o deslizamento sobre a placa.

Essa implicação de não deslizamento do fluido na superfície sólida resulta na transferência de calor puramente de condução, como é explicado por Çengel e Ghajar (2012), pois a camada do fluido é imóvel sobre a superfície assumindo assim uma velocidade igual a zero. Logo pode se considerar que o mecanismo de transmissão de calor pela condução térmica sendo expressa pela Equação (1).

$$q'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (1)$$

Após uma simples manipulação matemática, pode-se determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, representado pela Equação (2).

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (2)$$

De acordo com Holman (1983) a convecção forçada é caracterizada pela simples aplicação de trabalho pelo meio externo sobre o fluido, forçando este a escoar sobre uma superfície. Este trabalho pode ser realizado com auxílio de máquinas hidráulicas.

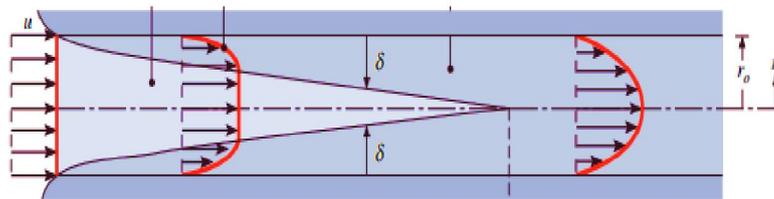
Escoamentos em espaços confinados são muito utilizados na prática, como o resfriamento ou mesmo aquecimento de um determinado fluido conforme relata Kreith (1977).

Çengel e Ghajar (2012) e Incropera et al (2012) caracterizam o escoamento interno como sendo um fluido que está completamente confinado por uma superfície, em que a sua camada limite tanto hidrodinâmica quanto a térmica são incapazes de se desenvolver completamente.

Segundo Incropera et al (2012, p. 308) “Quando o fluido entra em contato com a superfície, os efeitos viscosos se tornam importantes e uma camada-limite se desenvolve ao longo do duto”. O desenvolvimento desta camada limite se encontra na região de entrada sendo cessada com a fusão desta no eixo central do tubo.

Quando o perfil de velocidade se mantém inalterado ao longo do seu percurso, pode-se dizer que alcançou a região completamente desenvolvida, FIGURA 2.

FIGURA 2 - Camada limite hidrodinâmica laminar desenvolvida

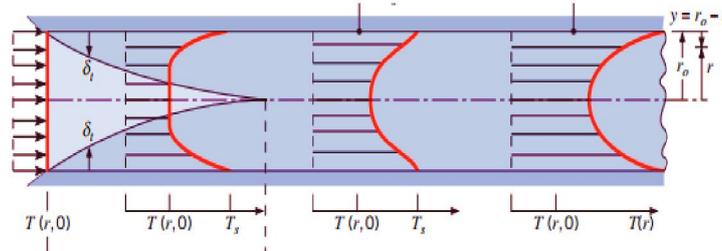


FONTE: INCROPERA (2011)

Além do surgimento dessa camada hidrodinâmica, Incropera et al (2011) observa que quando se tem contato entre o fluido e a superfície, ambos com temperaturas diferentes, as partículas do fluido mais próximo da superfície sólida assumem a própria temperatura da superfície e como consequência há uma

transferência de calor dada pela convecção entre o fluido e a superfície sólida, dando início ao desenvolvimento da camada limite térmica na região de entrada, ilustrado na FIGURA 3.

FIGURA 3 - Camada limite térmica desenvolvida em um tubo de calor circular



FONTE: INCROPERA (2011, p. 524)

Essa camada limite começa a se desenvolver até que atinja uma nova região, sendo chamada de região completamente desenvolvida termicamente como é mencionada pelo Çengel e Ghajar (2012). Essa região pode ser identificada quando a temperatura adimensional permanecer inalterada.

2.2 NOÇÕES FUNDAMENTAIS SOBRE TRANSFORMADORES

O transformador é um equipamento cuja a finalidade é transmitir a energia elétrica de um circuito a outro, modificando os valores de tensões e correntes por meio da indução eletromagnética.

Entre os vários tipos de transformadores, o trabalho aborda os transformadores de potência, a qual são destinados a rebaixar ou elevar a tensão e consequentemente elevar ou reduzir a corrente entre os enrolamentos, de modo que não se altere a potência do circuito.

2.2.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos transformadores estão relacionados com a Lei de Faraday e a Lei de Lenz.

Segundo a Lei de Faraday a variação do fluxo magnético proporciona uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida instantânea. Caso o fluxo magnético estiver variando continuamente em relação ao tempo, haverá o surgimento de uma tensão

induzida. Enquanto que a Lei de Lenz relata que a direção da f.e.m. induzida se opõe a mudança do fluxo magnético, a qual pode ser expressa pela Equação (3), (Guru e Hiziroglu,2001).

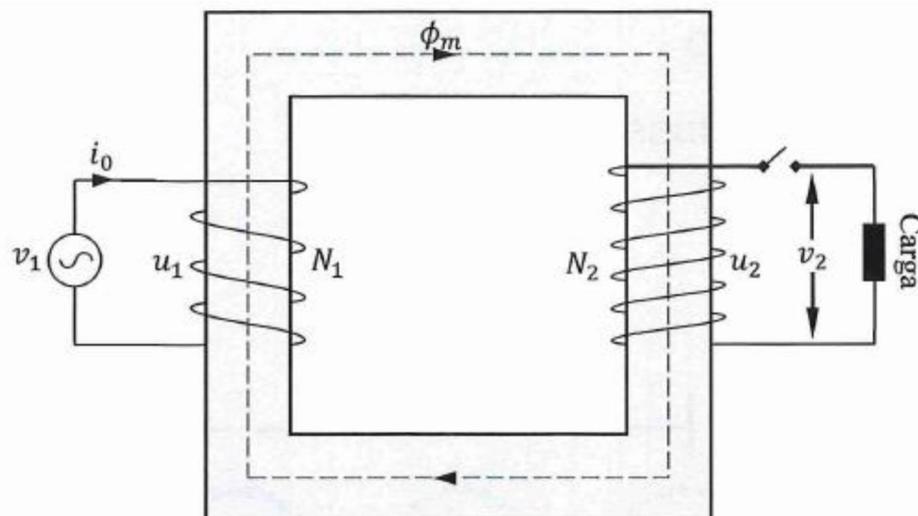
$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

O Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) conceituam o transformador, sendo um dispositivo que possui dois ou mais circuitos elétricos acoplados por um circuito magnético em comum. Esse acoplamento é feito basicamente por duas bobinas (indutores), chamados de enrolamento primário e enrolamento secundário.

O acoplamento magnético é obtido por um campo magnético produzido na primeira bobina que por sua vez produz uma tensão induzida na segunda bobina. A magnitude da tensão induzida é estabelecida pela relação do número de espiras do enrolamento primário e enrolamento secundário com é explicado por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006).

Uma maneira de melhorar o transporte do fluxo magnético entre as bobinas primária e secundária é utilizar um material ferromagnético, pois este confina a passagem do fluxo magnético por um caminho limitado melhorando assim o transporte do fluxo magnético (Guru e Hiziroglu, 2001).

FIGURA 4 - Núcleo de ferromagnético

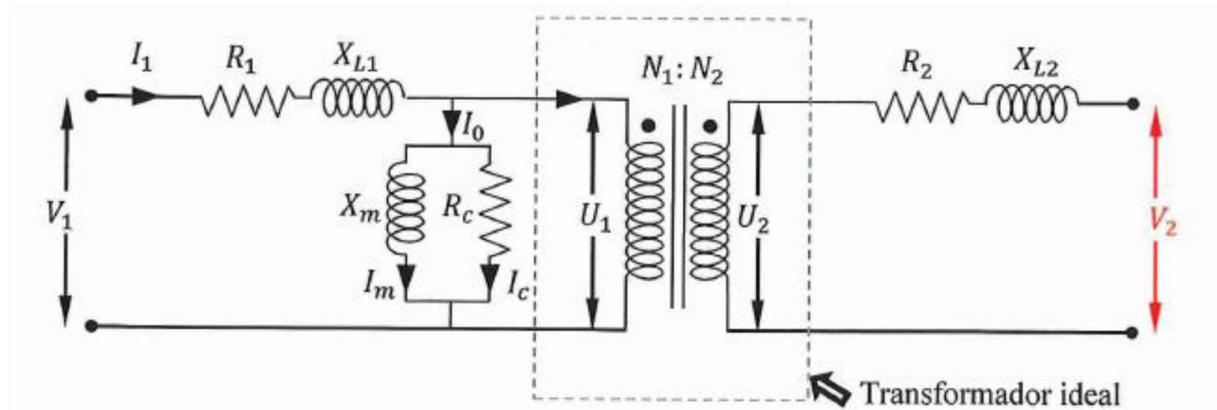


FONTE: WEG (2018)

Com a utilização do ferromagnético ou mais conhecida como núcleo de ferro é possível diminuir as perdas do fluxo magnético que não são aproveitadas no enrolamento secundário, conhecido como fluxo disperso, ou seja, uma parcela do fluxo magnético criado no enrolamento primário não enlaça o enrolamento secundário como é ressaltado por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006).

Kosow (2000) bem como Guru e Hiziroglu (2001) explicam que um transformador real, é uma combinação de um transformador ideal com as suas respectivas impedâncias externas, sendo essa uma maneira mais adequada de representar a física do transformador, como pode se observar na FIGURA 5

FIGURA 5 - Circuito elétrico de um transformador



Desta forma pode se definir um transformador ideal, como um equipamento que despreza qualquer tipo de perda nos transformadores de potência desconsiderando assim as resistências elétricas dos enrolamentos primários e secundários, além de desconsiderar as perdas do núcleo conforme Del Toro (1994)

Assim a tensão induzida no enrolamento primário pode ser expressa pela seguinte Equação (4).

$$V_1 = U_1 = N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (4)$$

Enquanto no enrolamento secundário, haverá uma *f.e.m.* induzida pelo primário a qual pode ser expressa pela Equação (5).

$$V_2 = U_2 = N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (5)$$

Kosow (2000), reforça que a força eletromotriz induzida U_1 produzida na bobina primária, é criada para se opor instantaneamente á tensão aplicada V_1 . Da mesma forma haverá uma força eletromotriz induzida no enrolamento secundário que se opõe ao fluxo mútuo (Φ_m) de tal maneira que produz uma corrente no secundário.

Para Kosow (2000) bem como Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) explicam que a variação do fluxo mútuo do transformador ideal que concatena o primário e secundário é o mesmo. Dividindo a Equação (4) pela Equação (5), obtém a Equação (6).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

A Equação (6) estabelece relações da tensão primária com a tensão secundária que é proporcional ao número de espiras do enrolamento primária e enrolamento secundário.

Conforme a FIGURA 5 tanto o enrolamento primário quanto o enrolamento secundário possuem uma queda de tensão devido à resistência a passagem da corrente elétrica, sendo essa representada por uma resistência elétrica.

$$V_i = Ri_i \quad (7)$$

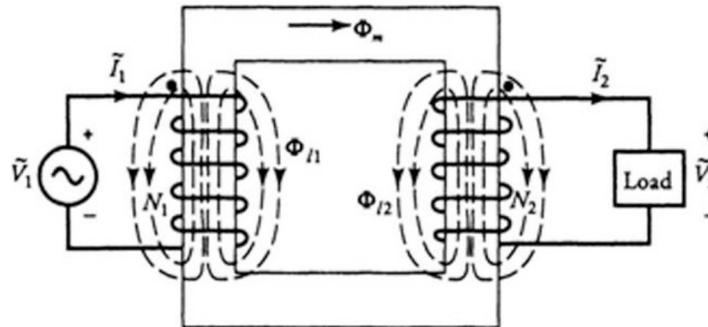
Devido a essa queda de tensão, a eficiência do transformador real não é mais 100%.

Fitzgerald, Kingsley e Umans, (2006) salientam que o fluxo magnético criado tanto do enrolamento primário quanto do enrolamento secundário do transformador pode ser dividido em duas componentes, um sendo o fluxo mútuo Φ_m que está limitado essencialmente no núcleo de ferro magnético e o outro sendo fluxo disperso Φ_d que concatena somente o seu próprio enrolamento.

Logo nem todo fluxo criado no enrolamento é confinado no núcleo magnético. Parte do fluxo conhecido com fluxo disperso Φ_d completa um caminho através do ar, como é ressaltado por Guru e Hiziroglu (2001). Portanto quando ambos os

enrolamentos do transformador transportam correntes, cada enrolamento cria o seu próprio fluxo disperso, como é ilustrado na FIGURA 6.

FIGURA 6 - Transformador com a representação do seu fluxo disperso.



Fonte: GURU (2001, p. 214)

Como é ilustrado na FIGURA 6, Guru e Hiziroglu (2001) ressaltam que o fluxo disperso do enrolamento primário não se conecta com o enrolamento secundário, do mesmo modo que o fluxo disperso do secundário está restringido somente no enrolamento secundário e não se liga no enrolamento primário. Logo conclui que não existe transferência de energia do circuito primário com o circuito secundário pelo fluxo disperso.

Tanto Guru e Hiziroglu (2001) quanto Kosow (2000) relatam que o fluxo disperso nos enrolamentos do transformador pode ser representado por reatância de dispersão. Dessa maneira a reatância de dispersão primária pode ser calculada pela Equação (8).

$$X_{l1} = 2\pi f L_1 \quad (8)$$

De forma semelhante à reatância de dispersão do enrolamento secundário pode ser determinada pela Equação (9).

$$X_{l2} = 2\pi f L_2 \quad (9)$$

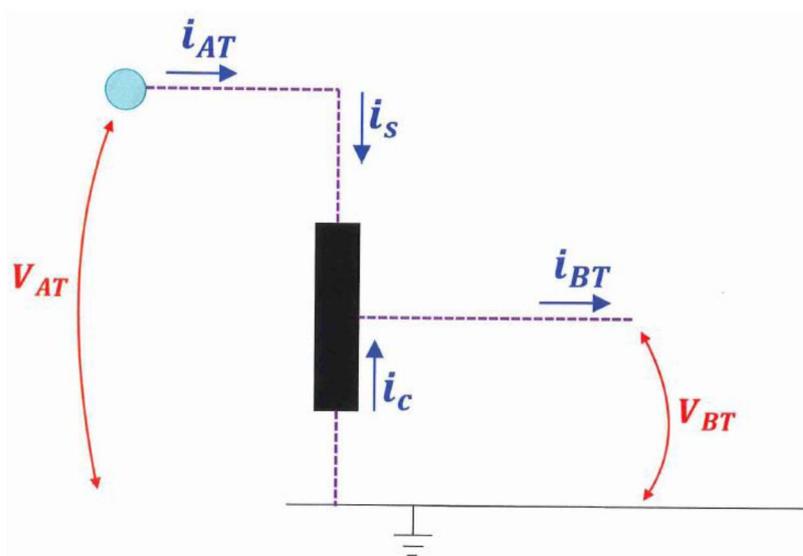
Em uma maneira geral a tensão nos terminais no enrolamento primário é constituída por três componentes como é explicado por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) sendo uma queda de tensão devido à resistência do enrolamento primário, uma

queda de tensão devido à reatância proveniente ao fluxo disperso V do enrolamento primário e a FEM induzida no enrolamento primário criando o fluxo mútuo.

2.2.2 Autotransformador

Um autotransformador é uma máquina de construção elétrica e possui características semelhantes de um transformador, mas que, diferentemente disso, tem apenas um único enrolamento entorno do núcleo ferromagnético. Como pode observar na FIGURA 7, a corrente do enrolamento primário (alta tensão) é determinada como corrente do enrolamento em série. Enquanto que a corrente do secundário (baixa tensão) é a combinação da corrente e do enrolamento série com o enrolamento comum.

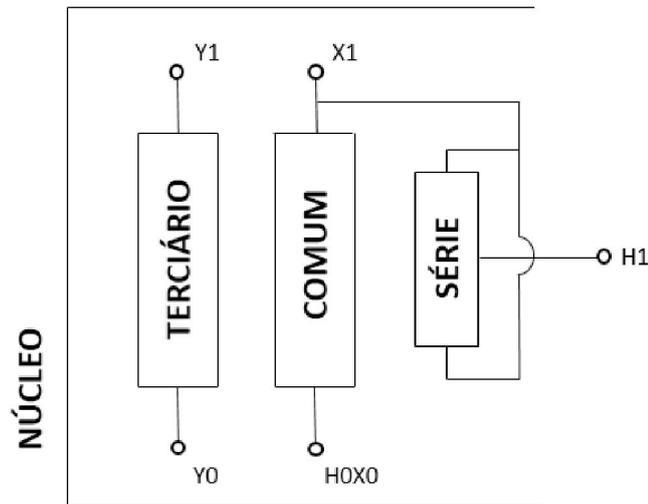
FIGURA 7 - Esquema elétrico de um autotransformador



FONTE: WEG (2018)

Na questão operacional, os autotransformadores são idênticos aos transformadores convencionais, ou seja, podem ser utilizados como elevadores ou abaixadores de tensões. A diferença está no aspecto construtivo dos seus enrolamentos. Nos autotransformadores o circuito primário está interligado com o secundário, conforme FIGURA 8, permitindo que as tensões sejam reversíveis e que suas dimensões sejam reduzidas, conforme Chapman (2013).

FIGURA 8 - Disposição dos enrolamentos



Em um autotransformador, a porção comum (“também chamado de enrolamento comum”) do enrolamento único é parte dos enrolamentos “primário” e “secundário”. A parte restante do enrolamento é chamada de “enrolamento em série” e é que fornece a diferença de tensão entre os dois circuitos.

A relação de tensão e corrente é:

$$i_1 = \left(1 + \frac{N_2}{N_1}\right) i_2 \quad (10)$$

$$V_1 = \left(1 + \frac{N_1}{N_2}\right) V_2 \quad (11)$$

Portanto, ao conectar um transformador como um autotransformador, ele aumenta sua capacidade de transferir energia em uma proporção determinada pela relação de transformação de conexão como um transformador. A implicação direta dessa dedução matemática é que para transferir a mesma quantidade de energia entre dois circuitos, um autotransformador é menor que um transformador equivalente. Outras vantagens são: menor corrente de magnetização e melhor o fator de potência, porém o equipamento não apresenta um isolamento elétrico entre a suas bobinas.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO

Neste capítulo é apresentado os fatores que influenciam no desempenho da máquina elétrica, ou seja, os tipos de perdas na parte ativa.

2.3.1 Perdas no enrolamento

2.3.1.1 Perdas Ôhmicas

Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) caracterizam as perdas ôhmicas, também chamadas de perdas DC, em razão da passagem da corrente elétrica nos enrolamentos dos transformadores. Em equipamentos de corrente contínua (CC) estas perdas são proporcionais quadrado da corrente.

Outro fator predominante sobre as perdas ôhmicas é a resistência da passagem da corrente elétrica no material. Esta resistência depende da resistividade do material, além do aspecto geométrico do condutor, como pode observar na Equação (12).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (12)$$

A resistividade elétrica é fortemente influenciada pela temperatura do material, conforme Equação (13).

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha(T - T_o)] \quad (13)$$

Logo a Equação (14) determina as perdas ôhmicas em condutores energizados, ou seja, é a potência dissipada em forma de calor no material.

$$P = RI_e^2 \quad (14)$$

Quando os condutores elétricos estão sujeitos a correntes alternadas (CA), haverá outros tipos de perdas elétricas, como o surgimento de correntes parasitas nos enrolamentos e o aparecimento de um fenômeno conhecido como *skin-effect*, além das perdas ôhmicas devido à passagem da corrente elétrica, como é exposto pela Equação (15).

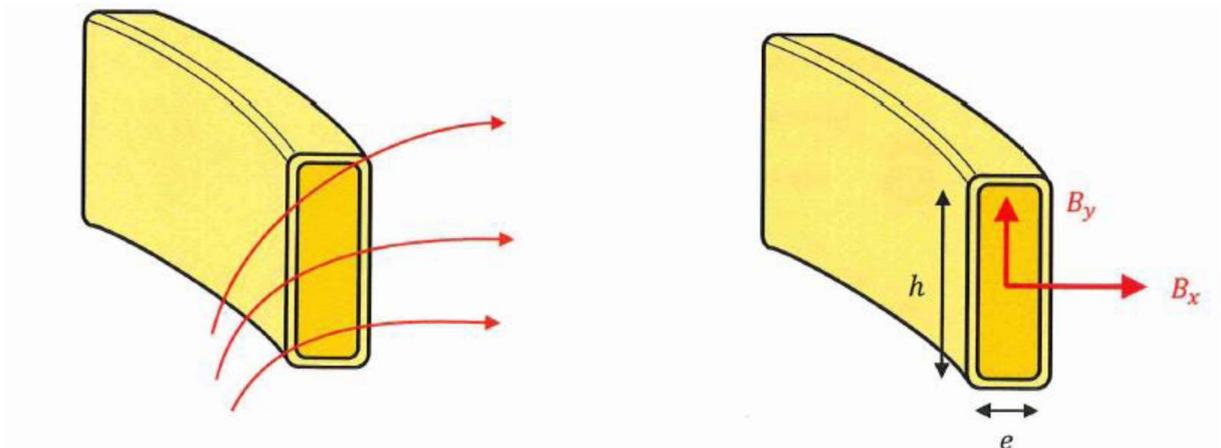
$$R_{AC} = R_{DC} + R_e + R_s \quad (15)$$

John (2002, p. 74) relata que “quando um campo magnético é aplicado em qualquer condutor, correntes parasitas são induzidas em torno do caminho das linhas do fluxo magnético”. Essas correntes parasitas são proporcionais tanto ao fluxo disperso quanto as correntes de cargas, logo essas perdas se manifestam aumentando o valor da resistência efetiva do condutor, sendo representada por R_e .

2.3.1.2 Perdas por Correntes de Foucault

Segundo John (2002) e Guru e Hiziroglu (2001) definem as correntes parasitas como correntes elétricas induzidas em que circulam a área transversal do condutor, formando caminhos circulares fechados. A formação destas correntes parasitas está relacionada com a variação do campo magnético que atravessa o condutor, como pode ser observado na FIGURA 9.

FIGURA 9 - Fluxo do campo magnético



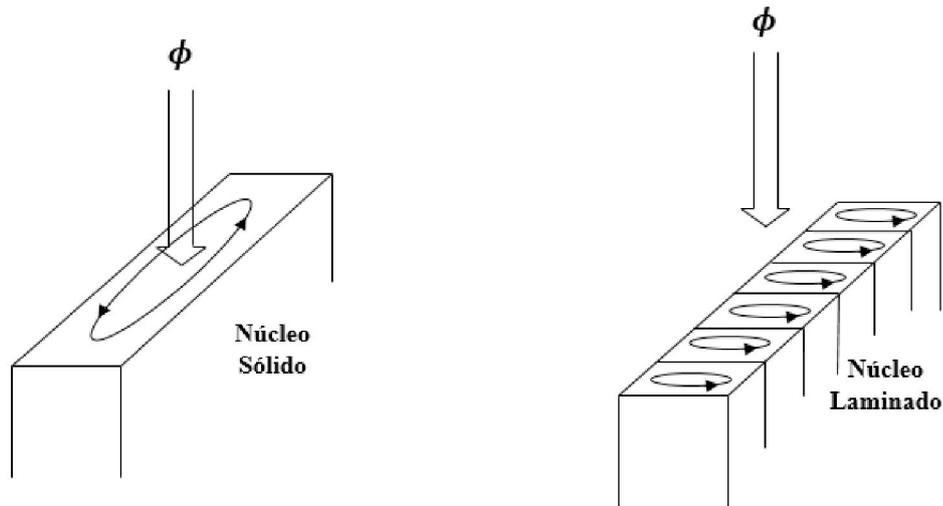
FONTE: WEG (2018)

As correntes de Foucault produzem fatos indesejáveis, pois os movimentos dos elétrons livres ocasionam a dissipação de calor por efeito Joule, o que faz aumentar temperatura do material.

Para evitar a dissipação de energia por efeito Joule, os materiais sujeitos a campos magnéticos são construídos como placas laminadas muito pequenas isoladas

uma das outras sendo revestidas com um verniz isolador, como é retratado por Guru e Hiziroglu (2001) que dizem ao utilizar placas delgadas as correntes parasitas encontram maior resistência para sua passagem.

FIGURA 10 – (a) Correntes parasitas em um núcleo único sólido (b) Correntes parasitas em um núcleo laminado.



FONTE: Vasconcellos (2013)

As perdas por Foucault pode ser expressa pela Equação (16), logo abaixo.

$$P_{cc} = \frac{1}{\sigma V} \left(\frac{I_{EF}}{S} \right)^2 + \frac{\sigma \omega^2 B_x^2 h^2}{24V} + \frac{\sigma \omega^2 B_y^2 e^2}{24V} \quad (16)$$

2.3.2 Rendimento

As análises das perdas de potência nas máquinas elétricas apresentam uma importância vital na fase de projeto, segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) as perdas podem definir o rendimento do equipamento, tendo uma influência de forma significativa no custo de operação.

$$\text{rendimento} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (17)$$

Segundo Kosow (2000), toda potência de entrada de uma máquina elétrica será igual à sua potência de saída somada com as suas respectivas perdas, evidenciando assim a lei da conservação de energia.

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas} \quad (18)$$

Kosow (2000, p. 489) ressalta que “Quanto maior for a perda de potência maior será a potência térmica e mais quente a máquina funcionará”. Essa potência térmica é responsável pelo aumento de temperatura, sendo esse fato que limita a potência do equipamento.

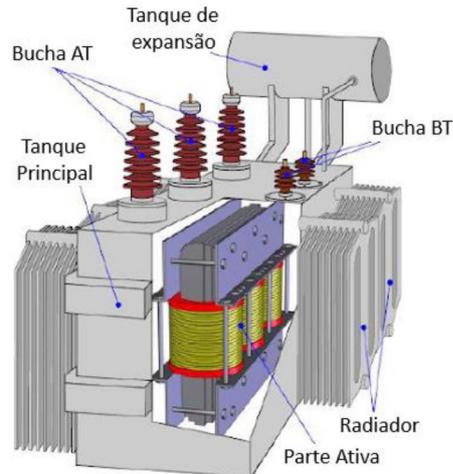
Segundo Guru e Hiziroglu (2001) as perdas de potência em máquinas elétricas pode ser divididas em três categorias, sendo: perdas elétricas, perdas mecânicas e perdas magnéticas. As perdas elétricas se localizam mais especificamente nos enrolamentos da máquina, enquanto as perdas mecânicas surgem devido à rotação de alguns componentes, como por exemplo, o rotor e por último as perdas magnéticas que estão relacionadas diretamente com o núcleo de ferromagnético, sendo influenciado este pelos efeitos de histerese e pelas correntes parasitas.

2.4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE TRANSFORMADORES A ÓLEO

Na maioria dos transformadores de potência existe uma grande similaridade em seu aspecto de construção. O transformador pode ser dividido basicamente em dois tipos de sistemas, os sistemas elétricos que estão compreendidos da parte ativa do transformador e os elementos elétricos e os sistemas mecânicos que auxiliam no funcionamento do equipamento.

Entre os sistemas elétricos do transformador tem-se: Núcleo; enrolamento de alta tensão; enrolamento de baixa tensão; enrolamento de regulação; buchas de alta tensão; buchas de baixa tensão e comutador de tensão em carga.

FIGURA 11 – Transformador



FONTE: UNIVERTEC CEFET – MG (2013)

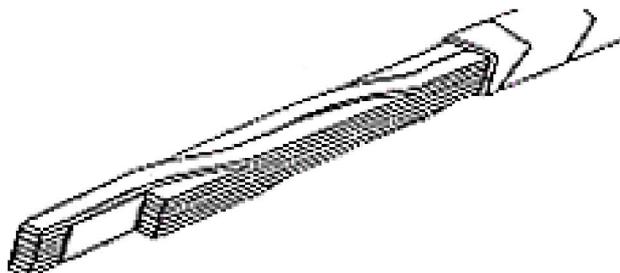
Entre os sistemas mecânicos do transformador tem-se: Tanque principal; tanque de expansão; vigas de prensagem do núcleo; sistema de preservação do óleo e radiadores ou trocadores de calor.

2.4.1 Parte Ativa: Enrolamentos

Os enrolamentos dos transformadores tanto a alta tensão (AT) e quanto baixa tensão (BT) tem como finalidade de realizar o transporte da corrente, em que estes estão enrolados entorno do membro do núcleo. Estes enrolamentos devem estar devidamente isolados com papéis de isolamento termo estabilizados, para suportar as condições de operações como é determinado por Harlow (2004).

Silva (2005) relata que os condutores são compostos por diversos fios isolados entre si formando assim pacotes de condutores, conforme a FIGURA 12 com o intuito de se obter a redução dos efeitos das correntes parasitas. Logo esses condutores possuem uma seção transversal equivalente a uma barra maciça.

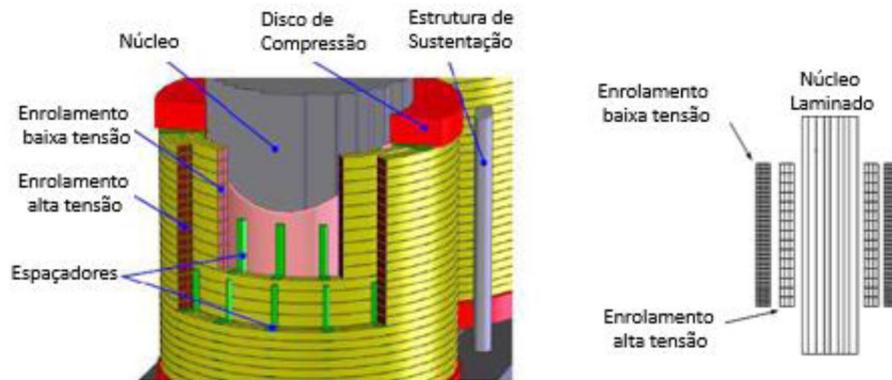
FIGURA 12 - Empilhamento de diversos fios isolados em um único condutor



FONTE: ABB (2003)

O aspecto final dos enrolamentos são tipicamente bobinas enroladas em cilindros com espaços anexados entre os condutores superior e inferior do enrolamento, formando um circuito hidráulico que proporciona a passagem do fluido de resfriamento. Lembrando que os enrolamentos de baixa tensão estão montados sobre os enrolamentos de alta tensão (SILVA, 2005).

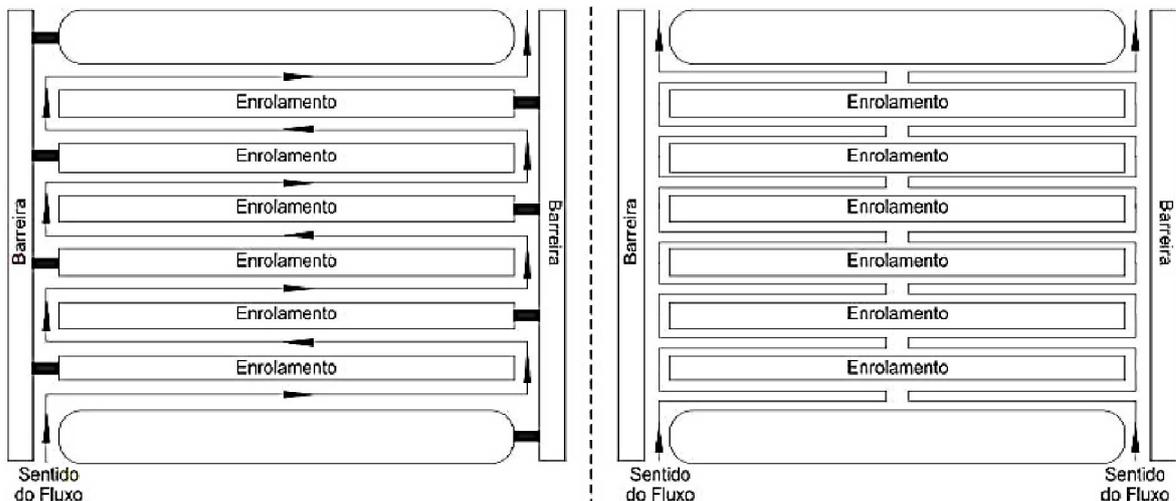
FIGURA 13 - (a) Montagem dos enrolamentos com os respectivos núcleos (b) Aspecto físico do núcleo



FONTE: UNIVERTEC CEFET – MG (2013)

Na FIGURA 13 são apresentados os circuitos de refrigeração no interior dos enrolamentos, podendo ser um circuito com fluxo direcionado (a) ou fluxo não direcionado (b).

FIGURA 14- Circuito de refrigeração: (a) fluxo direcionado (b) fluxo não direcionado



FONTE: SILVA (2005, p. 19).

Harlow (2004) descreve o circuito hidráulico do enrolamento do tipo disco com fluxo direcionado, como a passagem do óleo mineral entre os discos do enrolamento, percorrendo em um único sentido. Esse percurso é criado com a inserção de barreiras que são conhecidas como chicanas entre os discos dos enrolamentos. Enquanto o fluxo não direcionado não possui nenhum tipo de restrição à passagem do fluxo do óleo isolante, sendo que a única barreira é o involucro do enrolamento.

2.4.2 Óleo Isolante

O óleo isolante utilizado em transformadores de potência possui a finalidade de garantir isolamento elétrico entre os componentes do transformador e dissipar, para o meio externo, o calor gerado pelos enrolamentos e o núcleo do equipamento.

Os óleos isolantes passam a cumprir satisfatoriamente as condições acima, quando se atendem os parâmetros físicos químicos estabelecidos em norma, neste caso se destacam os fatores de umidade e impurezas, pois alteram significativamente o desempenho elétrico do óleo (FRIEDENBERG e SANTANA, 2014).

Os óleos mais utilizados em transformadores atualmente são os óleos minerais (OMI), que são obtidos através do refino do petróleo. Podem ser de base naftênica (tipo A) ou de base parafínica (tipo B).

O resfriamento é realizado a partir de trocadores de calor utilizando o óleo isolante, além disso, o óleo realiza a isolação da parte ativa do transformador, com objetivo de inibir a formação de arco elétrico ou mesmo descargas elétricas.

O óleo mineral utilizado como isolamento da parte ativa do transformador é o óleo naftênico, devido a este possuir excelentes propriedades dielétricas, apresentando isolamento elétrico, propiciando a sua utilização. O óleo naftênico possui excelentes valores de viscosidades tanto em altas quanto em baixas temperaturas. (SILVA, 2006)

2.5 MÉTODOS NUMÉRICOS

Conceitua métodos numéricos como sendo a formulação de algoritmos com o intuito de resolver problemas matemáticos usando operações aritméticas menos complexas. O objetivo da análise numérica é encontrar soluções aproximadas para problemas complexos.

O método dos volumes finitos, é um dos métodos numéricos mais utilizados em mecânica dos fluidos, foi introduzido por McDonal, MacCormak e Paullay nas décadas de 70. Este método não se aplica somente a problemas de mecânica dos fluidos. (Versteeg e Malalasekera, 2007)

Conforme Maliska (2004), Considera-se que no métodos de volumes finitos resume na decomposição do domínio em pequenos volumes, chamados de volumes de controle, na qual as variáveis são calculadas e armazenadas no centro do volume. A união desses volumes gera uma grade numérica chamada malha.

A base do método dos volumes finitos, é o princípio de conservação de massa, momento e energia, respeitando as equações elaborados por meio da discretização do domínio contínuo. Como resultado tem-se as distribuições de intensidades das seguintes variáveis como: pressão, velocidade e temperatura, entre outras, tanto em regime estacionário como transientes. As Equações (19), (20), (21) e (22) representam a conservação de massa, momento nas direções x e y e de energia (MALISKA, 2004).

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_j v_i) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial y} \right) + S^v \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (22)$$

De acordo com Maliska (2004) aplica-se o método dos volumes finitos com a finalidade em transformar as equações diferenciais parciais, que é definida em um domínio contínuo, em um sistema de equações algébricas. Neste caso, haverá a integração das equações diferenciais, que regem o fenômeno físico em estudo, obtendo equações algébricas (23).

$$\frac{M_P - M_P^o}{\Delta t} + \rho u \Delta y \Delta z|_e - \rho u \Delta y \Delta z|_w + \rho v \Delta x \Delta z|_n - \rho v \Delta x \Delta z|_s = 0 \quad (23)$$

Aonde u e v são as velocidades das direções x e y respectivamente e M_P é a quantidade de massa no volume finito. A Equação (24), representa a conservação de momento na direção x .

$$\begin{aligned} & \frac{M_P u_P - M_P^o u_P^o}{\Delta t} + u_P^\theta \left[\left(\frac{1}{2} + \alpha_e \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_e - \left(\frac{1}{2} - \alpha_w \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_w + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_n \right. \\ & \left. - \left(\frac{1}{2} - \alpha_s \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_s - S_P \Delta V + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_e + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_w + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_n + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_s \right] = \\ & u_E^\theta \left[- \left(\frac{1}{2} - \alpha_e \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_e + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_e \right] + u_W^\theta \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha_w \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_w + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_w \right] \\ & + u_N^\theta \left[- \left(\frac{1}{2} - \alpha_n \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_n + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_n \right] + u_S^\theta \left[\left(\frac{1}{2} + \alpha_s \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_s + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_s \right] + S_c \Delta V \end{aligned} \quad (24)$$

A equação 24, representa a conservação de momento na direção y .

$$\begin{aligned} & \frac{M_P v_P - M_P^o v_P^o}{\Delta t} + v_P^\theta \left[\left(\frac{1}{2} + \alpha_e \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_e - \left(\frac{1}{2} - \alpha_w \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_w + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_n \right. \\ & \left. - \left(\frac{1}{2} - \alpha_s \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_s - S_P \Delta V + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_e + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_w + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_n + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_s \right] = \\ & v_E^\theta \left[- \left(\frac{1}{2} - \alpha_e \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_e + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_e \right] + v_W^\theta \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha_w \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_w + \frac{\beta \mu \Delta y \Delta z}{\Delta x} \Big|_w \right] \\ & + v_N^\theta \left[- \left(\frac{1}{2} - \alpha_n \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_n + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_n \right] + v_S^\theta \left[\left(\frac{1}{2} + \alpha_s \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_s + \frac{\beta \mu \Delta x \Delta z}{\Delta y} \Big|_s \right] \\ & + S_c \Delta V \end{aligned} \quad (25)$$

Onde, alfa e beta são funções de interpolação do esquema *Weighted Upstream Differencing Scheme* (WUDS) e dependem do número de Peclet, sendo o produto entre o número de Reynolds e o número de Prandtl e servem como pesos entre a convecção e a difusão. Neste caso, o termo fonte contém o gradiente de pressão apresentada na Equação (20). E a equação (26), representa a equação de energia.

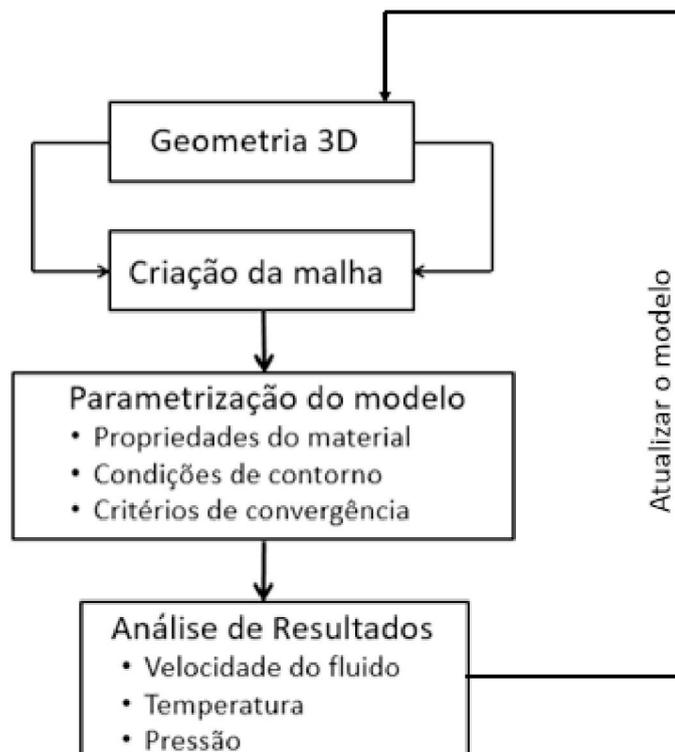
$$\frac{M_P T_P - M_P^o T_P^o}{\Delta t} + T_P^\theta \left[\left(\frac{1}{2} + \alpha_e \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_e - \left(\frac{1}{2} - \alpha_w \right) \rho u \Delta y \Delta z \Big|_w + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n \right) \rho v \Delta x \Delta z \Big|_n \right] \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
& -\left(\frac{1}{2} - \alpha_s\right) \rho v \Delta x \Delta z|_s - S_P \Delta V + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta y \Delta z}{\Delta x} \right|_e + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta y \Delta z}{\Delta x} \right|_w + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta x \Delta z}{\Delta y} \right|_n + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta x \Delta z}{\Delta y} \right|_s \\
& = T_E^\theta \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha_e\right) \rho u \Delta y \Delta z|_e + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta y \Delta z}{\Delta x} \right|_e \right] + T_W^\theta \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha_w\right) \rho u \Delta y \Delta z|_w + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta y \Delta z}{\Delta x} \right|_w \right] + \\
& T_N^\theta \left[-\left(\frac{1}{2} - \alpha_n\right) \rho v \Delta x \Delta z|_n + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta x \Delta z}{\Delta y} \right|_n \right] + T_S^\theta \left[\left(\frac{1}{2} + \alpha_s\right) \rho v \Delta x \Delta z|_s + \left. \frac{\beta \frac{k}{c_p} \Delta x \Delta z}{\Delta y} \right|_s \right] \\
& \quad + S_c \Delta V
\end{aligned}$$

2.5.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é uma técnica bastante poderosa que abrange vários grupos da indústria e centro de pesquisas. Este método consiste em analisar problemas da mecânica dos fluídos, relacionados com fluxos do fluido, transferência de calor e até mesmo fenômenos químicos. (Versteeg e Malalasekera, 2007).

FIGURA 15 - Fluxograma da metodologia CFD.



A metodologia CFD é separada em três etapas: O pré-processamento, processamento e pós-processamento.

De acordo com o Versteeg e Malalasekera (2007) o pré-processamento está dividido na criação da geometria, criação da malha e parametrização do modelo numérico. Enquanto que o processamento representa o cálculo da solução. E a terceira etapa, pós-processamento, representa a análise dos resultados: velocidade, pressão e temperatura ao longo do escoamento, conforme o fluxograma apresentado na FIGURA 15.

2.5.2 Ansys CFX

A ferramenta CAE (*Computer Aided Engineering*) é uma ferramenta computacional com capacidade de aplicação de métodos numéricos na análise do comportamento de estruturas complexas e fenômenos como resistência mecânica, vibração, fadiga e distorção perante as aplicações das condições de contorno, como tensões mecânicas, fontes de calor, correntes elétricas, entre outros (LIMA, SCHÜTZER, 2009). O uso desses métodos computacionais é necessário em casos a qual a utilidade de técnicas e métodos tradicionais se torna inviável. Assim o uso destes métodos são aplicados em sistemas mais complexos e reais em que a solução por métodos analíticos torna-se muito complexo ou necessita-se de simplificações que acabam invalidando o modelo de estudo (PAGANOTO, 2016).

Nos sistemas CAE geralmente utiliza-se métodos numéricos como Métodos de Elementos Finitos (MEF), Método das Diferenças Finitas (MDF), método dos volumes finitos, entre outros para a solução do domínio. Estes métodos podem ser aplicáveis à geometrias em três dimensões (3D) obtendo-se resultados em todo o volume de interesse à partir das condições de contorno (PAGANOTO, 2016).

Tem-se como exemplos de sistemas que aplicam esses tipos de técnicas os seguintes softwares: Ansys™, Hypermesh™, Modflow™, Cimatron™ e Cosmos™. Segundo ANSYS™ (2015) CFX™ é um pacote de extensão do software Ansys™ com soluções numéricas aplicadas a problemas da mecânica dos fluidos. Com este software é possível aplicar as análises à objetos de dimensão 3D com soluções voltadas tanto para regime estacionário quanto regime transiente aos campos de pressão, velocidade e temperatura.

2.6 MODELO DE REDE

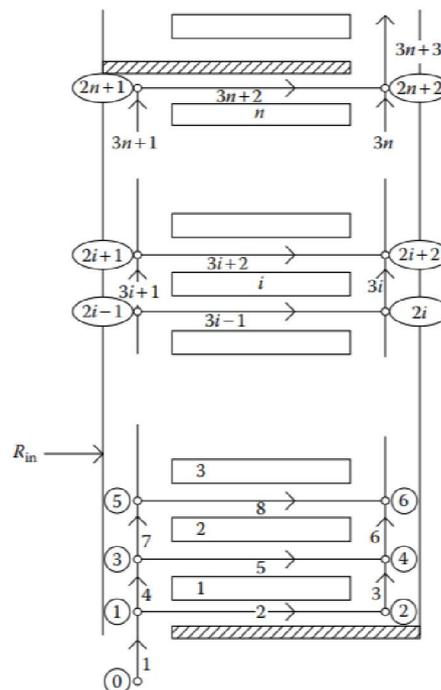
De acordo com Lapworth et al (2016), os modelos de rede térmicos – hidráulicos fundamentam em princípios de conservação de massa, momento e energia. Portanto implica em uma subdivisão espacial do domínio de interesse em um conjunto de elementos menores, em que cada um dos princípios aplicados deve ser observados.

O modelo de rede é interdependente do modelo de rede hidráulica do modelo de rede térmica. O modelo hidráulico descreve a distribuição do fluxo de óleo de dutos e junções. Enquanto que o modelo térmico apresenta o aquecimento do óleo em razão da dissipação de calor dos discos da bobina, neste modelo inclui os mecanismos de transferência de calor.

Neste trabalho aplicou e descreveu o modelo de rede desenvolvido pelos autores, Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah e Rajendra Ahuja. As informações foram obtidas da bibliografia “Transformer Design Principles With Applications to Core-Form Power Transformers (2017).”

A FIGURA 16 ilustra o modelo de rede do circuito hidráulico do enrolamento série, além de apresentar o caminho do fluxo de óleo mineral entorno dos discos da bobina.

FIGURA 16 – Seção do modelo de rede de um enrolamento do tipo disco.

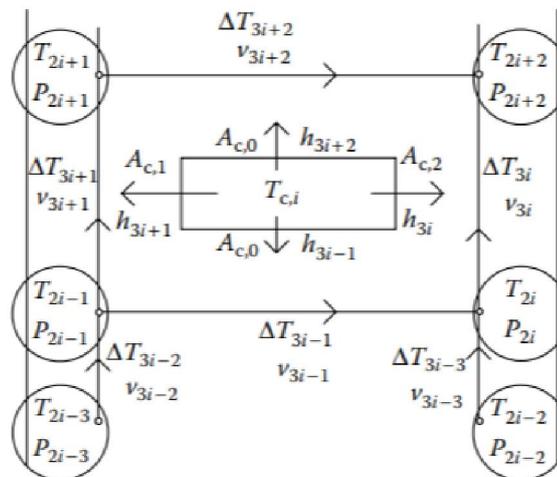


FONTE - Del Vecchio et al (2017)

Observa-se que a modelagem matemática é desenvolvida para uma única seção do duto de resfriamento do enrolamento, porém o modelo de rede leva em consideração as informações do aspecto geométrico da bobina, como: Área transversal dos dutos verticais e horizontais, área superficial dos discos da bobina, tamanho dos dutos, diâmetro hidráulico, número de discos ao longo do duto e a espessura do isolamento dos condutores. (VECCHIO ET AL, 2017)

De acordo com o Del Vecchio et al (2017), o modelo de rede utiliza dos conceitos de conservação de massa, momento e de energia, com o intuito de determinar as velocidades, pressões e temperaturas médias do óleo mineral ao longo do duto de resfriamento. A FIGURA 17 apresenta a dissipação de calor do óleo mineral em um único condutor, além de apresentar o esquema numérico dos condutores com os nós do circuito hidráulico e os dutos entorno do enrolamento.

FIGURA 17 - Esquema da enumeração das variáveis de interesse.



Fonte - Del Vecchio et al (2017)

A FIGURA 17 apresenta as variáveis de interesse a qual o modelo apresentou como resposta, sendo: Temperatura no nó (T), pressão no nó (P), velocidade do óleo no caminho do percurso (v), diferença de temperatura do óleo no caminho do percurso (ΔT) e a temperatura do disco.

2.6.1 Determinação da Pressão e Velocidade do Óleo

Conforme Del Vecchio et al (2017), ao longo de um caminho com a mesma área transversal a velocidade do óleo assume um valor constante, ignorando qualquer efeito gravitacional. Enquanto que a queda da pressão ao longo de um caminho é uma consequência do coeficiente de atrito dos condutores. Assim, a queda de pressão ao longo de um caminho do duto pode ser determinado pela Equação (27).

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho f \frac{L}{D} v^2 \quad (27)$$

Onde, ρ é a densidade do fluido, f é o coeficiente de atrito, L é o tamanho do caminho, D é o diâmetro hidráulico e v é a velocidade do fluido. O diâmetro hidráulico é calculado pela (28) (DEL VECCHIO ET AL, 2017).

$$D = 4 \frac{\text{Área}_{trans}}{\text{Perimetro}} \quad (28)$$

Para um fluxo laminar, em um duto retangular, o coeficiente de atrito pode ser determinado pela Equação (29), neste caso os lados do duto deve respeitar a seguinte restrição $a < b$.

$$f = \frac{K(a/b)}{Re_D} \quad (29)$$

Onde o K é calculado pela seguinte Equação (30) (DEL VECCHIO ET AL, 2017).

$$K(a/b) = 56,91 + 40,31(e^{-3,5(a/b)} - 0,0302) \quad (30)$$

Além disso, o número de Reynolds é determinado pela Equação (31), logo abaixo.

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (31)$$

Substituindo as equações (29), (30) e (31), obtêm-se a Equação (32). Essa equação é linear entre as variáveis da pressão e velocidade.

$$P_1 - P_2 = \frac{1\mu KL}{2D^2}v \quad (32)$$

A Equação 31 foi utilizada para determinar a perda de carga em todos os caminhos, ilustrado na FIGURA 17. Note que a solução do campo de pressão foi determinada para uma única seção e a resposta do último nó ($3n+2$) é colocado como condição de entrada para a próxima seção. (DEL VECCHIO ET AL, 2017)

São ($3n+2$) caminhos em uma única seção, em que n é o número de disco, portanto há ($2n+2$) pressão desconhecidas. Observa-se que o nó zero representa a condição de entrada. O número de velocidades desconhecidas é ($3n+2$), sendo este o número de caminhos. Assim é necessário de ($5n+4$) equações para solucionar os campos de pressão e velocidade, pois há um acoplamento entre essas variáveis.

As equações adicionais necessárias para solucionar os campos de pressão e velocidade é retirada da conservação de massa aplicada nos nós do duto, sendo expressa pela Equação (33).

$$\frac{dM}{dt} = \sum \rho(T)A_{tr}v_i \quad (33)$$

Neste caso foi considerado um fluido incompressível, ou seja, a densidade do fluido terá um valor constante em função da temperatura, além de ser um problema em regime estacionário. Desta forma, a conservação de massa reduz para seguinte Equação (34).

$$0 = \sum A_{tr}v_i \quad (34)$$

Note que a solução do campo de velocidade foi determinada para uma única seção e a resposta da velocidade no caminho ($3n+3$) é colocado como condição de entrada para a próxima seção da bobina. Neste caso a velocidade no caminho 1 deve ser conhecido e considerado como condição de contorno do modelo Del Vecchio et al (2017).

2.6.2 Temperatura do Óleo e do Condutor

Para um dado caminho a diferença de temperatura do óleo, é determinado pelo conservação da energia no óleo.

$$c\Delta T \frac{dM}{dt} = c\rho Av\Delta T \quad (35)$$

Onde c é o calor específico e é assumido como um valor constante. A transferência de calor através da superfície do condutor é dada pela Equação 35.

$$\dot{q}_{conv} = hA_c(T_c - T_b) \quad (36)$$

Onde (h) é o coeficiente da transferência de calor da superfície, (A_c) é a área da superfície do condutor, (T_c) é a temperatura do condutor, e (T_b) é a temperatura média do óleo no duto. Segundo Del Vecchio et al (2017), o (h) deve incluir tanto o efeito do isolamento do condutor bem como a transferência de calor e é expressa pela Equação 36.

$$h = \frac{h_{conv}}{1 + \frac{h_{conv}t_{isol}}{k_{isol}}} \quad (37)$$

Onde (h_{conv}) é o coeficiente de transferência de calor convectivo, (t_{isol}) e (k_{iso}) é a espessura e condutividade térmica do isolamento, respectivamente. De acordo com a Equação 37, o coeficiente convectivo varia com a temperatura e velocidade do óleo. De acordo com Del Vecchio et al (2017), Equação (38) é aplicada para uma fluxo laminar.

$$h_{conv} = 1,86 \frac{k}{D} \left(Re_D Pr \frac{D}{L} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (38)$$

Onde (k) é a condutividade térmica do óleo, (D) é o diâmetro hidráulico, (Pr) é o número de Prandtl, (μ_s) é a viscosidade do óleo na superfície. Segundo Vecchio

(2017) está Equação (38) é aplicada quando respeitado a seguinte Inequação (39) logo abaixo. (DEL VECCHIO ET AL, 2017)

$$Re_D Pr(D/L) > 10 \quad (39)$$

A transferência de calor por meio da superfície dos condutores nos dutos horizontes entre dois discos é expressa pela Equação 39.

$$c\rho A_{0,i} v_{3i-1} \Delta T_{3i-1} = h_{3i-1} A_{c,0} [(T_{c,i} - T_{b,3i-1}) - (T_{c,i-1} - T_{b,3i-1})] \quad (40)$$

Além disso, as perdas ocorrem através de duas superfícies dos condutores e a temperatura do óleo nos dutos horizontais pode ser aproximada pela Equação 40, (DEL VECCHIO ET AL, 2017).

$$T_{b,3i-1} = T_{2i-1} + \frac{\Delta T_{3i-1}}{2} \quad (41)$$

Enquanto que a transferência de calor nos dutos verticais interno e externo do circuito hidráulico pode ser calculada pela Equação 41 e 42, respectivamente. De forma similar, a temperatura média do óleo é aproximada pela Equação 40.

$$c\rho A_1 v_{3i+1} \Delta T_{3i+1} = h_{3i+1} A_{c,1} (T_{c,i} - T_{b,3i+1}) \quad (42)$$

$$c\rho A_1 v_{3i} \Delta T_{3i} = h_{3i} A_{c,2} (T_{c,i} - T_{b,3i}) \quad (43)$$

No modelo a temperatura média do óleo no duto 1 é colocado como condição de contorno, além de não haver transferência de calor neste duto. Na saída da seção, especificamente no duto (3n+3), não haverá transferência de calor, pois não um gradiente de temperatura neste duto.

Assim a energia térmica transportada pelo óleo deve ser igual a energia que entra nos nós e as que deixam os nós, ou seja, aplica-se o balanço de energia. Aplicando o balanço de energia nos nós (2i-1) tem se a seguinte Equação 43.

$$\rho c A_1 v_{3i-2} (T_{2i-3} + \Delta T_{3i-2} - T_{ref}) = \rho c A_1 v_{3i+1} (T_{2i-1} - T_{ref}) + c \rho A_1 v_{3i} (T_{2i-1} - T_{ref}) \quad (44)$$

De forma similar, o balanço de energia nos nós (2i) obtêm a Equação 44. Com o objetivo de cancelar a temperatura de referência utiliza a Equação (32) para cancelar a temperatura de referência.

$$A_{0,i} v_{3i-1} (T_{2i-1} + \Delta T_{3i-1}) + A_2 v_{3i-3} (T_{2i-2} + \Delta T_{3i-3}) = A_2 v_{3i} T_{2i} \quad (45)$$

A temperatura no nó 1 deve ser igual a temperatura do duto 1, pois não há transferência de calor neste duto. O cálculo da temperatura no nó (2n+2) será considerado como condição de entrada para a próxima seção da bobina a ser calculada os campos de temperatura, de forma similar as equações de pressão-velocidade. Neste caso as equações de energia são não lineares, pois a temperatura depende da coeficiente convectivo que por sua vez apresenta esta não linearidade. Além disso as equações de energia dependem da velocidade do óleo, sendo necessário a solução das equações de pressão-velocidade.

Por fim, a temperatura do disco pode ser determinada por um balanço de energia entorno do condutor, levando em consideração a intensidade da fonte de calor, efeito joule, além da dissipação deste por meio do fluido, conforme a Equação (46).

$$I^2 R_i = h_{3i-1} A_{c,0} (T_{c,i} - T_{b,3i-1}) + h_{3i} A_{c,2} (T_{c,i} - T_{b,3i}) + h_{3i+1} A_{c,1} (T_{c,i} - T_{b,3i+1}) + h_{3i+2} A_{c,0} (T_{c,i} - T_{b,3i+2}) \quad (46)$$

Assim a temperatura do condutor pode ser calculada pela Equação (47), logo abaixo.

$$T_{c,i} = \frac{I^2 R_i + h_{3i-1} A_{c,0} T_{b,3i-1} + h_{3i+1} A_{c,1} T_{b,3i} + h_{3i+1} A_{c,1} T_{b,3i+1} + h_{3i+2} A_{c,0} T_{b,3i+2}}{h_{3i-1} A_{c,0} + h_{3i} A_{c,2} + h_{3i+1} A_{c,1} + h_{3i+2} A_{c,0}} \quad (47)$$

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foram abordados os assuntos referentes ao fenômeno da transferência de calor, noções fundamentais transformadores e sobre os seus

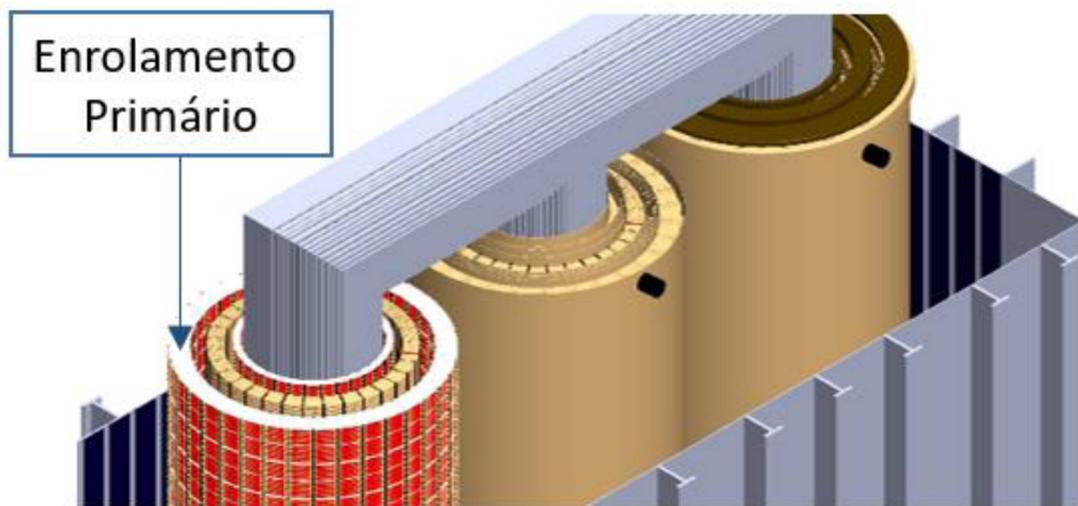
aspectos construtivos, sendo esses itens importantes para o entendimento da construção dos modelos matemáticos.

Além disso, abordou alguns temas, como, métodos numéricos, especificamente volumes finitos, e os modelos de rede com objetivo de desenvolver a modelagem térmica do sistema de resfriamento do enrolamento primário de um transformador.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo abordado neste trabalho foi de um autotransformador de potência, com potência nominal de 470 (MVA), 50 (Hz) e tensões 525/241.5/13.8 (kV), com modo de operação de arrefecimento ODAF (Óleo Direcionado Ar Forçada) e ODAN (Óleo Direcionado Ar Natural). O núcleo do equipamentos é do tipo *core* e os enrolamentos são do tipo disco entrelaçado, tipo camada e tipo dupla hélice para os enrolamentos primário, secundário e terciário respectivamente, como pode ser observado na FIGURA 18.

FIGURA 18 - Geometria do autotransformador



O equipamento é alimentado pelo primário por uma tensão de 525 (kV), e rebaixa a tensão para 241,5 (kV).

Conforme o objetivo do trabalho, apresentado no capítulo 1, foi desenvolvido dois modelos térmico-hidráulico do sistema de resfriamento do enrolamento primário do autotransformador. O intuito do trabalho foi de comparar os resultados dos modelos entre si, obtendo as suas diferenças além de medir as suas relevâncias.

O primeiro modelo foi obtido através do método de Volumes Finitos, por meio do auxílio da ferramenta ANSYS-CFX, sendo esse um método numérico aplicado nas equações governantes, que regem o fenômeno físico de estudo para se obter os perfis de velocidade, pressão e de temperatura do escoamento do óleo isolante nos dutos de resfriamento do enrolamento primário. Conforme o Versteeg e Malalasekara (2007) foi aplicado os seguinte procedimento: 1) Criação da geometria; 2) Discretização do

domínio em estudo; 3) Definição das propriedades dos materiais; 4) Aplicação das condições de contorno; 5) Análise dos resultados.

O segundo modelo foi obtido pelo método de rede (*network model*), por meio da bibliografia “*Transformer Design Principles With Applications to Core-Form Power Transformers (2017)*”, na qual aplica-se as condições de conservação de massa, conservação de momento e balanço de energia, em dutos e junções do circuito hidráulico do enrolamento para determinar as variáveis de interesse pressão média, velocidade média e temperatura média do óleo e condutor.

3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o estudo de caso, sendo um autotransformador de potência 470 (MVA), 50 (Hz) e tensões 525/241.5/13.8 (kV). Além disso foram identificados os métodos, Mecânica dos Fluidos computacional (CFD) e Modelo de Rede, a serem comparados, conforme apresentadas na seção 2.5.1 e 2.6, respectivamente.

4 MODELO NUMÉRICO POR VOLUMES FINITOS (CFD) DO CIRCUITO HIDRÁULICO DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO

4.1 GEOMETRIA TRIDIMENSIONAL

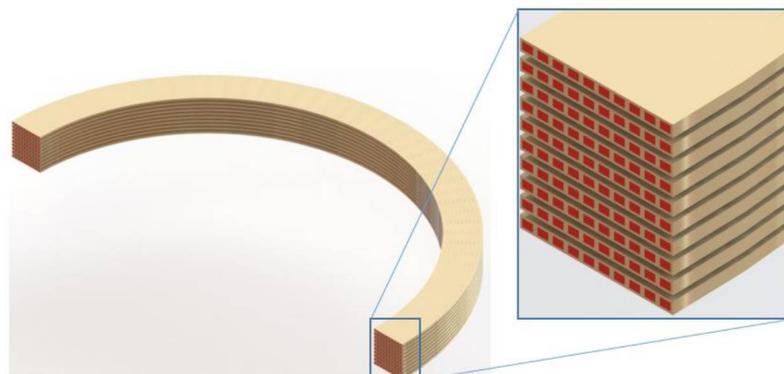
A geometria tridimensional foi desenvolvida em um ambiente CAD, sendo considerado os condutores de cobre, os papéis de isolamentos, direcionadores de óleo, os espaçadores axiais e radiais. O enrolamento primário é constituído de dez condutores de cobre por disco conforme a FIGURA 19 totalizando 144 disco em todo enrolamento.

FIGURA 19 - Conductor de cobre



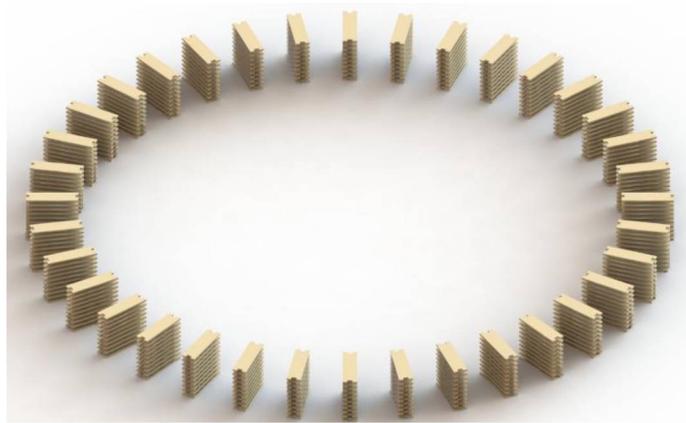
Em razão da alta tensão nos condutores, é necessário garantir o isolamento dielétrico entre eles, com o intuito de anular a formação de arcos elétricos. Neste caso, utilizou papéis *presspan* termo estabilizados entre os condutores e óleo mineral, como pode observar na FIGURA 20.

FIGURA 20 - Papel de isolamento sobre os condutores



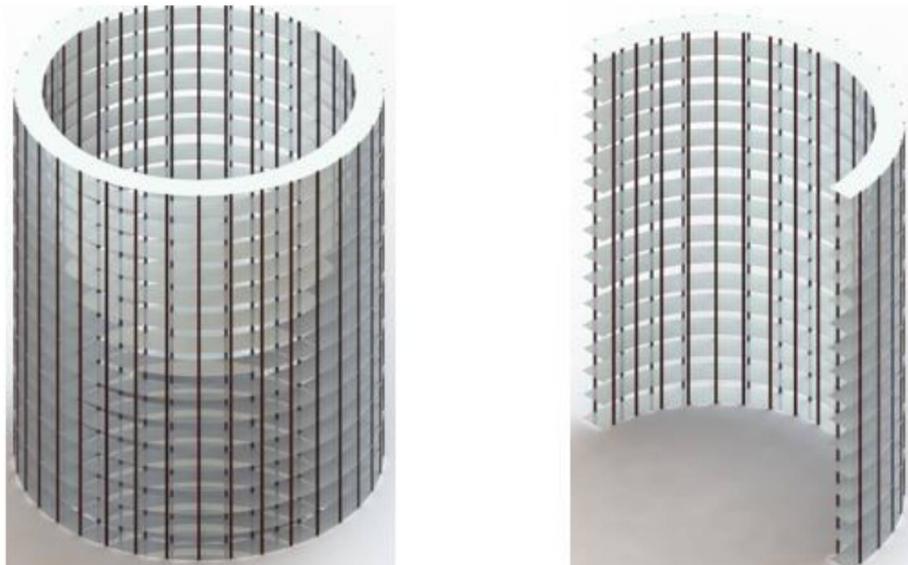
Em razão de correntes elevadas que percorrem os enrolamentos, é necessário controlar a temperatura de trabalho do equipamento, com o intuito de garantir uma maior vida útil. Desta forma, projetou um circuito hidráulico que é composto por canais hidráulicos entre os discos do enrolamento com a finalidade de garantir a passagem do óleo mineral, conforme a FIGURA 21.

FIGURA 21 - Espaçadores Radiais



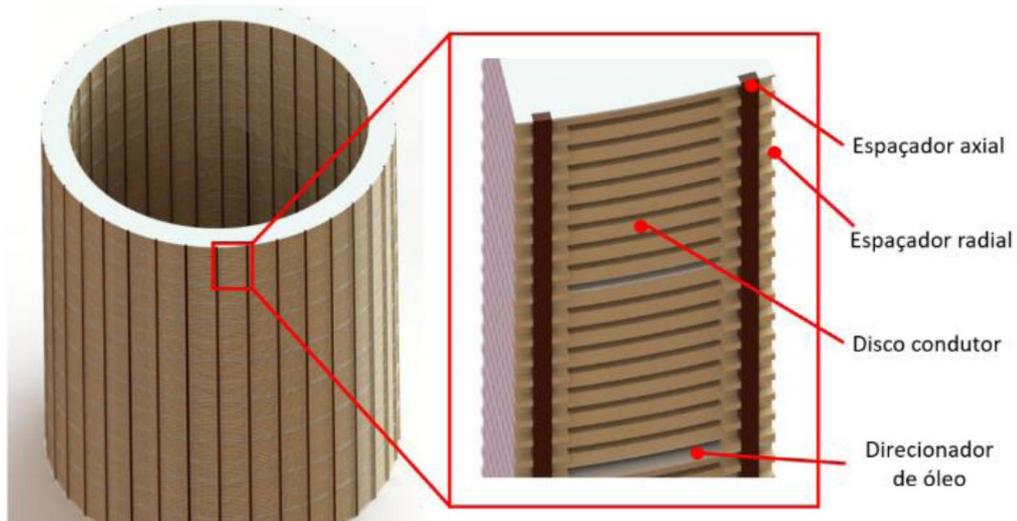
Além disso utiliza-se as chicanas, também conhecido como defletores, para garantir a passagem do óleo em todos os canais. Existem 15 chicanas em todo enrolamento série forçando que óleo mineral alterne a direção do fluxo do óleo entre o duto vertical interno e o duto vertical externo, conforme a FIGURA 22, logo abaixo.

FIGURA 22 - Defletores do óleo



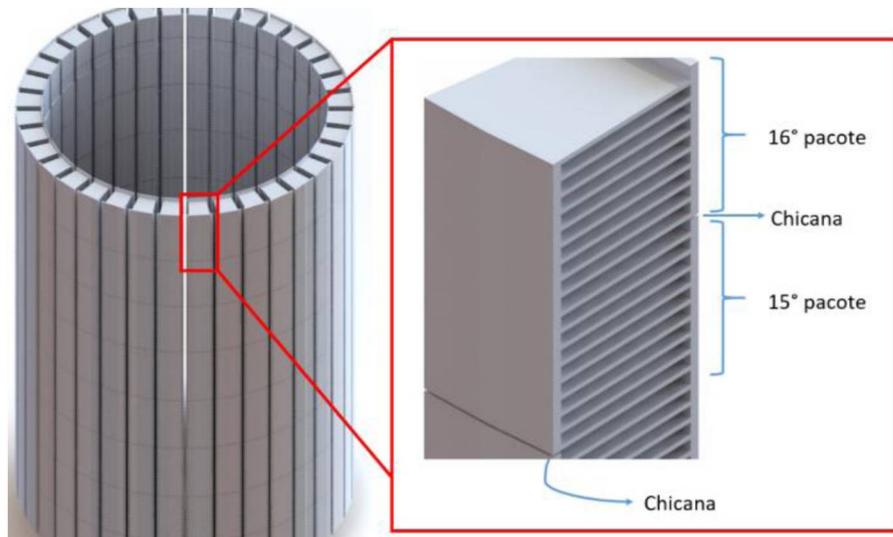
Assim, o enrolamento é do tipo disco com fluxo de óleo direcionado e possui 36 dutos de resfriamento na qual estão em paralelo, sendo estes isolados pelos espaçadores tanto axiais quanto radiais, conforme ilustrado na FIGURA 23.

FIGURA 23 - Enrolamento primário do autotransformador



A análise CFD avalia o comportamento hidráulico de fluidos, neste caso o domínio em estudo é o percurso do óleo mineral entre os discos do enrolamento primário, como pode ser observado na FIGURA 24, está imagem apresenta os 36 dutos de óleo, separados entre si, além de ilustrar as paredes dos condutores, dos papéis de isolamentos e das chicanas.

FIGURA 24 - Duto de óleo do enrolamento primário do autotransformador



Desta forma o domínio em estudo pode ser concentrado em um único duto dos 36 circuitos hidráulicos presentes do enrolamento série.

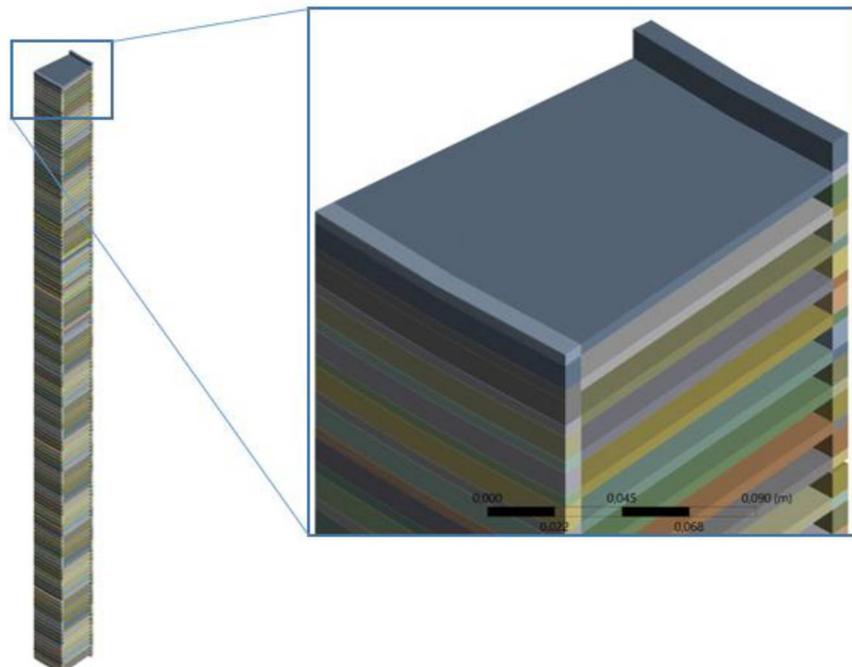
4.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

A criação da malha computacional tem grande influência sobre a solução numérica das equações diferenciais envolvidas nos problemas de CFD. Uma malha bem elaborada é capaz de eliminar problemas como de instabilidade numérica além de garantir a convergência dos resíduos na solução. Uma das etapas da técnica CFD requer a subdivisão do modelo numérica em um número de pequenos volumes que se sobrepõem a geometria do domínio, conforme Yeoh e Tu (2010).

Na discretização do modelo numérico foi utilizada uma malha estruturada, em virtude de um maior controle da quantidade de elementos inseridos na camada limite nos dutos de óleo do enrolamento.

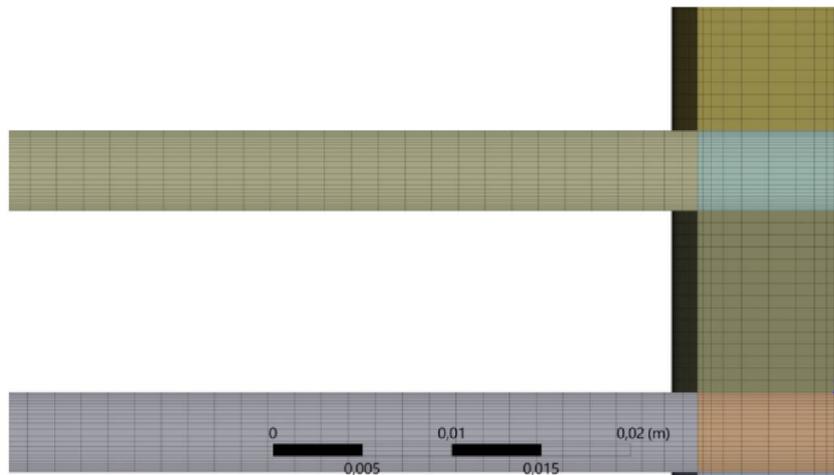
O processo utilizado para a criação da malha estruturada foi dividir a geometria em vários blocos, restringindo a coincidência dos vértices, conforme a FIGURA 25, pois assim garante que o elementos fiquem mais próximos de elementos regulares.

FIGURA 25 - Formação dos blocos na geometria



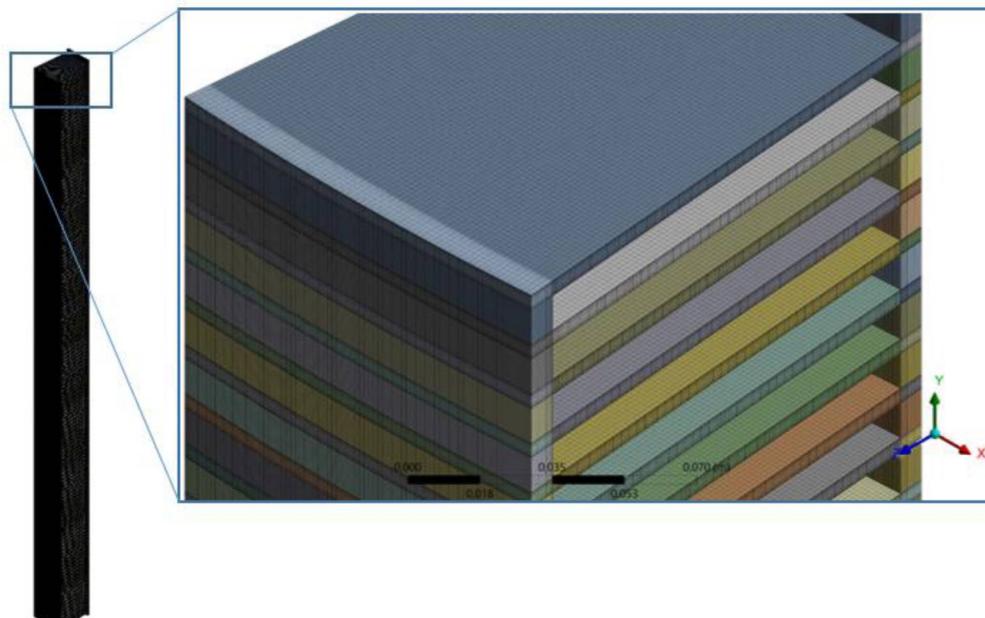
Na criação da malha computacional não foi necessário definir o tamanho do primeiro elemento, pois o escoamento tem uma característica laminar, ou seja, o efeito predominante sobre os perfis de velocidades é a viscosidade do fluido. Pode-se observar na FIGURA 26 a discretização do volume de controle.

FIGURA 26 – Malha computacional dos dutos de resfriamento do enrolamento série



Foi utilizada uma malha estruturada, com elementos hexaédricos na discretização do domínio em estudo, como pode ser observado na FIGURA 26.

FIGURA 27 - Malha Computacional do modelo



Assim a malha computacional do modelo numérico pode ser observado na FIGURA 27. Enquanto que a qualidade dos elementos da malha, pode ser observado no QUADRO 1, a qual mensurou a qualidade ortogonal, o *Skewness* e o *Aspect Ratio* dos elementos da malha.

QUADRO 1 – Qualidade dos elementos da malha

	Qualidade Ortogonal	<i>Skewness</i>	<i>Aspect Ratio</i>
Mínimo	0,99963	$7,4077 \times 10^{-4}$	1,53
Máximo	1,00000	$1,7544 \times 10^{-2}$	21,384
Médio	0,99989	$8,3793 \times 10^{-3}$	9,6645
Valores Excelentes	0,95-1,00	0-0,25	-
Valores Aceitáveis	0,15-0,2	0,80-0,94	-

Conforme o manual ANSYS (2011) os valores recomendáveis, para a qualidade ortogonal e *skewness* estão apresentados na QUADRO 1. Neste caso, os elementos da malha se apresentaram satisfatório quando comparados com os valores recomendáveis.

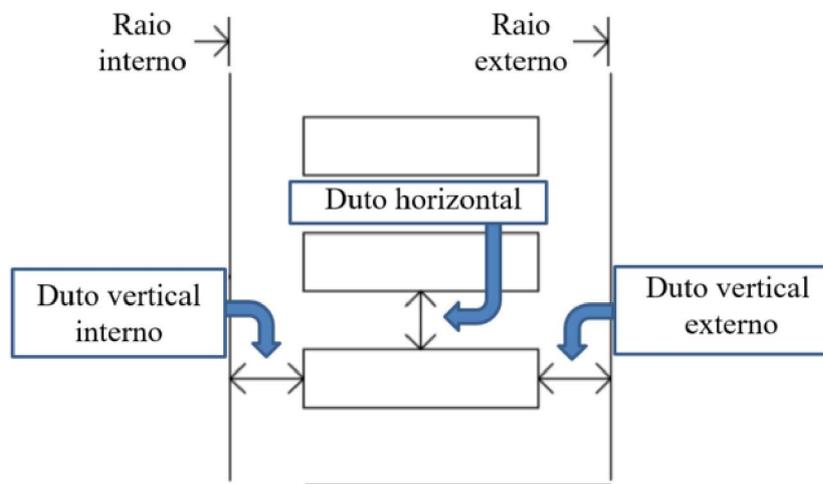
Com o objetivo de avaliar a influência da discretização espacial sobre os resultados realizou três malhas com diferentes números de elementos. O QUADRO 2 apresenta o número de elementos para cada malha.

QUADRO 2 - Estudo da Independência da Malha

	Malha I	Malha II	Malha III
Duto vertical interno	07	10	12
Duto vertical externo	07	10	12
Duto horizontal	13	20	25
Nº de elementos	16.159.725	24.801.750	33.303.750

O refinamento da malha é definida pela quantidade de elementos nos dutos verticais e horizontais, como pode ser observado na FIGURA 28. Além disso a quantidade de elementos nas três malhas é exposta no QUADRO 2, tendo um maior refinamento no duto horizontal. A malha escolhida para a simulação da troca térmica entre o enrolamento primário e o óleo mineral foi a malha III, com 33.303.750 elementos. Pode se observa na FIGURA 28, a localização dos dutos verticais interno, dutos verticais externo e os dutos horizontais.

FIGURA 28 – Ilustração do dutos de resfriamento do enrolamento série

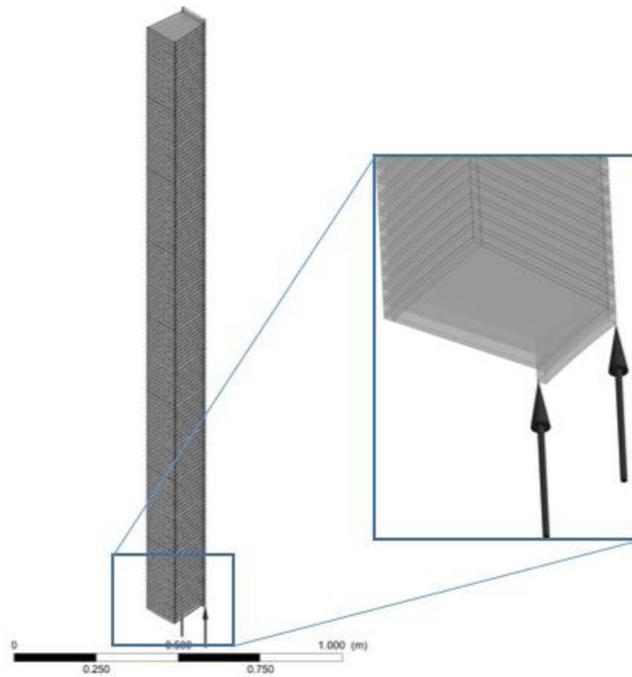


4.3 CONFIGURAÇÃO DA FÍSICA DO MODELO

As condições de contorno são um conjunto de propriedades do escoamento aplicadas em superfícies, com o objetivo de delimitar o seu domínio. A correta imposição das condições de contorno tem como finalidade garantir adequadamente as características do escoamento e assegurar a estabilidade numérica da solução.

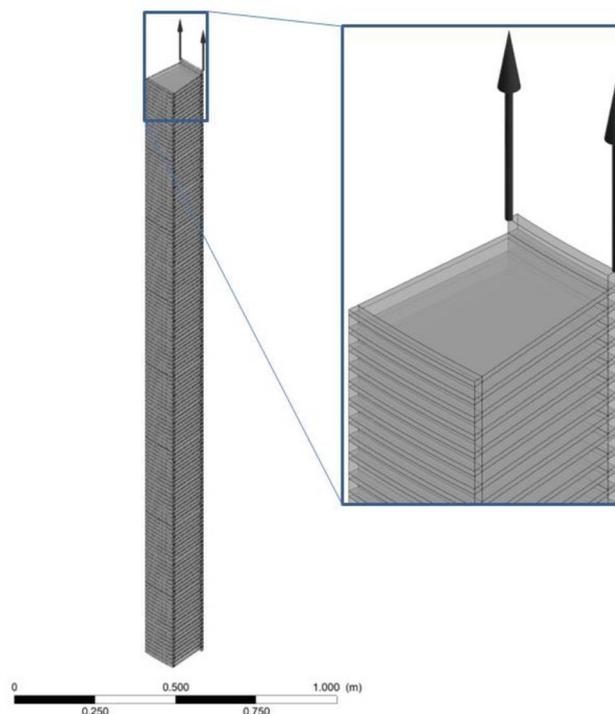
Para este trabalho, as condições de contorno definidas foram nas condições nominais de projeto do equipamento. Como condição de contorno foi aplicada na entrada do modelo uma vazão mássica de 0,5 (kg/s) de óleo, o qual representa uma vazão volumétrica de 2,08 (m³/h), com uma temperatura de 39,5 (°C), como pode observado na FIGURA 29.

FIGURA 29 - Entrada do modelo numérico



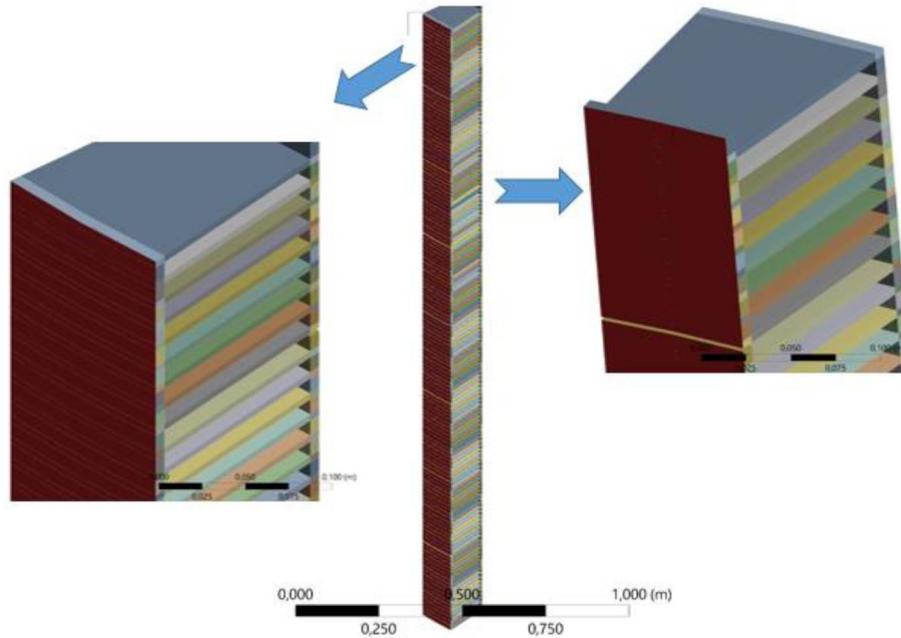
Na saída do domínio foi aplicado uma condição de contorno como pressão livre, $p=0$ (Pa), como pode ser observado na FIGURA 30, pois há uma perda de carga muito elevada na entrada da bobina.

FIGURA 30 - Saída do modelo numérico



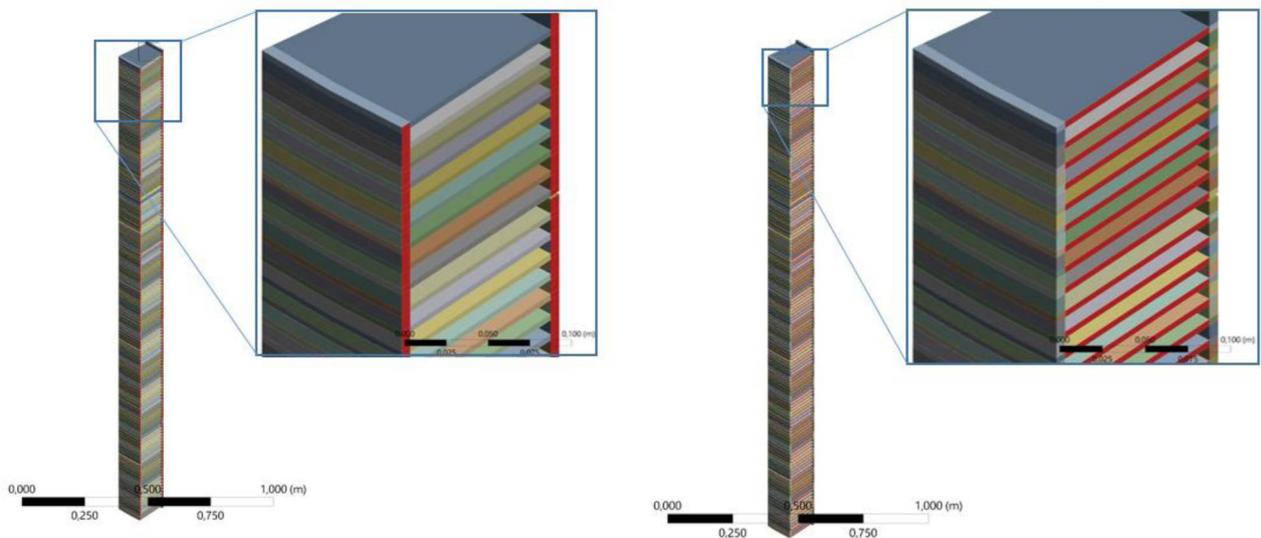
Além disso foi considerado como parede os papeis *Kraft*, com a finalidade de isolar dielétricamente da bobina de baixa tensão, além de garantir a circulação do óleo mineral em uma única direção, da base até o topo da bobina.

FIGURA 31 - Parede dos papeis de isolamento



As FIGURA 32 (a) e (b), ilustram os espaçadores axiais e radiais do enrolamento série, a qual restringem a circulação óleo em um único duto.

FIGURA 32 - Parede dos Espaçadores



4.3.1 Perdas por Efeito Joule Devido a Passagem de Corrente no Enrolamento

A principal parte responsável pelo aquecimento do óleo do autotransformador é a circulação da corrente nos enrolamentos, pois geram perdas de energia em forma de calor. Estas perdas são obtidas pela Equação (48).

$$P_j = RI^2 \quad (48)$$

Onde as P_j são perdas (W), e a resistência R da passagem da corrente (ohm) e I é a corrente que circula através do enrolamento (A). Os valores da resistência (R) variam com a temperatura, neste caso, as propriedades foram consideradas a uma temperatura de 75,0 (°C).

A Resistência foi determinada pela Equação (49), a qual leva em consideração as características geométricas e as propriedades físicas do condutor de cobre, material utilizada na fabricação do enrolamento.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (49)$$

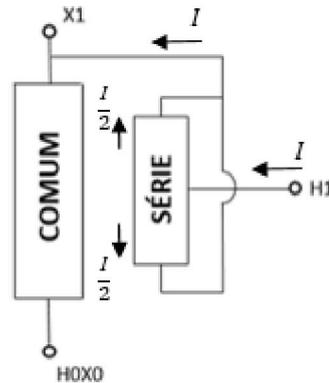
Onde, ρ é a resistividade do material, (ohm m), L é o comprimento do condutor (m) em um único disco e A é área transversal do condutor (mm²). Assim, o valor da resistência calculado foi entorno de 0,1748 (ohm), e os valores das variáveis utilizadas estão citadas no QUADRO 3.

QUADRO 3 - Características do condutor

Condutor	Valor	Unidade
Coefficiente de temperatura	0,0039	(1/C)
Resistividade	1,78e ⁻⁸	(ohm m)
Comprimento do disco	520,332	(m)
Área transversal	5,98e ⁻⁵	(mm ²)

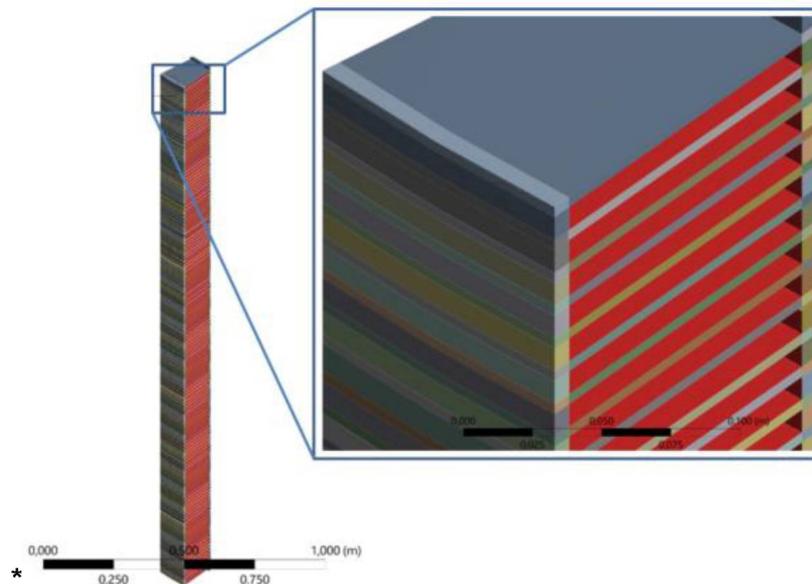
O equipamento tem como função transformar uma tensão de 525 (kV) para 241 (kV), a corrente do enrolamento primário e secundário é respectivamente, 516,864(A) e 1123,617(A). No caso do enrolamento primário a conexão é realizada no meio do enrolamento, dividindo este em duas bobinas a qual são conectadas em um circuito paralelo, logo a corrente que percorre cada bobina é 258,432 (A), conforme a FIGURA 33.

FIGURA 33 - Esquema elétrico da conexão dos enrolamentos



O Valor obtido pela Equação (48) foi inserido no modelo numérico como fonte de calor na superfícies dos condutores, conforme ilustrado na FIGURA 34. O valor da fonte foi de 1,289 (kW/m²). .

FIGURA 34 – Fonte de calor no enrolamento



4.3.2 Definição das Propriedades Físicas do Óleo

Na avaliação da troca térmica entre o enrolamento primário e o óleo mineral é necessário definir algumas propriedades térmicas do fluido, como: Densidade, viscosidade, condutividade térmica e expansividades térmica.

Todas as propriedades foram consideradas constantes, em uma temperatura de 75 (°C). As características físicas do óleo estão apresentadas no QUADRO 4 – Propriedades do óleo mineral QUADRO 4 (SUSA, 2005) e (DEL VECCHIO ET AL, 2010).

QUADRO 4 – Propriedades do óleo mineral

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	867,00	(kg/m ³)
Calor específico	1880,00	(J/kg. K)
Viscosidade dinâmica	0,0033	(Pa. s)
Condutividade térmica	0,11	(W/m. K)
Expansividade térmica	0,00068	(1/K)

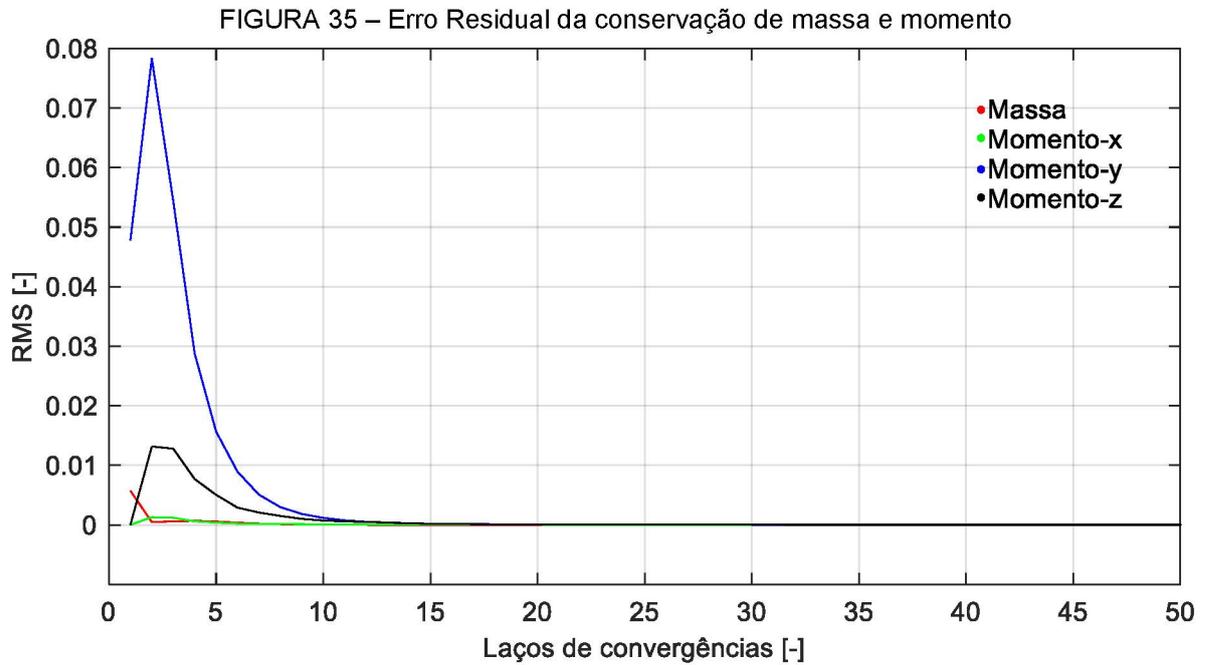
4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Nesta seção analisou os resultados da simulação térmica do circuito hidráulico do enrolamento série por meio dos campos de velocidades e temperaturas.

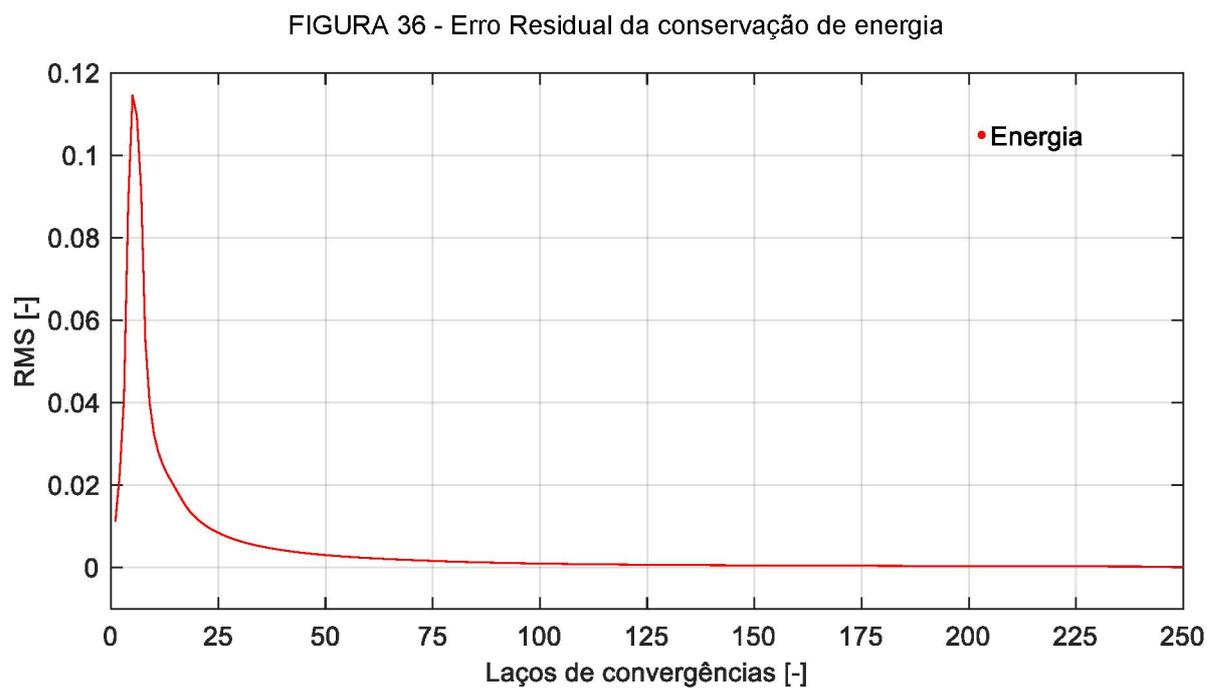
4.4.1 Convergência Numérica

Nos problemas que são utilizados métodos numéricos, existe uma aproximação entre a solução real do problema e a solução numérica, esta diferença entre as soluções é chamada de erro residual. Quanto menor for o resíduo da simulação mais próximo o resultado do modelo estará da solução exata.

A FIGURA 35, apresenta os valores residuais da conservação de massa e de momento nas três direções x , y e z , da simulação numérica, sendo 5.5×10^{-8} , 9.0×10^{-7} , 9.5×10^{-7} e $3,0 \times 10^{-6}$, respectivamente.



Enquanto que a FIGURA 36, apresenta o erro residual da conservação de energia, obtendo o um valor de 5.5×10^{-5} .



4.4.2 Convergência da Física

Como que se trata de uma análise em regime estacionário o número de interações está relacionada, além do erro residual, com a estabilidade da física, neste caso, com as variáveis da velocidade e temperatura. Assim, pode considerar que houve a convergência da física quando atender as seguintes inequações (50) e (51), ou seja, quando a diferença da temperatura e da velocidade entre dois laços de interação consecutivos forem menor que um erro estipulado, neste caso 0,001(°C) e 0,001 m/s a temperatura e a velocidade, respectivamente.

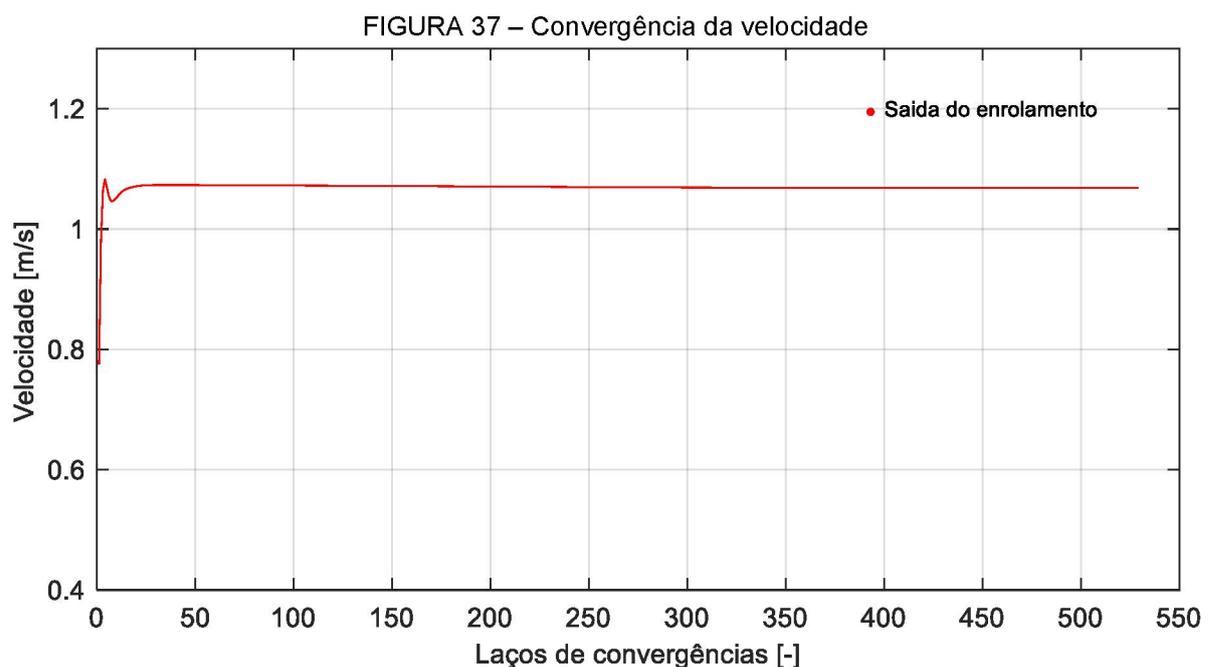
$$T(i + 1) - T(i) < erro \quad (50)$$

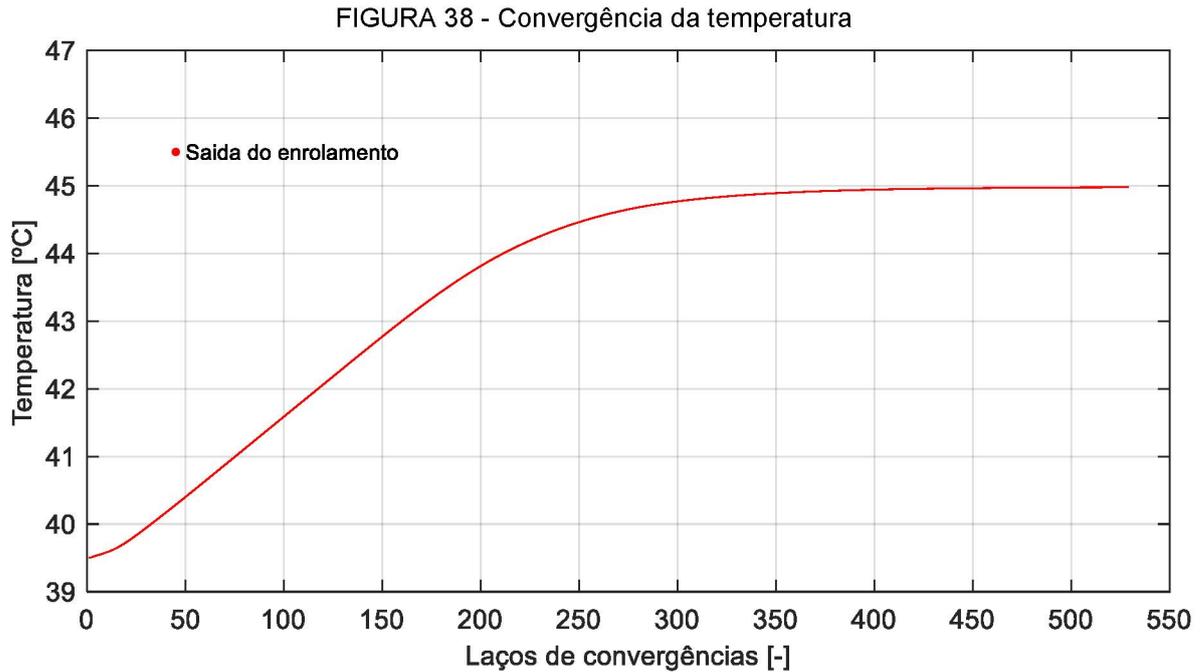
$$v(i + 1) - v(i) < erro \quad (51)$$

Onde, i apresenta o número da interação.

Com o objetivo de determinar a convergência da física foi inserido um ponto de monitoramento na saída do duto de resfriamento do enrolamento primário, a qual faz a aquisição das variáveis da velocidade e temperatura

A convergência destas variáveis, velocidade e temperatura do modelo numérico estão apresentadas na FIGURA 37 e FIGURA 38.





Desta maneira, pode-se avaliar os resultados obtidos pela simulação, pois o erro residual do modelo numérico é relativamente baixo e além disso houve uma convergência das variáveis velocidades e temperatura, como é ilustrado na FIGURA 37 e FIGURA 38.

O tempo de simulação foi entorno de 08 horas 32 minutos e 15 segundos, alocando 42,102 GB de RAM por meio de três workstation, de mesma configuração.

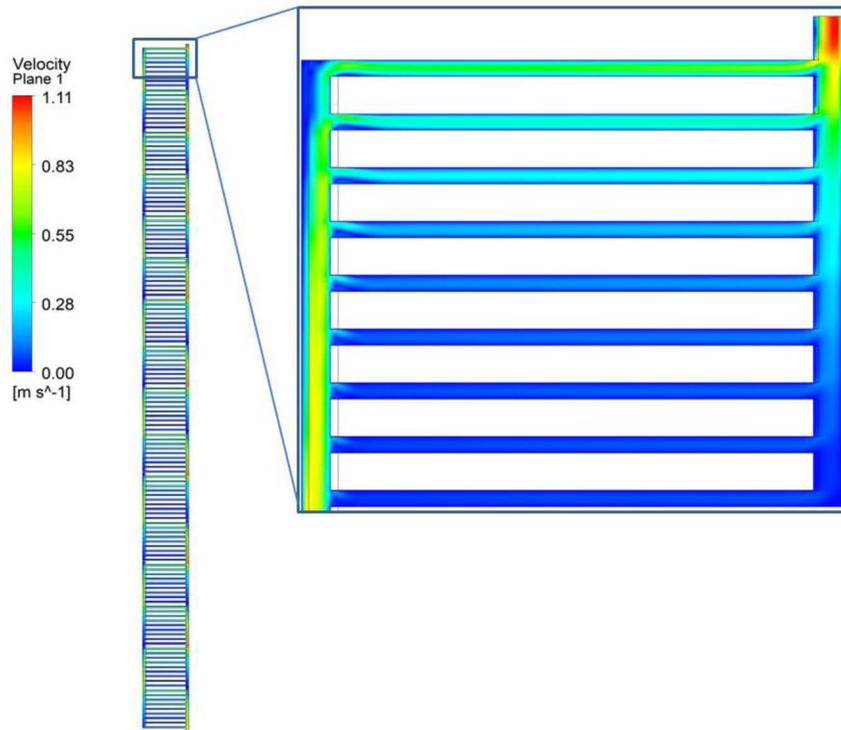
- Inter® Xeon® CPU E5-1650 v3 @ 3,50GHz;
- Memória RAM 16,0 GB.

4.4.3 Avaliação dos Resultados do Modelo Numérico

O campo de velocidade do modelo térmico do óleo mineral pode ser observado na FIGURA 39, como foi considerado que a densidade é constante em função da temperatura, não houve aumento na velocidade ao longo do circuito hidráulico do enrolamento série. A velocidade média na entrada e na saída do modelo em estudo foi de 0,770 (m/s), com um valor de densidade de 867,00 (kg/m³),. Enquanto que na saída do modelo a velocidade média permaneceu a mesma 0,771 (m/s). Como pode ser observado houve a conservação de massa no modelo.

Além disso a velocidade máxima obtida nos dutos do enrolamento série foi de 1,109 (m/s) localizados nos dutos verticais internos do circuito hidráulico do enrolamento, sendo este na saída da bobina.

FIGURA 39 – Campo de velocidade ao longo do circuito hidráulico do enrolamento



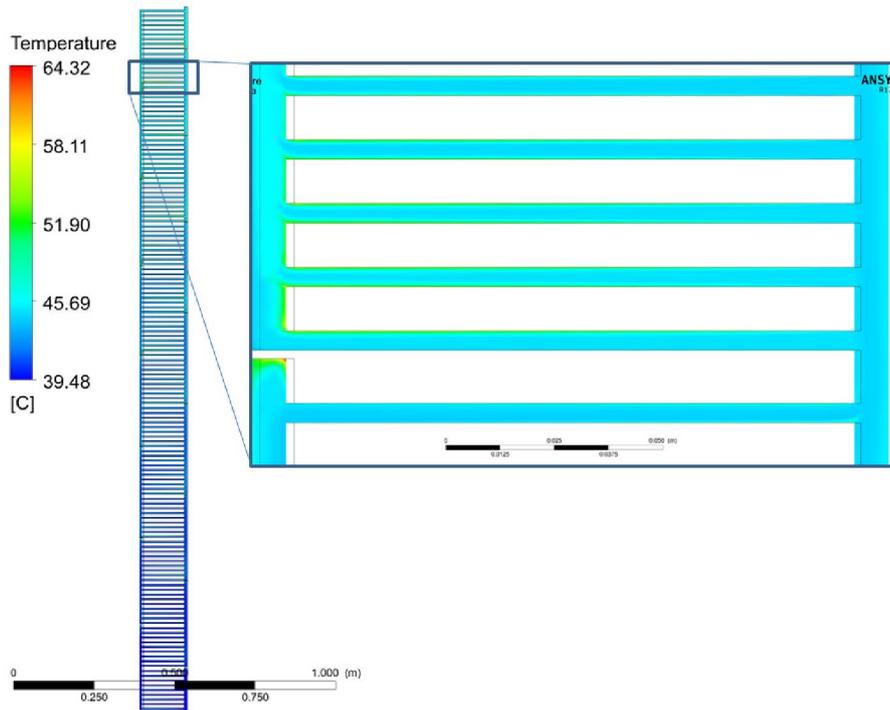
O QUADRO 5 apresenta as velocidades médias axiais nos dutos interno e externo e as velocidades médias radiais no circuito hidráulico do enrolamento.

QUADRO 5 –Velocidade médias no circuito hidráulico do enrolamento

Modelo	Valor médio	Unidade
Velocidade axial no duto interno	0,771	(m/s)
Velocidade axial no duto externo	0,6135	(m/s)
Velocidade radial no duto horizontal	0,1319	(m/s)

A distribuição de temperatura ao longo do enrolamento primário obtida na simulação é apresentada na FIGURA 40. Observa-se que há um ganho de temperatura do óleo mineral a medida que o óleo percorre os dutos do circuito hidráulico.

FIGURA 40 - Distribuição da temperatura do óleo no circuito hidráulico do enrolamento.



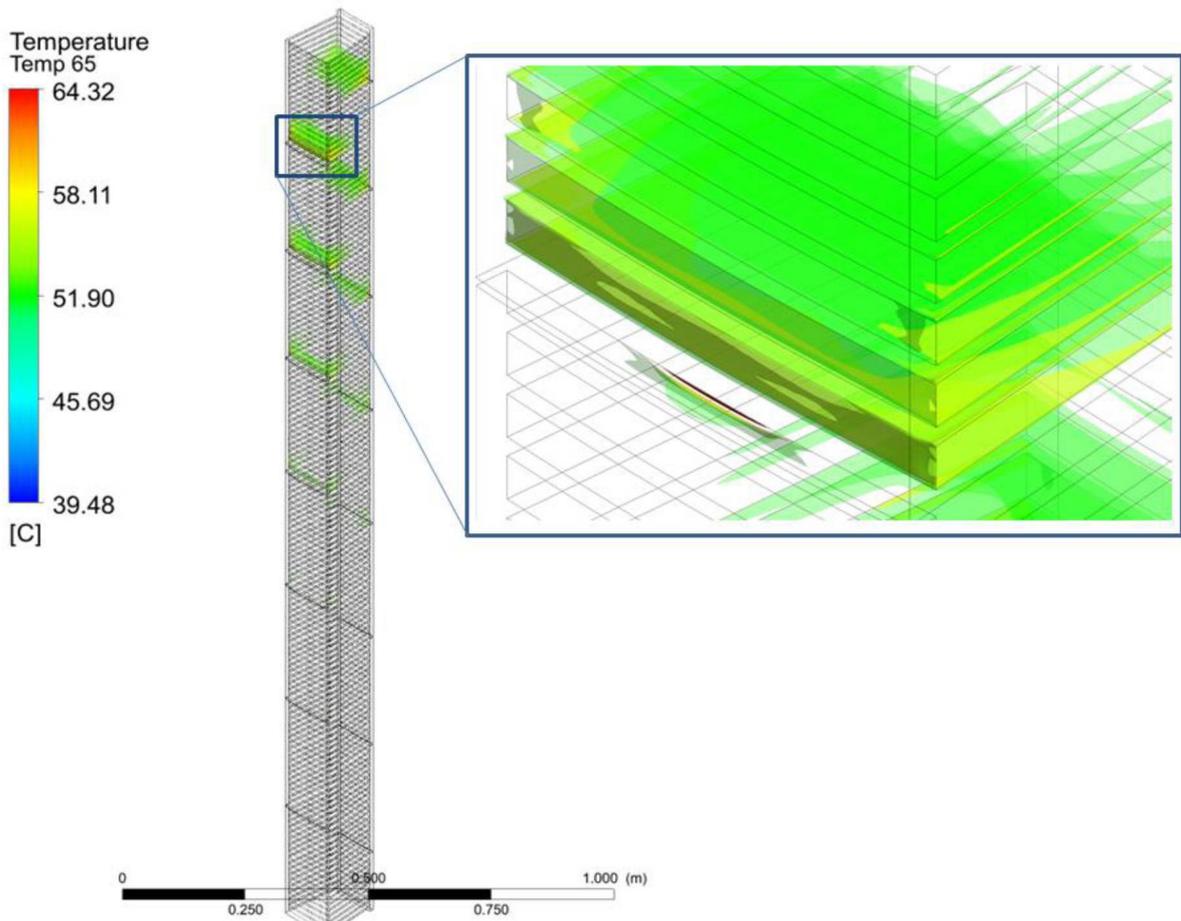
A temperatura na entrada do modelo possui um valor de 39,5 (°C), enquanto na saída do enrolamento a temperatura média do óleo é entorno de 45,4 (°C), desta forma a simulação apresentou um ganho na temperatura média do óleo de 5,9 (°C). A transferência de calor média entre os enrolamentos primários e o óleo mineral foi entorno de 5,452 (kW). Desta forma, os valores de temperatura obtidos na simulação encontram-se aceitáveis quando comparados com os valores referentes as normas de projeto, conforme o QUADRO 6 (ITAIPU, 2011).

QUADRO 6 – Comparação da temperatura de saída do modelo com a norma

Temperatura média - Simulação [°C]	Temperatura do óleo [°C]	Limite conforme Norma [°C]
45,4	45,5	65

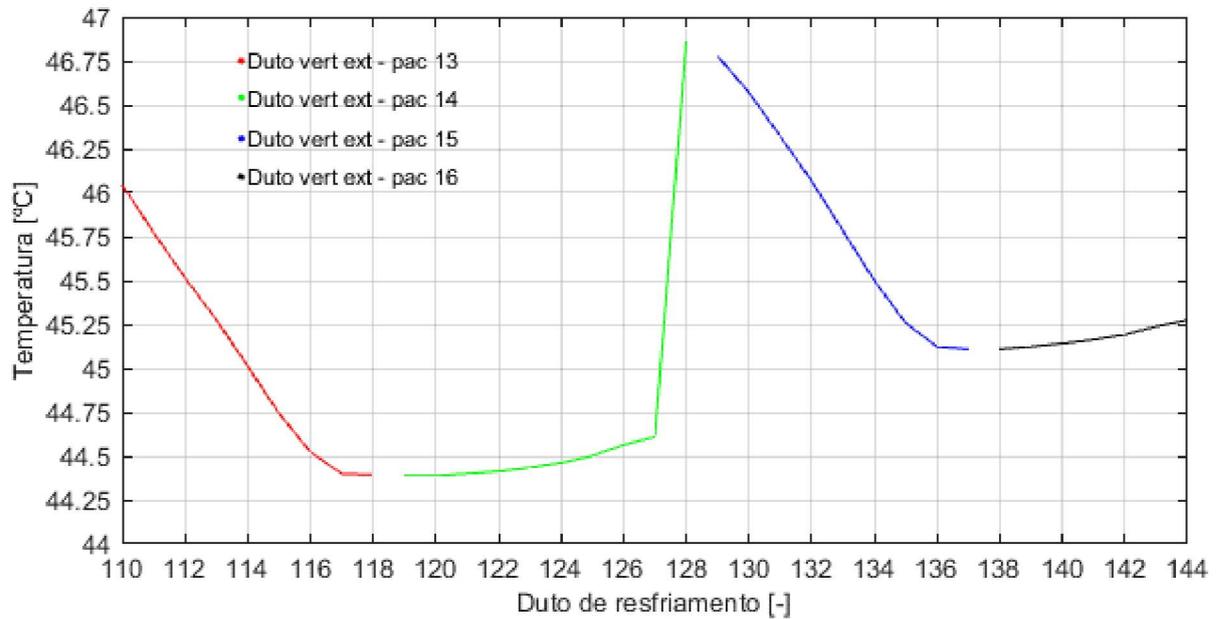
Porém existem regiões ao longo do duto de resfriamento do enrolamento temperaturas mais elevadas, entorno de 64,3 (°C) como pode ser observado na FIGURA 41.

FIGURA 41 – Localização dos pontos quentes no circuito hidráulico do enrolamento.



Isso é decorrente do aspecto geométrico da bobina, ou seja, em virtude do posicionamento dos defletores de óleo. Pois existe uma estagnação do óleo mineral logo abaixo da chicana, resultando em valores de velocidades praticamente iguais a zero. Desta forma o modelo numérico apresentou as maiores temperaturas do óleo mineral próximo do topo da bobina, mais especificamente, abaixo da penúltima chicana do circuito hidráulico, como pode ser observado na FIGURA 42.

FIGURA 42 - Temperatura média do óleo no duto vertical externo do circuito hidráulico.



4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada a avaliação numérica das trocas térmicas entre o enrolamento série e o óleo mineral, obtendo uma estimativa dos perfis de temperatura ao longo do circuito hidráulico de um único duto de óleo do enrolamento.

Observa-se no final do subtópico 4.4.2, a intensidade do poder computacional, especificamente a memória RAM, necessária para obter os resultados da simulação. A estratégia adotada foi em realizar processamento em paralelo entre três máquinas, conforme especificadas no trabalho.

Como resultado da simulação numérica foi possível determinar a localização tridimensional dos pontos mais quentes do óleo mineral que percorre o circuito hidráulico do enrolamento série, além de estimar a sua intensidade.

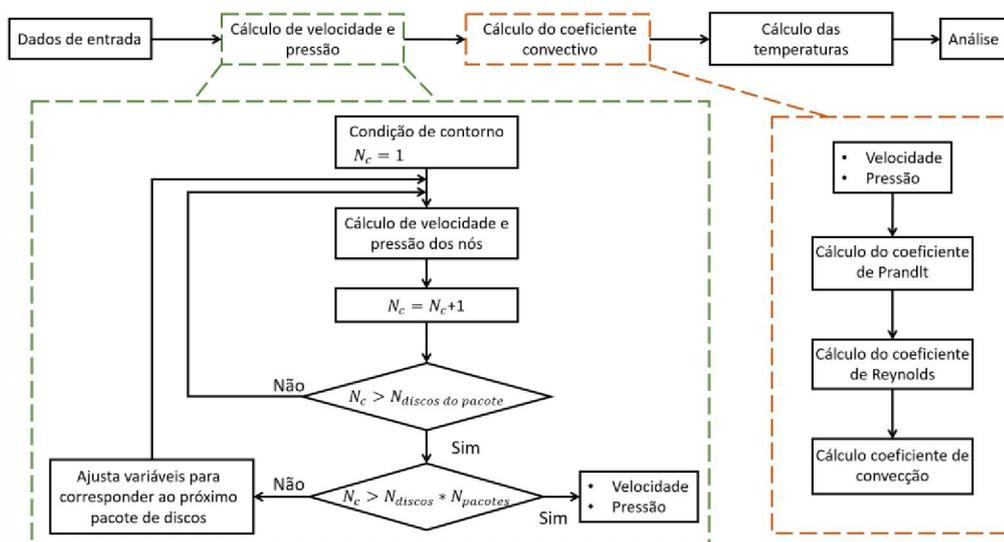
5 MODELO DE REDE DO CIRCUITO HIDRÁULICO DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO

5.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE REDE

Segundo o fluxograma, o procedimento inicia-se, informando alguns dados de entrada, referente as condições de contorno e aos aspectos geométricos da bobina.

Na sequência calcula se a velocidade do óleo nos dutos verticais e horizontais e as pressões no nós do modelo, conforme explicado no capítulo 2. A primeira interação começa pelos dutos entorno do primeiro condutor, na sequência determina as velocidades e pressões entorno do segundo condutor, assim sucessivamente. Caso o número de condutores seja maior que nove, inicia-se o cálculo das velocidades e pressões para a próxima seção, considerando como condição de entrada a resposta do último duto da primeira seção. Quando atingir a decima sexta seção terá determinado todo campo de velocidade e pressão do circuito hidráulico do enrolamento, conforme FIGURA 43.

FIGURA 43 – Fluxograma do modelo de rede do cálculo das velocidades

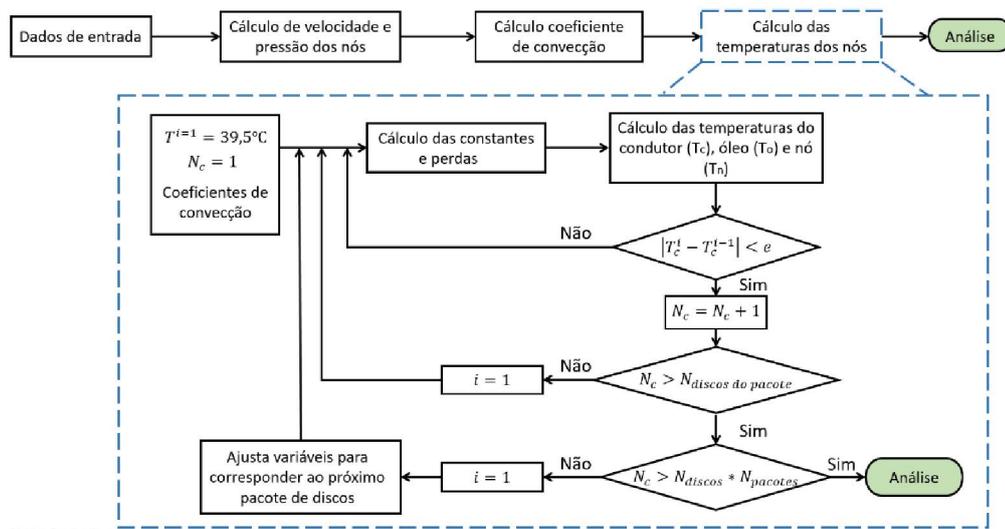


Com a determinação dos campos de velocidade é possível calcular o coeficiente convectivo de transferência de calor, com o intuito de determinar os campos de temperatura do óleo e dos condutores.

Assim, é necessário primeiramente determinar o número de Prandtl e o número de Reynolds do fluxo de óleo mineral com o objetivo de calcular o coeficiente convectivo de transferência de calor.

Terceira etapa do processo é calcular as temperaturas do óleo e do condutor. A primeira iteração inicia com a temperatura do condutor e do óleo em 39,5 (°C) e estima-se as perdas no enrolamento. Caso a diferença entre a temperatura do condutor na iteração presente com a anterior seja maior que um erro especificado, realiza o processo novamente, porém com as temperaturas atualizadas. O processo finaliza quando a diferença da temperatura for menor que o erro estipulado, passando para o próximo condutor.

FIGURA 44 - Fluxograma do modelo de rede do cálculo das temperaturas



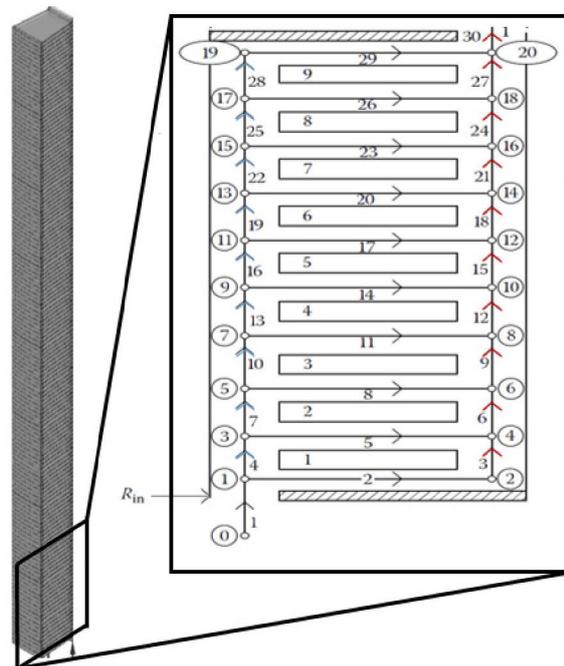
Quando o número de condutores for maior que nove, inicia-se o cálculo das temperaturas dos condutores e do óleo nos dutos de resfriamento para a próxima seção, considerando como condição de entrada para esta segunda seção a resposta do último duto da primeira seção, assim sucessivamente.

Quando atingir a décima sexta seção do enrolamento terá determinado as temperaturas dos 144 condutores além das temperaturas dos óleos nos dutos de resfriamento do enrolamento, conforme FIGURA 44.

5.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO DE REDE

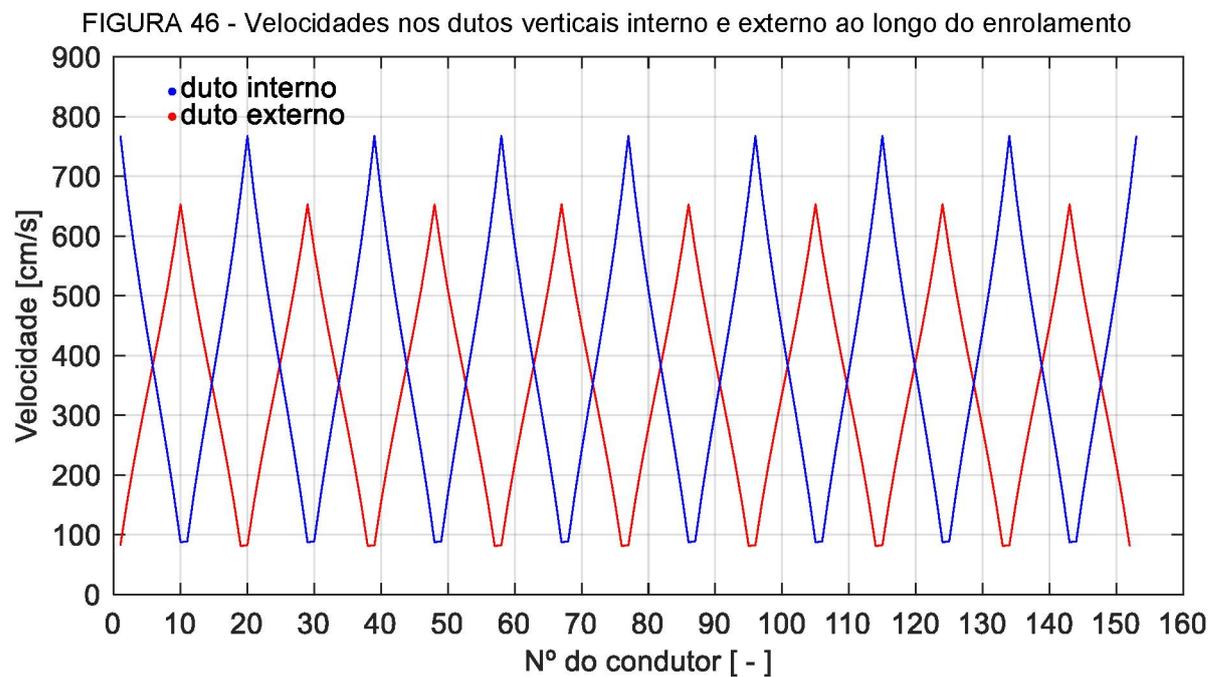
A FIGURA 45 apresenta a seção do enrolamento de alta tensão, pois existe uma repetitividade ao longo da bobina a partir desta seção. Pode observar na mesma FIGURA 45 que existem nove discos por seção do enrolamento. Além disso em cada seção há vinte e nove dutos de resfriamento, conforme enumerado, a qual tem por objetivo garantir o isolamento dielétrico entre condutores e retirar todo o calor gerado por estes.

FIGURA 45 - Modelo de rede da seção do enrolamento primário, identificando os dutos verticais interno e externo.



Na mesma FIGURA 45, identifiquei os dutos verticais interno com a cor azul e os dutos verticais externo com a cor vermelha.

Enquanto que na FIGURA 45, ilustra a variação da velocidade média do óleo nos dutos verticais interno e externo ao longo do enrolamento. Ao considerar a densidade constante em função da temperatura teve-se a conservação da velocidade em ambos os dutos ao longo do enrolamento, como pode ser observado na mesma Figura.

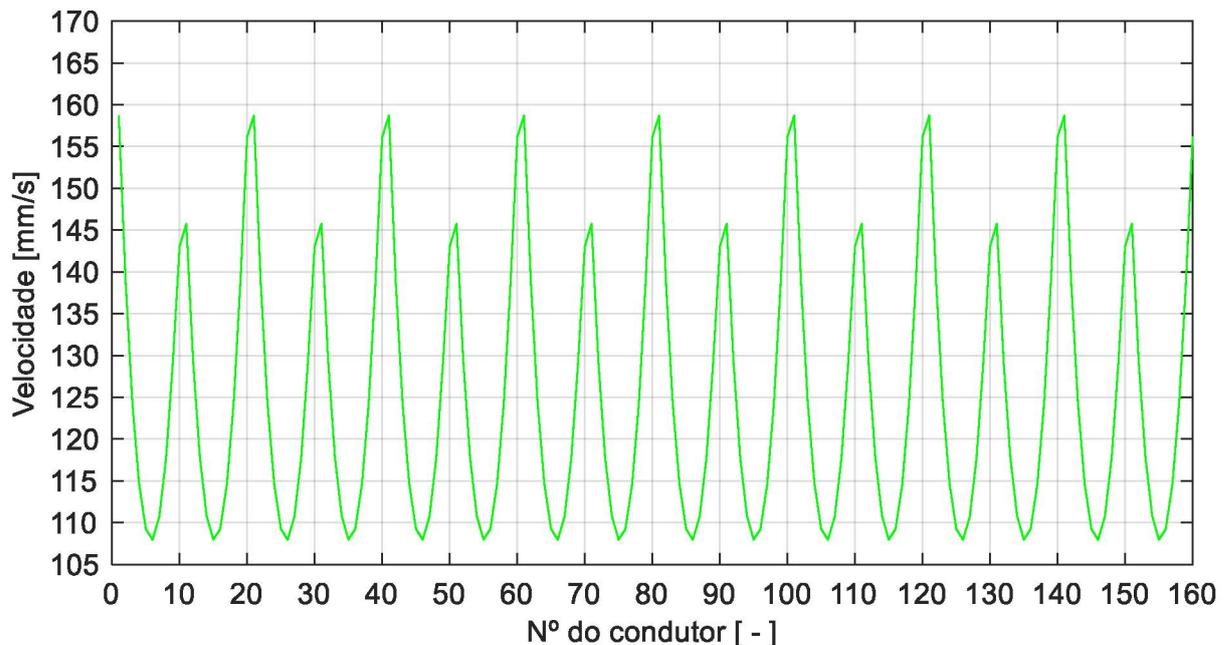


A velocidade máxima no duto vertical interno foi de 767,7 (mm/s), valor este igual a condição de entrada no modelo, além disso a menor velocidade obtida foi de 87,53 (mm/s), localizado no duto 28. Enquanto que nos dutos verticais externo a velocidade máxima obtida foi de 653,02 (mm/s), sendo no duto 30, em contra partida a menor velocidade ficou entorno de 81,27 (mm/s), localizado no duto 3.

A diferença dos valores de velocidades entre os dois dutos é explicada pela diferença de tamanho das áreas transversais entre eles a qual o óleo mineral percorre, ou seja, quanto menor a área transversal maior será a velocidade.

Na FIGURA 49 apresenta as velocidades do óleo nos dutos horizontais, tendo como a menor velocidade no duto 14 com o valor de 107,21 (mm/s).

FIGURA 47 - Velocidades nos dutos horizontais da última seção do enrolamento



Na FIGURA 48 a elevação da temperatura do óleo mineral nos dutos verticais interno, na cor azul, e nos dutos verticais externo, na cor vermelha. Observa se que a temperatura na entrada do modelo de rede foi de 39,5 (°C), sendo está no duto interno do enrolamento, enquanto na saída do enrolamento a temperatura do óleo mineral foi de 44,32 (°C). Neste caso houve um ganho de temperatura média de 4,82 (°C). A transferência de calor média entre os enrolamentos primários e o óleo mineral foi entorno de 4,53 (kW).

FIGURA 48 - Perfil de temperatura média do óleo mineral nos dutos verticais interno e externo ao longo do enrolamento.

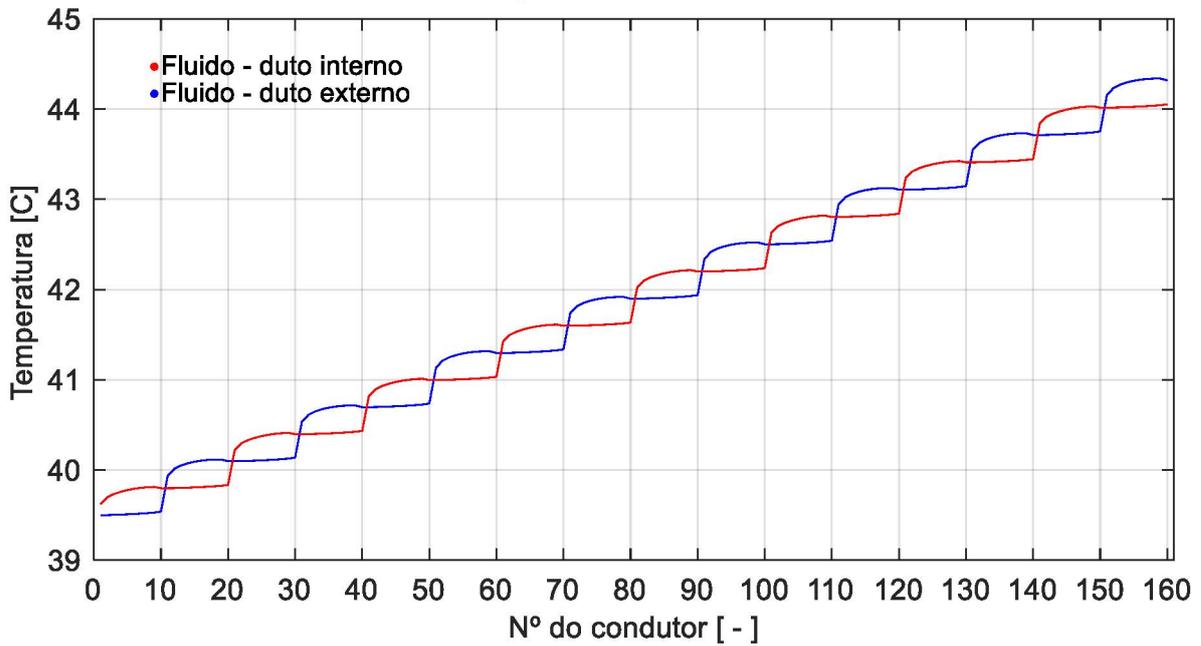
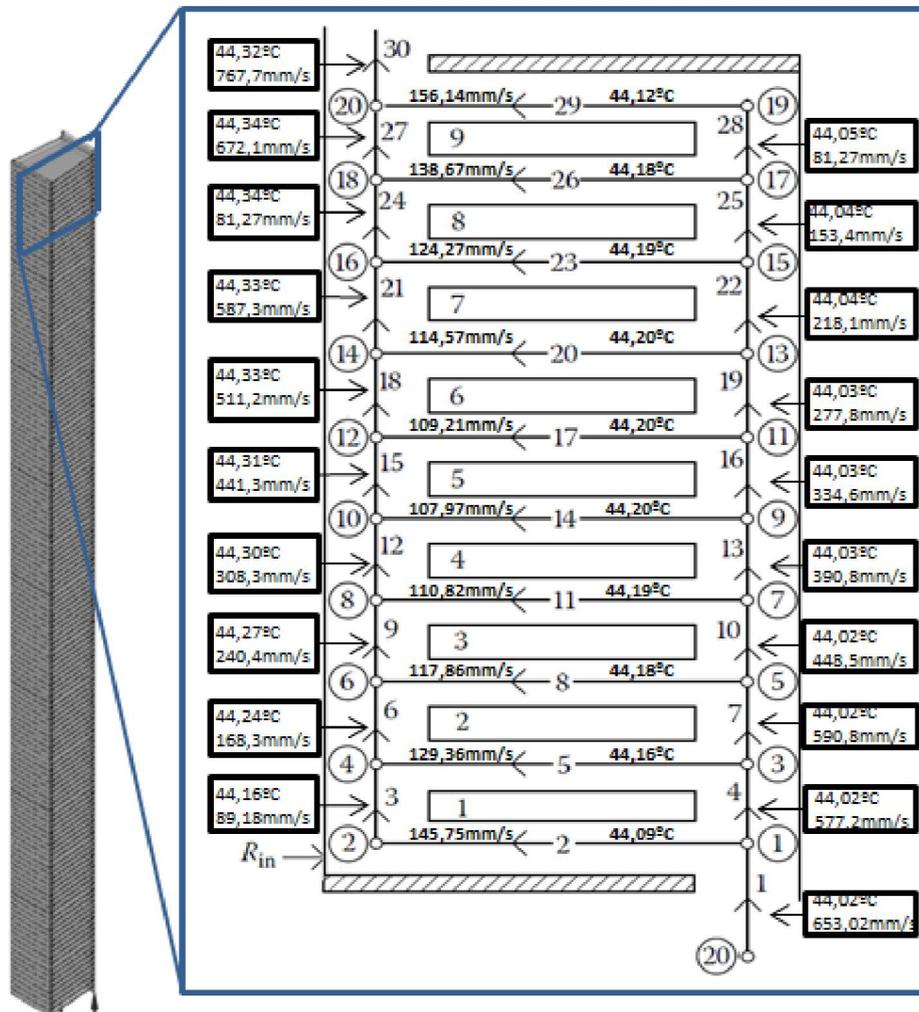


FIGURA 49 - Distribuição da velocidade e temperatura do óleo mineral nos dutos de resfriamento da última seção do enrolamento série.



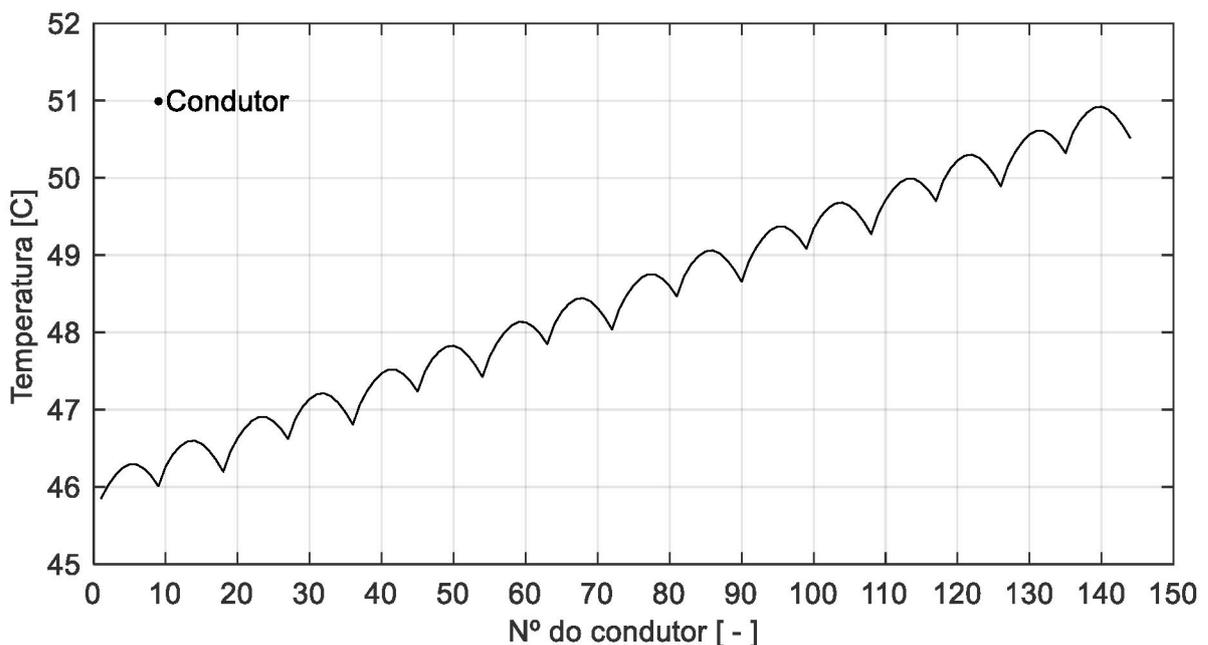
Analisando a última seção do enrolamento primário do autotransformador, observa-se na FIGURA 49 o comportamento da temperatura e velocidade do óleo que percorre os dutos de resfriamento. Nesta última seção do enrolamento houve um aumento de temperatura de 44,02 (°C) até 44,32 (°C), ou seja, um ganho de 0,30 (°C). Aplicando o balanço de energia entre a penúltima e última chicana, observa se que houve a conservação de energia neste volume de controle.

Os maiores gradientes de temperatura encontram se nos dutos horizontais 2 e 5, em razão de uma baixa vazão mássica, como ilustrado na FIGURA 49. Este fato é uma consequência das elevadas perdas de carga existentes nestes dutos

Na FIGURA 50 apresenta as temperaturas dos discos do enrolamento primário. Observa que existe um gradiente de temperatura da base até o topo da bobina, pois a medida que o óleo mineral percorre o circuito hidráulico há um aumento da temperatura do próprio, como pode observar na FIGURA 50, logo diminui a quantidade de calor retirado dos discos da bobina.

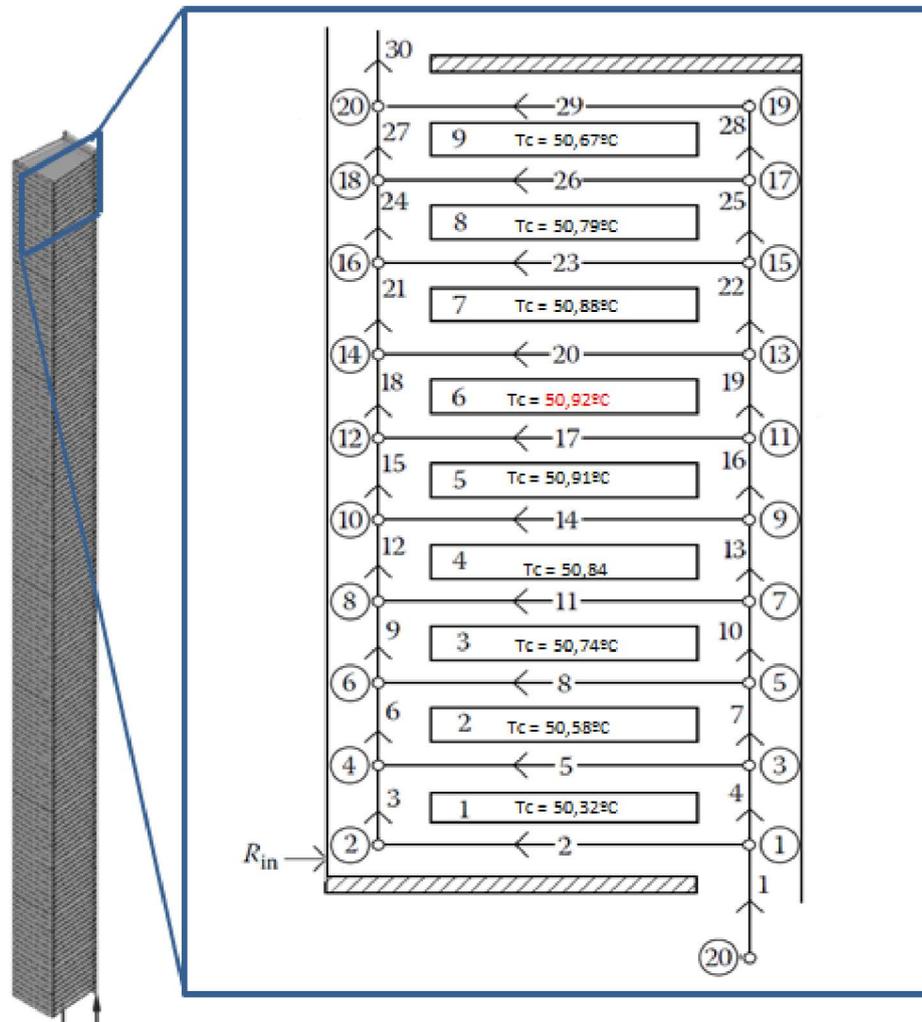
Pode observar na mesma FIGURA 50 que o primeiro disco possui a menor temperatura, entorno de 45,85 (°C) enquanto que o disco 140 possui a maior temperatura, sendo, 50,92 (°C), sendo este localizado na última seção do enrolamento primário. Além disso pode observar que as maiores temperaturas dos discos estão no meio da seção.

FIGURA 50 - Temperatura dos discos ao longo do enrolamento.



Analisando a última seção do enrolamento, mais especificamente, a seção que possui o disco mais quente de toda bobina, FIGURA 51.

FIGURA 51 - Temperatura dos discos da última seção do enrolamento série.



Observa-se na FIGURA 51 que o sexto disco desta seção apresenta a maior temperatura entorno de 50,92 (°C), este fato é uma consequência tanto temperaturas quanto das velocidades que estão entorno do disco, ou seja, há uma combinação das maiores temperaturas, entorno de 44,20 (°C) e com baixas velocidades, aproximadamente 109,21 (mm/s) do óleo mineral, como é ilustrado na FIGURA 47.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo realizou a avaliação os resultados do modelo de rede térmico hidráulico, metodologia desenvolvida pelo Del Vecchio et al (2017), do enrolamento

primário, tipo disco, de um autotransformador. Os resultados foram obtidos por meio de uma seção de um dos dutos de óleo isolante da bobina.

Este modelo apresentou como resultados, os campos de velocidade e temperatura do óleo mineral, ao longo do circuito hidráulico, além de obter as temperaturas médias dos condutores.

Como resultado determinou as maiores temperaturas dos discos em cada seção, além de determinar o aumento da temperatura do óleo, tanto nos dutos verticais quanto nos dutos horizontais.

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO POR VOLUMES FINITOS COM O MODELO DE REDE

Em ambos os modelos aplicou-se as seguintes condições de contorno, a vazão mássica do óleo na entrada de 0,5 (kg/s), e uma temperatura de 39,5 (°C), conforme apresentados nos capítulos 5 e 6 do trabalho. Entretanto, no modelo de rede, inseriu-se mais uma variável na entrada, sendo a pressão, enquanto que no modelo numérico está variável foi aplicado na saída do enrolamento.

A fonte de calor foi relacionada com as perdas por efeito Joule em razão da passagem de corrente elétrica nos condutores. No modelo numérico calculou-se as perdas e a inseriu-se como condição de contorno, logo não houve a necessidade de determinar as temperaturas dos discos do enrolamento, reduzindo assim, o número de elementos e consequentemente o poder computacional. Já no modelo de rede, calculou-se as perdas para cada iteração do modelo, inseriu-se esta informação nos balanços de energia, desta maneira obteve-se as temperaturas médias dos discos.

6.1 ANÁLISE DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE OS MODELOS

Observa-se que o modelo de rede determinou as velocidades, pressões e temperaturas médias do circuito hidráulico do enrolamento, enquanto que o modelo numérico por CFD, apresentou as distribuições destas variáveis de forma tridimensional, levando em consideração o aspecto geométrico dos canais de resfriamento do condutor.

No modelo numérico, desenvolvido no capítulo 4, observou-se que as maiores temperaturas do óleo mineral foi entorno de 64,2 (°C), localizado em uma região que não é prevista pelo modelo de rede, conforme a FIGURA 41.

A temperatura do óleo na saída do modelo de rede e do modelo numérico pode ser observado no QUADRO 7.

Observa-se que a diferença das temperaturas do óleo na saída do enrolamento entre os modelos foi de 0,98°C, entretanto o modelo numérico apresentou uma diferença de temperatura, quando comparado com o memorial de cálculo, de 0,02 (°C) enquanto que o modelo de rede apresentou uma diferença de 1,18 (°C).

QUADRO 7 – Comparação das temperaturas de ambos modelos

Temperatura média – Modelo Numérico [°C]	Temperatura média - Modelo de rede [°C]	Temperatura do óleo do memorial de cálculo [°C]
45,3	44,32	45,5

As maiores temperaturas do óleo obtidas pelo modelo de rede foi entorno de 44,32 (°C), localizado na última seção, nos dutos 24 e 27, conforme Figura 51 no capítulo 4. No modelo numérico as temperaturas mais elevadas encontram se na antepenúltima seção, conforme Figura 43, tendo um valor entorno de 64,3 (°C), conforme Figura 42, no capítulo 5. Observa-se que essas temperaturas estão muito próxima das parede, na qual a velocidade do óleo é muito baixa, próxima de zero, sendo essa uma consequência da função de parede aplicada no modelo. Porém ao comparar com o mesmo duto vertical o modelo numérico apresentou uma temperatura entorno de 45,4 (°C).

6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou se que o modelo de rede é uma forma simplificada do modelo numérico por CFD, pois as velocidades e as temperaturas se apresentam na forma de médias. Entretanto o modelo de rede apresentou resultados satisfatórios quando comparados com o modelos numéricos tridimensionais.

Em contratapartida o poder computacional e o tempo de processamento é muito menor do modelo de rede quando comparados com o modelo por CFD.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a comparação entre o modelo numérico desenvolvido pela metodologia CFD e o modelo de rede do autor Del Vechio et al (2017), com o intuito de avaliar as diferenças da temperatura do óleo.

Deste modo, realizou o estudo do comportamento térmico do óleo mineral que percorre o circuito hidráulico do enrolamento primário, tipo disco, do autotransformador. Foi necessário abordar conceitos de transferência de calor, princípios de funcionamento de transformadores e aspecto geométrico do equipamento, ou seja, qualquer característica que poderia influenciar nos campos de temperatura do equipamento. Por fim, estudou o modelo de rede desenvolvido pelo o autor Del Vechio et al (2017).

Na sequência, aplicou a metodologia da Dinâmica dos Fluidos Computacionais, CFD. Com o auxílio da ferramenta CAD SolidWorks, desenhou o enrolamento primário do tipo disco, com objetivo de obter o percurso do óleo mineral, em seguida realizou a discretização do domínio contínuo, formando a malha computacional.

A configuração do modelo numérico foi realizado, utilizando os memoriais de cálculo do sistema de resfriamento fornecido pelo fabricante. Neste contexto a simulação apresentou uma excelente convergência tanto numérica quanto física. Os resultados das temperaturas do modelo numérico se apresentaram satisfatório conforme a norma, entretanto identificou possíveis regiões no circuito hidráulico do enrolamento com a formação dos pontos quentes.

O segundo modelo desenvolvido no trabalho, modelo de rede, utilizou as mesmas informações do aspecto construtivo do enrolamento primário do autotransformador fornecidos pelo memorial de cálculo do sistema de resfriamento do fabricante. Os resultados do modelo de rede se apresentaram adequados tanto para as temperaturas do óleo quanto as temperaturas dos condutores ao longo do enrolamento. Pode se identificar quais discos do equipamento teriam as maiores temperaturas.

Por fim comparou ambos modelos com a finalidade de apresentar as suas diferenças em relação aos campos de temperatura. Observou se que o modelo numérico por meio do CFD, demonstrou os resultados de temperatura do óleo mais

próximos do memorial de cálculo do fabricante. Entretanto, o seu tempo de processamento e o poder computacional se manifestaram muito elevados.

Sugestão para trabalhos futuros:

- Considerar os condutores no modelo numérico por volumes finitos;
- Avaliar uma sobrecarga no equipamento, avaliando o comportamento térmico;
- Considerar as perdas por corrente de Foucault em ambos os modelos;
- Comparar os resultados dos modelos com as medições de ensaio de elevação de temperatura.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **ANSYS CFX. Reference Guide**. Canonsburg – PA, 2013

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. Ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013.

ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J., **Transferência de calor e massa**. 4ed., Porto Alegre, 2012.

LAPWORTH, J., PICHER, P. CHANNET, J., KRABENBORG J., NORDMAN, H. RADAKOCVIC, Z., ROIZMAN, O., SPOORENBERG, K., SUSAN, D., BERTHEREAU F., CAMPELO H. CHEN, S., CUESTO, M., DAVYDOV, V., FLECK G., GRADNIK, T., GUNTER, N., GUO, W., KIM, J. K., LEE, J., PORTILLO, A., SCHMIDT, N., SIMONSON E., TENBOHLEN, S., TORRIANO, F., TRAUTMANN, F., VAN DER VEKEN, W., WANG, Z. WIJAYA, J., WILSON, G., WU, W., YAMAMURA, S., **TRANSFORMER THERMAL MODELLING**. CIGRÉ, 2016.

DEL TORO, VINCENT. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos

DEL VECCHIO, R. M. FEGUALI, B.P.T.; AHUJA, D.M.S.R. **Trasformer Design Principles**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY C. JR.; UMANS, S. D.. **Máquinas elétricas**. 6ed., Porto Alegre: Bookman, 2006.

FRIEDENBERG, L. E.; SANTANA, M. C. **Propriedades de óleos Isolantes de Transformadores e a proteção do meio ambiente**. In: IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre-RS, 2014.

GURU BHAG S., HIZIROGLU HÜSEYİN R., **Eletric machinery and transformers**, 3 ed., New York: Oxford university press, 2002.

HOLMAN, J. P., **Transferência de calor**. 1. Ed. São Paulo: McGraw-Hill 1983.

HARLOW, J. H., **Electric Power Transformer Engineering**. 1ª ed. CRC Press (2004).

INCROPERA, Franck P.; DEWITT D. P.; BERGMAN T. L.; LAVINE A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

ITAIPU BINACIONAL, **SUBESTAÇÃO MARGEM DIREITA AMPLIAÇÃO DO SETOR 3 – PÁTIOS DE 220 E 500 kV – T5/R5 AUTOTRANSFORMADOR – T5 MEMORIAL DE CÁLCULO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO**. Foz do Iguaçu, 2011.

KREITH, FRANCK. **Princípios da transmissão de calor**. 3ed., São Paulo: Blucher 1977.

KOSOW, IRVING L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4ed. Porto Alegre: Globo, 1982

LIMA DE, J. DE J. A.; SCHUTEZER, K. **Integração entre sistemas cae/cad utilizando os softwares mdsegin e solid edge**. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2009, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2009.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SANTOS C. W. **Modelo Térmico do Sistema de Resfriamento do Transformador Principal da Unidade Geradora da Usina Hidrelétrica de Itaipu**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Estadual do Oeste de Paraná, 2016.

SILVA, J. R. **Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento**. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SUSA, D. **Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers**. Tese (Doutorado em Ciências Exatas) – Helsinki University of Technology, 2005.

SILVA, J. R. **Avaliação “on-line” de temperatura do transformador de potência através de modelagem numérica magnética e termodinâmica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SILVA, A. C. M. **Microemulsões Aplicados ao Tratamento de Óleos Isolantes**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

PAGANOTO, P. S. **Determinação das Distâncias Mínimas de Segurança da Saída de Linha da Subestação Isolada a Gás de Itaipu em Relação aos Limites de Exposição ao Campos Elétrico**. 2016. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

VERSTEEG, H K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

WINDERS J. **Power Transformers Principles and Applications**. 1ª Ed. CRC Press, (2002).