



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de
Transformador à Seco Suprindo Cargas Não Lineares**

Rafael Gonçalves Mafra

Itajubá, março de 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Rafael Gonçalves Mafra

**Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de Transformador à Seco
Suprindo Cargas Não Lineares**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica como
parte dos requisitos para obtenção do Título
de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.**

Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo

**Orientador: Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior**

**Março de 2017
Itajubá**

MAFRA, Rafael Gonçalves

Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de Transformador à Seco Suprindo Cargas Não Lineares / Rafael Gonçalves Mafra – Itajubá: UNIFEI, 2017.

98p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior

1. – Transformadores - Convecção Natural e Forçada, COMSOL, Carga Não Linear, Hot Spots

I. I. Lima E Silva, Sandro M. M. II. Universidade Federal de Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Rafael Gonçalves Mafra

**Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de
Transformador à Seco Suprindo Cargas Não Lineares**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 21 de março de 2017,
conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia
Mecânica**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luís Felipe dos Santos Carollo – FEPI

Prof. Dr. Marcelo José Pirani – IEM-UNIFEI

Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva (Orientador)
– IEM-UNIFEI

Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior (Co-Orientador) – FCT - UFG

Itajubá
2017

Agradecimentos

Agradeço à Deus, meus pais José e Marcia e toda minha família que sempre me apoiou e acreditou em mim incondicionalmente.

Agradeço também à Capes e a UNIFEI pelo apoio financeiro e intelectual, à FAPEMIG pelos recursos para aquisição dos equipamentos utilizados neste trabalho principalmente o transformador e a carga resistiva.

Meu orientador, professor Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva pela oportunidade deste trabalho e auxílio em todo seu desenvolvimento e ao meu Coorientador Fernando Nunes Belchior pelo apoio na área de Engenharia Elétrica.

Aos Laboratórios LABTC e CERIN pelos equipamentos utilizados no trabalho, aos professores Robson Bauwelz Gonzatti e Luiz Eduardo Borges da Silva por fornecerem a carga capacitiva.

A todos os colegas do laboratório, ao Diego e Professor Rogério Fernandes Brito pelo auxílio com Software COMSOL e ao amigo Bruno pela ajuda durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também a minha namorada Fernanda pela paciência, e a república Cerrado pelas grandes amizades.

De forma geral agradeço a todos que contribuíram para minha formação e ajudaram a fazer com que este trabalho fosse concluído.

Resumo

Mafra, R. G. (2017), *Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de Transformador à Seco Suprindo Cargas Não Lineares*, 98p. Dissertação (Mestrado em Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Transformadores são equipamentos utilizados em todo o mundo para manter um fornecimento estável e seguro de energia para a população. Eles são responsáveis tanto pela redução quanto aumento da tensão ao longo da rede de distribuição de energia elétrica. É importante estudar o comportamento térmico dos transformadores em relação às mudanças na natureza das cargas a que esses transformadores estão sujeitos. Eles são afetados por essas cargas distorcidas causadas pela influência de equipamentos eletrônicos na corrente elétrica. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento térmico de um transformador trifásico à seco de 5 kVA trabalhando com cargas lineares e não-lineares. Termopares e PT100 foram utilizados para medir as temperaturas dentro do núcleo. Muitos testes experimentais foram realizados para determinar a posição ideal para esses sensores de temperatura. Além disso, ventiladores foram utilizados dentro do transformador para analisar a influência da convecção forçada nas temperaturas. Correlações empíricas da literatura foram utilizadas para determinar o coeficiente médio de transferência de calor utilizado na análise numérica e validar os resultados obtidos neste trabalho. A emissividade da superfície do núcleo foi medida com um termovisor. O programa *COMSOL*[®] foi utilizado para a simulação numérica do aquecimento do núcleo do transformador sob o efeito do tipo de carga e resfriamento. Foram feitas comparações entre as temperaturas experimental e numérica para validar a metodologia. Os bons resultados obtidos mostraram que os resíduos de temperatura apresentaram diferenças médias inferiores a 10 %. As temperaturas dos *Hot Spots* e seus locais também foram encontrados com esta metodologia. A temperatura dos *Hot Spots* no núcleo atingiu 20 °C acima do limite de isolamento do transformador. Estas temperaturas e locais servirão no futuro para otimizar projetos de resfriamento de transformadores à seco.

Palavras-chave: Aquecimento, Transformadores, Carga Não Linear, Convecção Natural e Forçada, *Hot Spots*, *COMSOL*.

Abstract

Mafra, R. G. (2017), *Numerical and Experimental Analysis of the Thermal Behavior of Dry-Type Transformer Supplying Nonlinear Loads*, 98p. Dissertação (Mestrado em Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Transformers are equipment used worldwide to maintain a stable and a safe supply of energy to the population. They are responsible for the reduction and for the increase in the voltage along the chain of the electric power distribution. It is important to study the thermal behavior of the transformers regarding the changes in the nature of the loads to which these transformers are subjected to. They are affected by these distorted loads and by the influence of electronic equipment in the electric current. The aim of this work is to analyze the thermal behavior of a 5 kVA dry-type three-phase transformer working with linear and non-linear loads. Thermocouples and PT100 were used to measure the temperatures inside the cores. Many experiment tests were performed to determine the ideal position for these temperature sensors. In addition, fans were used inside the transformers to analyze the influence of forced convection in the temperatures. Empirical correlations from literature were used to determine the average heat transfer coefficient used in the numerical analysis and to validate the results obtained in this work. The emissivity of the core surface was measured with a thermal camera. *COMSOL*[®] software was used for the numerical simulation of the heating of transformer core under the effect of certain loading and cooling conditions. Comparisons between experimental and numerical temperatures were carried out to validate the methodology. The good results showed that the temperature residuals presented average differences lower than 10%. Hot Spots temperatures and their locations were also possible to be estimated with this methodology. The Hot Spots temperature in the core reached 20 °C above the transformer insulation limit. These temperatures and locations will serve in the future to optimize cooling projects of dry-type transformers.

Keywords: *Transformers, Heat Transfer, Non-Linear Loads, Free and Forced Convection, Hot Spots, COMSOL.*

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Transformador de William Stanley (Revista O Setor Elétrico - Edição 38, 2009) ..	23
Figura 2.2 - Princípio de Funcionamento do Núcleo (JORDÃO,1969)	24
Figura 2.3 - Transformador tipo CORE (núcleo envolvido): (a) construção; (b) diagrama em corte (SANTOS, 2011)	26
Figura 2.4 - Curva de Histerese (DEL TORO, 1999)	28
Figura 2.5 - Domínios magnéticos aleatórios (a) e (b) organizados (DEL TORO, 1999)	28
Figura 2.6 - Diagrama térmico de um transformador apresentando a distribuição de temperatura ao longo da altura do enrolamento e no interior dos canais de óleo (SUSA, 2005).....	30
Figura 2.7 - Componentes mais afetados por falhas em transformadores de subtransmissão (BECHARA, 2010)	34
Figura 3.1 – Modelo térmico tridimensional do núcleo do transformador.....	38
Figura 3.2 - Parte de ferro silício do núcleo	40
Figura 3.3 - Partes de Cobre envolto com papel.....	41
Figura 3.4 - Detalhe do enrolamento de papel e cobre	41
Figura 3.5 - Área de superfície utilizada nos cálculos com convecção forçada.....	44
Figura 3.6 - Dimensões do núcleo em milímetros, vista lateral	46
Figura 3.7 - Dimensões do núcleo em milímetros, vista frontal.....	47
Figura 3.8 - Dimensões do núcleo em milímetros, vista superior	47
Figura 3.9 - Interface do COMSOL 5.2	48
Figura 3.10 - Malha tetraédrica gerada pelo COMSOL	48
Figura 4.1 - Esquema de montagem do aparato experimental utilizado neste trabalho	51
Figura 4.2 - Transformador utilizado nos testes	52

Figura 4.3 - Núcleo do transformador	53
Figura 4.4 – Ventiladores utilizados para testes com convecção forçada	54
Figura 4.5 – Disposição dos ventiladores dentro do transformador	54
Figura 4.6 – Fonte de alimentação Instrutemp	55
Figura 4.7 – Anemômetro utilizado na medição do fluxo de ar dos ventiladores.....	55
Figura 4.8 – Aquisição Agilent 34970A: a) vista frontal e b) vista posterior	56
Figura 4.9 – Carga resistiva trifásica	57
Figura 4.10 – Corrente e Tensão senoidais geradas por carga linear	57
Figura 4.11 – Carga retificadora trifásica.....	58
Figura 4.12 – Corrente distorcida por carga não linear indutiva.....	58
Figura 4.13 – Corrente distorcida por carga não linear capacitiva.....	59
Figura 4.14 – Termopares: a) tipo J e b) tipo K	60
Figura 4.15 – Termômetro de Resistência PT100 de platina	61
Figura 4.16 - Equipamento de banho termostaticado Tecnal TE-184.....	62
Figura 4.17 - Curva de calibração e equação característica do sensor 111	62
Figura 4.18 – Câmera termográfica Flir InfraCAM	63
Figura 4.19 – Imagem termográfica superior do núcleo do transformador aquecido	63
Figura 4.20 – Posição dos sensores no núcleo.....	64
Figura 5.1 – Coordenadas em milímetros dos sensores de temperatura utilizados nos testes experimentais.....	66
Figura 5.2 – Resultados da distribuição de temperatura medidos no núcleo do transformador para condição de convecção natural	67
Figura 5.3 – Temperaturas medidas em função do tempo para o núcleo do transformador para condição de convecção forçada	68

Figura 5.4 – Evolução temporal das temperaturas experimentais no núcleo do transformador para condição de carga Não Linear e Convecção Natural.....	69
Figura 5.5 – Evolução temporal das temperaturas medidas para carga Não Linear e Convecção Forçada	69
Figura 5.6 – Evolução temporal das temperaturas medidas para as condições de maiores aquecimentos	70
Figura 5.7 - Comparação de Sensores para Carga Linear com Convecção Forçada.....	71
Figura 5.8 - Comparação de Sensores para Carga Não-Linear com Convecção Natural.....	71
Figura 5.9 – Malha Tetraédrica gerada para simulação numérica com o programa <i>COMSOL</i> .	72
Figura 5.10 – Evolução temporal dos campos de temperatura a partir da simulação, para os instantes de aquecimento	73
Figura 5.11 – Comparação entre temperatura numérica e experimental para a condição de carga linear com convecção natural	74
Figura 5.12 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga linear com convecção natural	74
Figura 5.13 – Comparação entre a temperatura numérica e experimental para condição de carga linear com convecção forçada	75
Figura 5.14 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga linear com convecção forçada.....	75
Figura 5.15 – Comparação entre temperatura numérica e experimental para condição de carga não linear com convecção natural	76
Figura 5.16 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga não linear com convecção natural.....	76
Figura 5.17 – Comparação entre temperatura numérica e experimental para condição de carga não linear com convecção forçada.....	77
Figura 5.18 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga não linear com convecção forçada.....	77

Figura 5.19 – Localização do <i>Hot Spot</i> para configuração de carga linear com convecção natural	79
Figura 5.20 – Localização do <i>Hot Spot</i> para configuração de carga linear com convecção forçada	79
Figura 5.21 - Localização do <i>Hot Spot</i> para configuração de carga não linear com convecção natural	80
Figura 5.22 - Localização do <i>Hot Spot</i> para configuração de carga não linear com convecção forçada	80
Figura A.1 - Área de superfície do núcleo.....	83
Figura A.2 - Área lateral do núcleo	84

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Propriedades térmicas dos materiais do transformador	45
Tabela 3.2 – Refinamento de malha	49
Tabela 5.1 – Tipos e Posições dos Sensores de Temperatura	66
Tabela 5.2 – Temperaturas e Coordenadas dos Hot Spots de acordo com a natureza da carga.	78
Tabela B.1 – Taxas de Transferência de Calor de Convecção	94
Tabela B.2 – Taxas de Transferência de Calor por Radiação	94

Lista de Símbolos

Letras Latinas

A	Área da superfície do núcleo [m ²]
Ar	Relação adimensional entre a distância e diâmetro dos ventiladores
As	Área da superfície do núcleo sob convecção forçada [m ²]
B	Fluxo Magnético [webers/ m ²]
c	Campo coercitivo
Cp	Calor específico do ar [J/Kgk]
Ds	Diâmetro do ventilador [m]
G	Parâmetro de ajuste das distâncias entre ventilador e núcleo
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
Gr	Número de Grashof
H	Força magnética externa [AT/m]
H_v	Distância entre o ventilador e o núcleo [m]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção natural [W/m ² K]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção para lateral do enrolamento [W/m ² K]
h_f	Coefficiente de transferência de calor por convecção forçada nos enrolamentos [W/m ² K]
h_i	Coefficiente de transferência de calor por convecção na parte inferior do ferro silício [W/m ² K]
h_l	Coefficiente de transferência de calor por convecção para lateral do ferro silício [W/m ² K]
h_s	Coefficiente de transferência de calor por convecção para superfície do ferro silício [W/m ² K]
\bar{h}	Coefficiente médio de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
I	Corrente elétrica que circula nos enrolamentos [A]
k	Condutividade térmica do ar [W/mK]

L_c	Comprimento característico no núcleo para convecção natural [m]
L_f	Comprimento característico no núcleo para convecção forçada [m]
Nu	Número de Nusselt
Nu_c	Número de Nusselt para lateral dos enrolamentos
Nu_f	Número de Nusselt para convecção forçada nos enrolamentos
Nu_i	Número de Nusselt para parte inferior da peça de ferro silício
Nu_l	Número de Nusselt para lateral da peça de ferro silício
Nu_s	Número de Nusselt para parte superior da peça de ferro silício
Pr	Número de Prandtl
\dot{q}	Taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume [W/m^3]
\dot{q}_{conv}	Taxa de calor transferida do núcleo por convecção [W]
\dot{q}_{rad}	Taxa de calor transferida do núcleo por radiação [W]
\dot{q}_{ger}	Taxa de calor gerada no núcleo pelas perdas elétricas [W]
$\dot{q}_{termico}$	Taxa de transferência de calor por radiação e convecção [W]
r	Raio do enrolamento [m]
R	Resistência elétrica do enrolamento [Ohms]
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds
t	Tempo
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
$T1$	Temperatura Núcleo 1 [$^{\circ}C$]
$T2$	Temperatura Núcleo 2 [$^{\circ}C$]
$T3$	Temperatura Núcleo 3 [$^{\circ}C$]
$T4$	Temperatura da Superfície do Núcleo 2 [$^{\circ}C$]
T_s	Temperatura de superfície [$^{\circ}C$]
T_{∞}	Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

V	Tensão [volts]
V_s	Velocidade do fluxo de ar gerado pelos ventiladores [m/s]

Letras Gregas

α	Difusividade térmica [m^2/s]
β	Coeficiente de expansão volumétrico [$1/\text{K}$]
ε	Emissividade
η	Direção normal
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]

Abreviatura de Siglas

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CERIN	Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
COMSOL	<i>COMSOL Multiphysics Software</i>
FEM	Força Eletro-Motriz
HP	<i>Horse Power</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ITS-90	<i>International Temperature Scale of 1990</i>
LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench Software</i>
LabTC	Laboratório de Transferência de Calor
MATLAB	<i>Matrix Laboratory Software</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RCA	<i>Root Cause Analysis</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
WEG	Abreviatura de Werner, Eggon e Geraldo
Y-Y	Esquema de ligação dos núcleos do transformador em Y

Sumário

1 – Introdução	19
2 – Revisão Bibliográfica.....	22
2.1 – Transformadores: História, Princípio de Funcionamento, Tipos e Aplicações	22
2.1.1 – História do Transformador	22
2.1.2 – Princípio de Funcionamento	24
2.1.3 – Resfriamento de Transformadores.....	25
2.1.4 – Transformadores com montagem Shell e Núcleo Envolvido	25
2.2 – Aquecimento e Perdas em Transformadores	26
2.2.1 – Perdas no Ferro	26
2.2.1.1 – Correntes Parasitas	26
2.2.1.2 – Histerese	27
2.2.3 - Perdas no Cobre.....	29
2.2.3.1 – Efeito Joule.....	29
2.3 – Hot Spots.....	30
2.4 – Análise Experimental e Teórica da Temperatura de Transformadores	31
3 – Fundamentação Teórica	38
3.1 – Introdução	38
3.2 – Modelo Térmico	38
3.3 – Correlações Empíricas	41
3.3.1 – Convecção Natural	42
3.3.2 – Convecção Forçada	43
3.4 – Radiação	44
3.5 – Solução Numérica	45
3.6 – Vantagens da Simulação Numérica usando o COMSOL.....	49
4 – Montagem Experimental	51
4.1 – Introdução	51

4.2 – Descrição da Bancada Experimental	51
4.3 – Detalhamento dos Sensores de Temperatura.....	59
4.3.1 – Termopares.....	59
4.3.2 – Termômetros de Resistência PT100	60
4.4 – Calibração dos Sensores de Temperatura	61
4.5 – Análise Termográfica	62
4.6 – Disposição dos Sensores no Transformador.....	64
5 – Análise de Resultados.....	65
5.1 – Resultados Experimentais.....	65
5.1.1 – Testes com Carga Linear e Convecção Natural.....	67
5.1.2 – Testes com Carga Linear e Convecção Forçada.....	67
5.1.3 – Testes com Carga Não Linear e Convecção Natural.....	68
5.1.4 – Testes com Carga Não Linear e Convecção Forçada.....	69
5.2 – Análise dos Resultados Experimentais de Temperatura.....	70
5.3 – Resultados da Simulação Numérica usando o COMSOL.....	71
5.3.1 – Comparação entre Resultados Numéricos e Experimentais.....	73
5.4 – Hot Spots.....	78
6 – Conclusões	81
6.1 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	81
Apêndice A – Determinação do Coeficiente Médio de Transferência de Calor por Convecção e das Taxas de Transferência de Calor por Convecção e Radiação.....	83
Apêndice B – Geração Interna de Calor	94
7 – Referências Bibliográficas	96

1 – Introdução

Há algumas décadas a qualidade da energia elétrica (QEE) não era alvo de atenção como hoje, visto que os equipamentos robustos que eram utilizados naquela época suportavam bem as perturbações no fornecimento de energia. Hoje, com o avanço da eletrônica de potência, a natureza das cargas mudou e, além disso, os equipamentos elétricos se tornaram mais sensíveis a oscilações na qualidade da energia fornecida. Diante desse fato as preocupações com fenômenos da QEE aumentaram, uma vez que uma pequena falha no sistema elétrico de apenas um décimo de segundo pode, em face desta alta sensibilidade, levar modernos processos industriais a longas paradas. Dentro dos vários itens que identificam uma energia com perda de qualidade, as distorções harmônicas e desequilíbrios aparecem como grandes problemas que podem interferir no funcionamento dos equipamentos conectados a um sistema elétrico. A crescente utilização de cargas não lineares aumenta, de modo significativo, a distorção harmônica do sistema elétrico. A operação de transformadores neste sistema, com tensões e/ou correntes não senoidais, reduz o rendimento destes equipamentos. Transformadores supridos por tensões senoidais, quando alimentam cargas não lineares, tem seus enrolamentos percorridos por correntes distorcidas, e, deste modo há um acréscimo de perdas elétricas relativas a condição não senoidal. Com as modernas técnicas de conversão e/ou transformação de energia empregando-se, cada vez mais, dispositivos eletroeletrônicos ou semelhantes com comportamento não linear, haverá uma distorção das formas de onda de tensão e/ou corrente.

Considerando que o transformador é um dos equipamentos de maior interesse nos sistemas elétricos de potência, e que os mesmos se encontram na interface entre os sistemas de energia e as cargas não lineares, estes dispositivos podem ter seu comportamento térmico e vida útil afetados. A alteração pode ser explicada pelo fato de que a operação com tensão e/ou correntes não senoidais irá resultar num aumento da perda total, e conseqüentemente, haverá uma elevação de temperatura do transformador, implicando em uma redução drástica de sua vida útil. Dentro deste contexto, pode-se analisar a redução da vida útil e variações no comportamento térmico do transformador quando submetido a diferentes formas de carga. De posse desse comportamento da temperatura em função do tempo para cada tipo de carga (carga linear e não-linear), e, admitindo-se a temperatura ambiente constante pode-se estimar as perdas para cada situação.

Os efeitos das tensões e correntes não-senoidais podem ser analisados em dois grupos:

a) Efeitos da Distorção de Tensão nas Perdas em Vazio

Sabe-se que as perdas em vazio são provocadas pelo fluxo de magnetização produzido pela tensão aplicada no lado primário do transformador. Desta maneira, se a tensão aplicada for distorcida, ocorrerá um acréscimo das perdas no núcleo. O quanto tais perdas irão aumentar dependerá do módulo de cada harmônico de tensão associado a ordem harmônica de cada componente.

b) Efeitos da Distorção de Corrente nas Perdas em Carga

As perdas provocadas pela dissipação de energia nas resistências dos enrolamentos, bem como as perdas consequentes do fluxo de dispersão, são sensíveis às variações da corrente de carga. Desta maneira, se a corrente de carga for distorcida, mantendo-se o valor da frequência fundamental, haverá um acréscimo no seu valor eficaz devido aos harmônicos, provocando assim um aumento nas perdas. Com a presença de componentes de frequências maiores que a fundamental, outro efeito que se torna relevante é o efeito pelicular, no qual ocorre uma diminuição da área condutora do condutor e por consequência um aumento da resistência do mesmo, implicando em uma maior dissipação de energia nos enrolamentos.

Neste trabalho foi possível quantificar o fluxo de calor proveniente do núcleo do transformador e quão relevante foi o acréscimo de temperatura dado pelas perdas elétricas provenientes das correntes distorcidas. Foram utilizados dois tipos de sensores para obter maior precisão e, posteriormente, o método numérico para modelar o aquecimento do núcleo.

Apresenta-se no Capítulo 2 do trabalho a revisão bibliográfica ressaltando a história do transformador e seu princípio de funcionamento. Também são mencionados os mecanismos de perdas elétricas que fazem a temperatura do núcleo aumentar. A revisão também apresenta os *Hot Spots* (pontos de maior temperatura) e sua importância na vida útil do transformador. Além disso, também são apresentados alguns trabalhos anteriores que focaram o processo de aquecimento de transformadores e suas consequências. No Capítulo 3 é descrita a fundamentação teórica utilizada neste trabalho onde é apresentado o modelo térmico com as equações de transferência de calor envolvidas no aquecimento do transformador. Também são apresentadas as correlações empíricas utilizadas para determinação do coeficiente médio de transferência de calor por convecção. Por último, são apresentados detalhes do uso do software COMSOL e suas vantagens.

Os procedimentos da montagem experimental são descritos no Capítulo 4. Onde é apresentado o transformador de 5 Kva utilizado nos testes juntamente com as cargas elétricas e todo o processo de adequação e instalação dos equipamentos da bancada experimental. Apresentam-se também os equipamentos utilizados para aferição e calibração dos sensores. Os componentes utilizados na ventilação forçada e na análise termográfica também são apresentados. Posteriormente é mostrado o posicionamento dos sensores dentro do núcleo do transformador e suas características.

No Capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos tanto numericamente como experimentalmente. Nele pode-se encontrar resultado das evoluções temporais das temperaturas mais elevadas de cada um dos testes. Apresenta-se também uma comparação entre os resultados de temperatura experimentais e numéricos e a análise das posições dos *Hot Spots* para cada caso de carga e convecção.

No Capítulo 6 são mostradas as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Uma das grandes contribuições deste trabalho é poder determinar experimentalmente e numericamente o comportamento térmico de um transformador à seco quando submetido a cargas de natureza linear e não linear. Assim como determinar os Hot Spots no núcleo que são de fundamental importância para aplicação em projetos otimizados de refrigeração de transformadores. Também é possível ressaltar o desenvolvimento de um sistema de resfriamento forçado dentro do núcleo para análise do efeito da convecção forçada no seu resfriamento. Outro ponto importante deste trabalho é poder comparar o comportamento de 3 tipos de sensores de temperatura e avaliar sua precisão.

A vantagem da simulação numérica utilizando o programa COMSOL é a possibilidade de entender o comportamento térmico do núcleo sob efeito das cargas não lineares permitindo utilização da metodologia em transformadores de potências superiores.

2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado um histórico da utilização de transformadores, como eles surgiram e quais os princípios de funcionamento, tipos e aplicações. A seguir um cuidado especial para o aquecimento e as perdas em transformadores à seco montagem Shell, que foi usado neste trabalho. Na sequência é mostrada uma breve descrição para *Hot Spot*. Por último, apresenta-se trabalhos relacionados com análise experimental e numérica da temperatura em transformadores.

2.1 – Transformadores: História, Princípio de Funcionamento, Tipos e Aplicações.

2.1.1 – História do Transformador

No campo da eletricidade e eletromagnetismo, os primeiros passos para o desenvolvimento de uma tecnologia aplicada foram dados no início do século XIX, quando o físico Hans Christian Ørsted observou que um fio submetido a uma corrente elétrica age sobre a agulha de uma bússola. Com isso, percebeu-se que havia uma ligação entre magnetismo e eletricidade. Seguem-se as contribuições, dentre outros, de Michael Faraday e Alessandro Volta com a descoberta da pilha voltaica; André-Marie Ampère e Joseph Henry que descobriram que a corrente elétrica é induzida por mudanças no campo magnético.

As aplicações práticas do eletromagnetismo começaram a aparecer durante o século XIX, quando Samuel Morse construiu o seu primeiro aparelho em 1843, dando origem ao famoso código Morse, Graham Bell realizou a primeira experiência de transmissão a distância da voz humana em 1876 e Émile Baudot apresentou o telégrafo impressor em 1878.

O transporte de energia à distância, realizado pela primeira vez em 1873, sofreu um enorme desenvolvimento a partir de 1884 com a invenção do transformador.

As cargas dos sistemas de distribuição aumentaram quando Galileo Ferraris estudou as correntes polifásicas e Nikola Tesla concebeu o motor de campo girante ou de indução em 1885. No fim do século XIX, iniciou-se a construção das primeiras centrais hidrelétricas, necessárias depois da invenção da lâmpada incandescente com filamento de carvão de Thomas Edison em 1882, mais tarde substituído pelo tungstênio em 1904 (ROSITO, 2009).

Por volta de 1876, não se sabia como transmitir a energia elétrica gerada. A evolução dos conceitos sobre sistemas de potência foi definida pela conhecida Guerra das Correntes travada por Thomas Edison e George Westinghouse Jr. Em 1880, Thomas Edison apresenta sua lâmpada incandescente, em corrente contínua, que seria então, a mais eficiente. Nessa época, na Europa,

havia avanços na utilização de corrente alternada. Em 1882, Thomas Edison também coloca em funcionamento um sistema de corrente contínua em Nova York e funda a empresa Edison Electric Company. Em 1885, George Westinghouse Jr. compra os direitos da patente de Goulard-Gibbs para construir transformadores de corrente alternada e encarrega William Stanley dessa tarefa. Stanley desenvolveu o primeiro modelo comercial do que, naquele momento, nomeou-se de transformador (Fig. 2.1), (ROSITO, 2009).

O transformador possibilitava a elevação das tensões, devido à corrente alternada, ao contrário da corrente contínua, diminuindo as perdas na transmissão de energia elétrica.

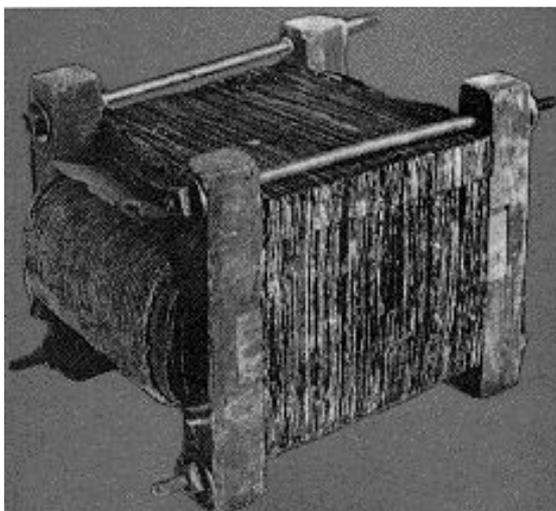


Figura 2.1: Transformador de William Stanley (ROSITO, 2009).

Um desenvolvimento fundamental para a definição das aplicações de energia elétrica se dá quando Nikola Tesla mostrou a possibilidade de se desenvolver um motor de corrente alternada. Westinghouse comprou a patente de Tesla e contratou seus serviços para desenvolver o motor, que só ficaria pronto em 1892, ano em que entra em funcionamento o primeiro motor de indução de Tesla. A comissão responsável pela concorrência pública para a licitação das obras de Niagara Falls, importante obra que definiria as bases do sistema elétrico de potência, decide que o sistema será em corrente alternada. Enquanto isso, na Alemanha, é colocado em funcionamento um sistema de 100 HP (74,6 kW) com transmissão de 160 Km, em corrente alternada, 30.000 V. A empresa Edison General Electric Company, juntou-se à Thomson-Houston, formando a General Electric que passou a produzir em larga escala transformadores e alternadores. Dali em diante, as transformações não estariam somente no âmbito técnico, mas também influenciariam o comportamento social.

2.1.2 – Princípio de Funcionamento

O transformador é um equipamento utilizado para redução ou aumento de tensão. Segundo esta aplicabilidade, ele pode ser definido como transformador abaixador ou elevador (de tensão). É constituído normalmente de um enrolamento primário (em que se aplica a tensão de entrada), um enrolamento secundário (em que se obtém a tensão de saída desejada) e um caminho otimizado para o fluxo magnético, que é o grande responsável pela transformação.

O funcionamento do transformador baseia-se nos fundamentos do eletromagnetismo, especialmente os estudados por Faraday e Lenz. Constata-se que, ao movimentar um campo magnético diante de um condutor, surge uma corrente induzida. Em outras palavras, um campo magnético variável produz um fluxo magnético variável, que é responsável pela corrente induzida. A razão entre o número de voltas das espiras, é inversamente proporcional à razão de correntes (JORDÃO, 1969).

Observando-se que os enrolamentos, primário e secundário são duas bobinas com núcleo comum, ao alimentar o primário ou o secundário com sua respectiva tensão nominal, tem-se um fluxo magnético no núcleo de ferro. Na Figura 2.2 é exemplificada a indução magnética no núcleo pela passagem de corrente nos enrolamentos. Este núcleo tem geometria definida para um fluxo cíclico, para que assim não tenha saída de linhas de campo magnético devido às bordas, e para que este campo se mantenha no centro do núcleo. Se a fonte utilizada para a alimentação do primário, por exemplo, for de corrente contínua, não irá ocorrer uma transformação de tensão constante no secundário, pois o fluxo magnético gerado pela corrente contínua não é variável ao longo do tempo.

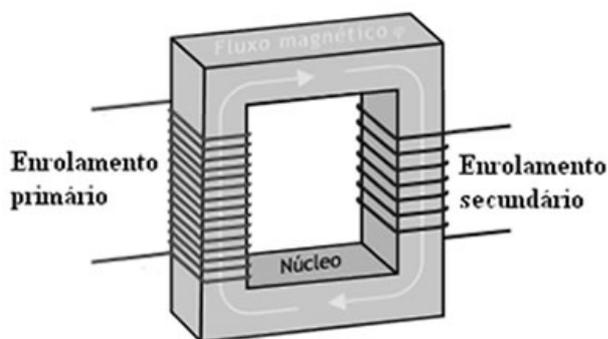


Figura 2.2: Princípio de Funcionamento do Núcleo (JORDÃO,1969).

Os transformadores atuais têm os mais diversos tamanhos e formatos dependendo de seu uso, como por exemplo, nas instalações elétricas e também em equipamentos eletroeletrônicos.

É importante, tanto para a segurança quanto para a eficiência dos aparelhos elétricos, que a tensão que sai da usina geradora de energia elétrica e a tensão que chega até as residências sejam relativamente baixas. Mas, por outro lado, para que a transmissão em longas distâncias seja mais eficiente, são necessárias correntes baixas e tensões altas, para tanto são utilizados os transformadores.

A potência nominal do transformador é diretamente proporcional à geração de calor por perdas, e se esse calor não for dissipado corretamente, a temperatura do transformador irá subir continuamente, o que pode causar danos no isolamento sólido e isolamento líquido do transformador. Por isso, é essencial manter a temperatura dentro do limite admissível para assegurar a vida útil do transformador, reduzindo a degradação térmica do seu sistema de isolamento. Em transformadores de alta potência, por exemplo 100 kVA ou mais, utiliza-se o sistema de refrigeração externo para acelerar a taxa de dissipação do calor.

2.1.3 – Resfriamento de Transformadores

Existem diferentes sistemas de resfriamento para transformadores dependendo de sua potência e tecnologia de fabricação. O resfriamento pode ser à seco ou à óleo com ventilação forçada ou natural. O transformador utilizado nos testes apresenta um núcleo composto de fios de cobre revestidos com resina, papel isolante e ferro silício. Por padrão, seu resfriamento é feito apenas por convecção natural dentro do tanque, que possui algumas frestas de ventilação. Este sistema apresenta uma taxa de transferência de calor limitada se comparado a transformadores refrigerados a óleo, porém a questão ambiental do descarte do óleo é um agravante de seu uso e contribui para maiores investimentos no resfriamento à seco. Transformadores à seco com núcleo de resina epóxi são mais ecológicos e podem suportar potências de até 20000 kVA (Manual de Transformadores à Seco WEG, 2010. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEGmanualdetransformadoressecos1000064775809.1manualportuguesbr.pdf>>. Acesso em: 27 janeiro 2017).

2.1.4 – Transformadores de Núcleo Envolvido

Um transformador de potência de núcleo envolvido (Figura 2.3), é chamado assim devido a montagem dos enrolamentos ser de forma concêntrica. Na Figura 2.3-b pode-se observar que o enrolamento primário AT envolve o enrolamento secundário BT. As bobinas cilíndricas são de pequena espessura mas grande superfície, e isoladas entre si por cartão com réguas e calços que permitem o resfriamento. O material condutor nos enrolamentos é o cobre, e o as dimensões do

enrolamento dependem da potência e tensão do a qual ele será submetido (SANTOS, 2011). O transformador que foi utilizado neste trabalho, tem núcleos compostos de chapas superpostas de liga de aço silício, as bobinas concêntricas são constituídas de fios de cobre revestidos por uma combinação de materiais isolantes como papel, vernizes e resinas. O tanque é construído em aço revestido por pintura eletrostática.

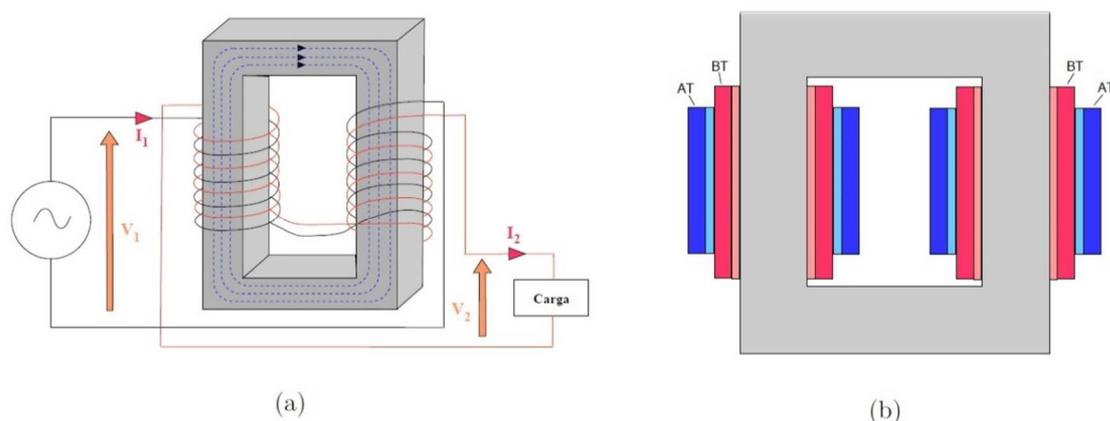


Figura 2.3 - Transformador núcleo envolvido: (a) construção; (b) diagrama em corte (SANTOS, 2011).

2.2 – Aquecimento e Perdas em Transformadores de Núcleo Envolvido

Nos transformadores de núcleo envolvido, a maior parcela de perdas está presente no enrolamento e no núcleo, devido ao fato de que nestes locais ocorrem fenômenos causados pelo fluxo magnético e pela circulação de corrente, as perdas no núcleo são denominadas perdas no ferro, e as perdas no enrolamento são chamadas de perdas no cobre.

2.2.1 – Perdas no Ferro

2.2.1.1 – Correntes Parasitas

Como o ferro e o aço são bons condutores, o núcleo está sujeito a ter correntes induzidas quando submetido a um campo magnético. Tais correntes são chamadas de correntes parasitas ou correntes de Foucault. Quando uma corrente alternada está fluindo pelo enrolamento, um campo magnético variável surge no núcleo. A variação desse campo, aumentando e diminuindo, induz uma tensão no núcleo e essa força eletromotriz causa a circulação de correntes parasitas. A minimização das correntes de Foucault é conseguida substituindo o núcleo compacto por um

conjunto de lâminas ou chapas metálicas. As lâminas são revestidas com um verniz isolador, de modo que não haja passagem de corrente de uma para outra. Assim, qualquer corrente parasita produzida fica restrita a uma única lâmina de metal. Devido à área seccional de cada chapa ser muito pequena, as resistências individuais são relativamente elevadas. Isso mantém a amplitude das correntes de Foucault baixa e a perda em potência muito menor (STEGEMANN, 1990).

2.2.1.2 – Histerese

Histerese é o fenômeno causador do atraso entre a densidade de fluxo e o campo magnético. Por ser um evento cíclico apresentado num gráfico $B \times H$ (Densidade de Fluxo versus Campo Magnético), tem-se também o Ciclo de Histerese.

Quando um material, no caso do transformador, é um meio ferromagnético, for magnetizado a um ponto máximo e em seguida o mesmo for diminuído, a densidade do fluxo não acompanhará o decrescimento do campo. Assim quando o campo for nulo, o material pode apresentar certa quantidade de densidade de fluxo, chamada de remanescente.

Para anular essa densidade ainda presente no material é necessária a aplicação de um campo magnético contrário (negativo), uma força coerciva. Se esse campo for mantido até sua saturação e depois o aumentando a zero, apresentará novamente uma densidade de fluxo remanescente, porém desta vez negativa, que por sua vez necessitará de um campo positivo para voltar a zero. Na Figura 2.4 estão ilustrados os pontos de saturação de campo magnético a e b , a distância de d para a é a coercividade c , e B a densidade de fluxo remanescente.

A Curva de Histerese é feita a partir da ligação dos pontos máximos, extremidades, dos grupos de ciclos de histerese, como mostra a Figura 2.4. Essa curva é utilizada como base para o procedimento de cálculo em uma eventual aplicação de máquinas elétricas que em seu princípio de funcionamento implicam a interação de um campo magnético (DEL TORO E MARTINS, 1999).

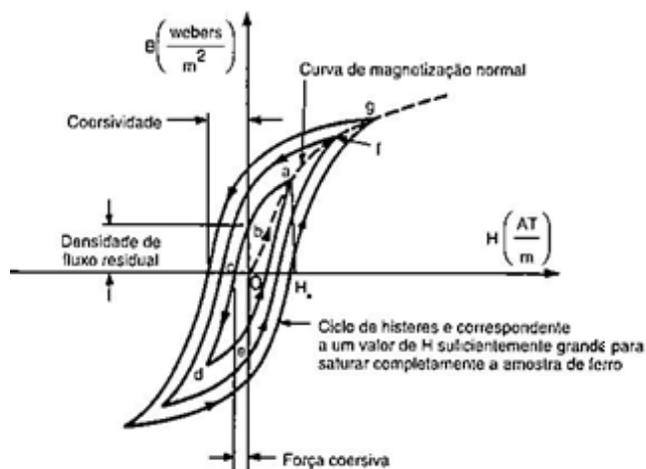


Figura 2.4 - Curva de Histerese (DEL TORO E MARTINS, 1999).

Em um transformador, de acordo com o sentido de corrente alternada fornecida pela concessionária de energia, o campo magnético acaba agindo de forma alternada (Lei de Faraday), ou seja, ora positivo e ora negativo passando por zero. Essa alternância no campo magnético faz com que os domínios magnéticos, intrínsecos do material, se alinhem de acordo com o sentido do mesmo, alternadamente. Na Figura 2.5a é possível observar a organização aleatória dos domínios de um material desmagnetizado, já na Figura 2.5b apresenta-se o arranjo dos domínios quando sob influência de uma força magnética externa (H).

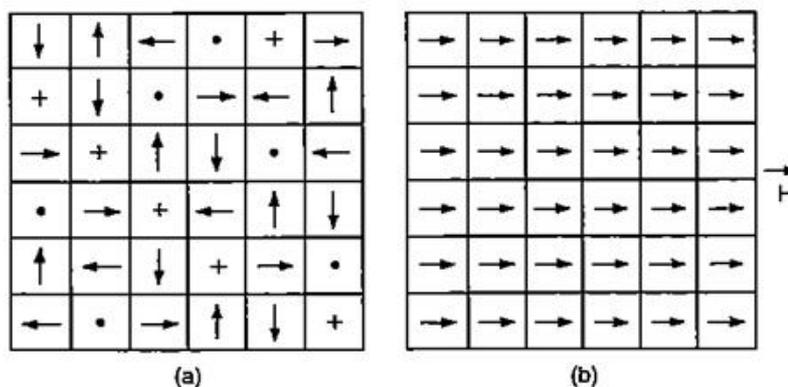


Figura 2.5 - Domínios magnéticos (a) aleatórios e (b) organizados (DEL TORO E MARTINS, 1999).

A perda por histerese está na dissipação de calor ocasionada pela rotação dos domínios. Ao inverter sua orientação, os domínios precisam superar forças contrárias como o atrito e a

inércia, esse movimento de giro faz com que os elétrons do material dissipem uma quantidade de potência na forma de calor e efeito Joule.

Em alguns materiais a perda por correntes parasitas pode ser bastante significativa, como no ferro doce, muito utilizado nos primeiros transformadores, é um metal com alto índice de pureza capaz de conduzir o magnetismo. As perdas ainda estão relacionadas à frequência do sinal, quando maior a frequência ocorrem mais perdas por histerese. Mas ao utilizar materiais como ligas de ferro silício comumente utilizadas em transformadores de alta potência essas perdas são reduzidas, justificada pela facilidade dos domínios ao se alinharem com o campo.

Assim, a análise da Curva de Histerese é muito importante para desenvolvimento de equipamentos eletromagnéticos a partir do material que for utilizado para sua construção (DEL TORO E MARTINS, 1999).

2.2.3 - Perdas no Cobre

2.2.3.1 – Efeito Joule

Um outro tipo de dissipação indesejada de potência, nos transformadores, ocorre nos enrolamentos primário e secundário do dispositivo, como esses são constituídos de fios de cobre, a este problema dá-se o nome de perdas no cobre. Trata-se da dissipação de potência na forma de calor por efeito Joule, que ocorre quando há corrente circulando pelos enrolamentos. Essa perda é determinada pela equação: $P = RI^2$, onde R é a resistência elétrica do cobre e I é a corrente que passa por ele. Um recurso para diminuir a perda no cobre é o aumento da espessura dos fios usados nos enrolamentos, ou procurar manter a corrente no transformador no valor mais baixo possível.

O calor gerado pelas perdas pode causar a degradação térmica do material isolante e, portanto, é fácil observar que, quanto mais eficientemente este calor for removido maior será a vida útil do sistema transformador.

As perdas em transformadores são ainda maiores na presença de correntes harmônicas (não lineares), portanto, um transformador sob esta condição de carga apresenta um aquecimento acima do previsto em projeto, podendo comprometer seu isolamento e sua vida útil (GUIMARÃES, 2006). O aquecimento excessivo de transformadores reduz sua vida útil de forma significativa devido ao envelhecimento do isolamento do enrolamento, uma vez que, a temperatura máxima sobe de 5 a 20 ° C. Como o custo de transformadores de alta potência é

muito elevado, procura-se prolongar ao máximo sua vida útil (GRADNIK et al. 2011), existe assim uma relação direta do aquecimento interno com a redução dos custos operacionais.

O clima também interfere na continuidade da operação dos transformadores, em comparação ao Japão, Estados Unidos e Brasil, a Europa tem condições climáticas mais favoráveis a operação ininterrupta destes equipamentos.

Para investigar os acréscimos de temperatura de um transformador a seco sob condições não ideais de suprimento e carregamento, propõe-se, um modelo térmico monofásico, onde o transformador é visto como sendo um corpo homogêneo. Neste sentido, tem-se o modelo térmico clássico. Tal estratégia permite avaliar a elevação da temperatura do enrolamento em relação a temperatura ambiente. Constata-se que a elevação da temperatura do enrolamento é consequência da transferência de calor gerado internamente (CAMARGO et al. 2006).

2.3 – Hot Spots

Sabe-se que as perdas nos enrolamentos causam um acréscimo de temperatura no núcleo. No entanto, este aumento não é uniforme, gerando regiões com temperaturas variadas, assim, os pontos de maior temperatura chamados de *Hot Spots* serão o fator limitante para a manutenção da vida útil do equipamento. Estes pontos encontram-se em geral perto da parte superior do núcleo do transformador, onde estão as temperaturas mais elevadas como mostrado na Figura 2.6, e a sua localização é pouco acessível para medições utilizando os métodos existentes, atualmente estão sendo testadas medições com o auxílio de fibras ópticas (SUSA, 2005).

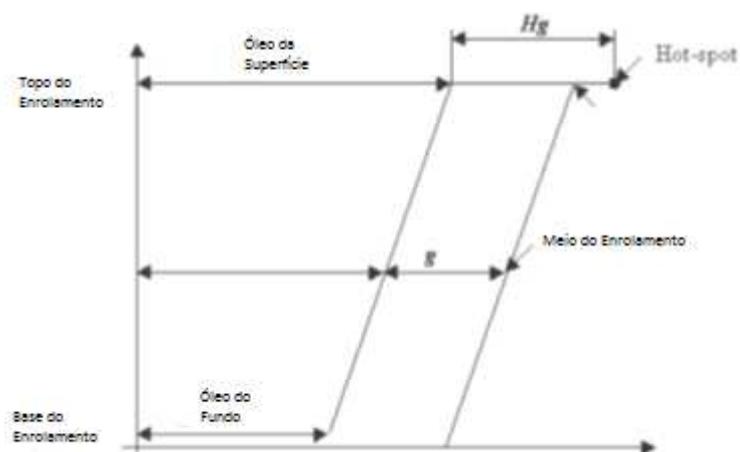


Figura 2.6 - Diagrama térmico de um transformador apresentando a distribuição de temperatura ao longo da altura do enrolamento e no interior dos canais de óleo (SUSA, 2005).

2.4 – Análise Experimental e Teórica da Temperatura de Transformadores

A partir da determinação do tipo de carga aplicada a um transformador a seco, pode-se analisar seu comportamento térmico utilizando sensores de temperatura colocados diretamente no núcleo. Através do posicionamento destes sensores pode-se determinar os pontos de maior aquecimento do transformador para uma possível modelagem computacional. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no campo científico, com o intuito de resolver equações de transferência de calor e conseqüentemente aplicá-las a modelagem e análise de problemas térmicos em Engenharia. Uma das formas de se tratar um modelo térmico consiste em uma formulação que considera a fonte de calor conhecida e se busca determinar os campos térmicos a partir da solução da equação da difusão, seja por métodos analíticos ou por métodos numéricos. De acordo com a literatura, dá-se a essa metodologia o nome de problema direto de transferência de calor. O problema direto é classificado matematicamente como um problema “bem posto” visto que esse problema satisfaz três requisitos essenciais que são: a existência de solução (existe no mínimo uma solução); a unicidade, isto é, uma solução única fixada as condições específicas; e a estabilidade com relação a pequenas variações.

Pierce (1994) propôs um modelo matemático para prever *Hot Spots* em transformadores a seco. Dados de seis testes em um protótipo de 2500 Kva foram utilizados para refinar o modelo. Uma correlação para o coeficiente de transferência de calor local por convecção nos canais de refrigeração foi desenvolvida. O modelo foi utilizado para estudar o efeito de vários parâmetros com relação ao ponto mais quente do enrolamento conforme a temperatura aumenta. O número de camadas condutoras, espessura do isolamento e comprimento do condutor foram definidos para ter menor influência na relação. Os resultados com base no modelo matemático baseadas em dados de teste confirmaram que os locais críticos de *Hot Spots* definidos pelos padrões do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) deveriam ser revistos para transformadores tipo seco acima de 500 Kva.

Segundo o trabalho de Susa (2005) um dos parâmetros mais importantes que regem a expectativa de vida de um transformador refrigerado a óleo, é o valor da temperatura do *Hot Spot*. Os modelos utilizados neste trabalho baseiam-se na teoria da transferência de calor, a aplicação do método da capacitância global, a analogia elétrica e térmica e uma nova definição de resistências térmicas não lineares em diferentes locais dentro de um transformador de potência. Os métodos apresentados neste trabalho levaram em conta alterações da viscosidade do óleo e perda devido a variação da temperatura. As mudanças das constantes de tempo em

transformadores devido a mudanças na viscosidade do óleo também são contabilizados nos modelos térmicos. Além disso, as equações foram utilizadas para estimar as capacitâncias térmicas equivalentes do óleo do transformador para diferentes modelos de transformadores e circulações de óleo de enrolamento. Os modelos foram validados utilizando os resultados experimentais, os quais foram obtidos a partir de uma série de testes térmicos realizados numa gama de transformadores de potência. A maioria das unidades ensaiadas foi equipada com sensores de fibra óptica nos enrolamentos principais. Algumas delas também possuíam termopares no núcleo e em partes estruturais.

Rahimpour e Azizian (2007) analisaram o comportamento térmico de transformadores tipo Cast Resin (resina epóxi) de 800 Kva. Estes transformadores são refrigerados a ar, mas não possuem tanque, apenas uma resina que protege os enrolamentos que têm um formato próximo ao de um cilindro. Para verificar o comportamento térmico, utilizaram modelagem numérica com o método das diferenças finitas, e compararam com os resultados obtidos na análise experimental. Na análise experimental, utilizou um Periscópio Infravermelho para avaliar a temperatura média superficial do transformador, porém não pôde verificar os *Hot Spots* experimentalmente, apenas pelo método teórico. Os resultados obtidos foram satisfatórios ao se comparar os métodos utilizados, e também ao compará-los com as temperaturas médias com as fornecidas pelo International Electrical Committee (IEC). As pequenas variações entre temperaturas experimentais e teóricas foram atribuídas aos erros experimentais que ocorreram devido a precisão das condições ambientes laboratoriais. Estes erros também ocorreram devido a interferências magnéticas que causam variação de temperatura no Periscópio. Erros de modelagem também ocorreram por algumas operações computacionais e estimativas, assim como erros devido ao limitado número de nós utilizados. A modelagem matemática teve como base um cilindro simétrico para simplificar a geometria do núcleo, e o subdividiu em quatro áreas em termos de transferência de calor que são: enrolamentos, superfície externa, espaços internos e topo. Para resolver a equação bidimensional da transferência de calor em coordenadas cilíndricas, foi utilizada a lei da conservação de energia aplicada ao método de diferenças finitas. As perdas foram consideradas nos enrolamentos (efeito Joule) e correntes parasitas. Os efeitos de interferência na precisão como, espaços internos com ar, transferência de calor para superfície e *dog-bones* foram caracterizados por significância.

Assembleia (2009) apresentou uma modelagem matemática para simular o escoamento e transferência de calor em transformadores de potência, com base no modelo de redes. Foram realizados estudos sobre o fator de atrito utilizando simulações em CFD para resolver um

problema de convergência no escoamento apresentado por uma modelagem já existente. Como resultado destes estudos, foram obtidas novas correlações que foram posteriormente implementadas na modelagem, juntamente com a inclusão de fenômenos de escoamento que também não eram contemplados pela metodologia existente. Devido a estas descobertas foi necessário realizar uma reformulação dos modelos utilizados, e depois comparados os resultados obtidos pela modelagem matemática com resultados obtidos por simulação CFD, previamente validada, para o enrolamento do transformador estudado. A modelagem desenvolvida apresentou um bom grau de aproximação com os resultados obtidos por CFD e apresenta um tempo de simulação significativamente menor que o obtido em simulação CFD (minutos em vez de horas ou dias).

Este trabalho permitiu também encontrar novas considerações para os modelos de escoamento e de transferência de calor utilizados, que nunca foram considerados nos modelos previamente criados. A reformulação do código base da ferramenta de simulação, realizada ao longo do trabalho, também permitiu prepará-la para a simulação de outros enrolamentos do transformador com características geométricas diferentes e potencialmente diferentes comportamentos a nível de escoamento e transferência de calor.

Bechara (2010) relacionou e descreveu os principais modos de falha normalmente verificados em transformadores, associados a um levantamento estatístico que compõe um banco de dados elaborado a partir de perícias realizadas entre os anos de 2000 e 2008 para companhias seguradoras. Apresentou também uma análise de falhas verificadas em cem transformadores com diferentes tipos de aplicação, classes de tensão e níveis de potência. Com relação aos danos constatados em transformadores de subtransmissão, verifica-se na Figura 2.7 que as bobinas (enrolamentos) apresentam a parcela mais expressiva de danos, sendo afetadas em praticamente 75% das ocorrências.

Análises térmicas também podem ser feitas através de câmeras termográficas como a utilizada por Sguaçabia et al. (2011) para verificação da temperatura de operação de um transformador a seco e comparação com a temperatura registrada no medidor de temperatura instalado no equipamento. Durante o período de um ciclo de carga de 24 horas foi atingido o regime estacionário e ficou evidenciado que um grande aquecimento provinha do núcleo do transformador. Foram monitoradas também a temperatura ambiente e a temperatura do transformador, através de um termômetro instalado dentro da sala e do medidor de temperatura do transformador. A temperatura ambiente média registrada durante o período de medição foi de 25,38 °C, enquanto que a temperatura média do transformador indicada no medidor de

temperatura do transformador foi de 159,9°C. Também foram monitoradas a potência, as tensões e as correntes nas três fases, bem como, a distorção harmônica total (THD) e o espectro harmônico nas correntes e nas tensões.

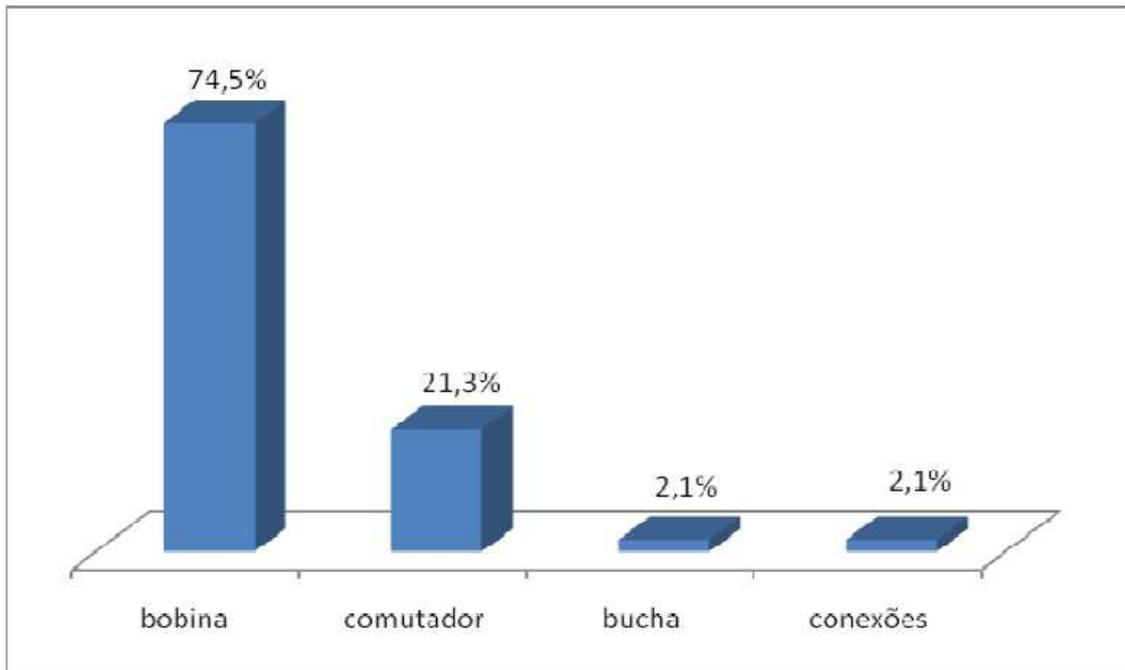


Figura 2.7: Componentes mais afetados por falhas em transformadores de subtransmissão (BECHARA, 2010).

Tsili et al. (2011) utilizaram o método de elementos finitos para obter uma solução conjunta de transferência de calor e dinâmica dos fluidos, afim de determinar o comportamento do óleo utilizado dentro de um transformador. Tsili et al. (2011) modelaram transformadores de 400 Kva e de 160 Kva, o fluxo de calor gerado no núcleo pelas perdas elétricas nos enrolamentos, foi considerado fixo, mas não foram incluídos efeitos de correntes parasitas. Assim, aplicando a equações tridimensionais e relativas condições de contorno de convecção natural com o óleo, obteve-se a distribuição de temperatura no núcleo. Também foi possível obter os pontos de maior temperatura nos enrolamentos, que serão considerados para fixação dos sensores deste trabalho. Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo tridimensional avançado de elementos finitos para a solução acoplada de transferência de calor e equações de fluxo de fluido que regem o desempenho térmico do transformador. As principais vantagens do método indicam que, não há necessidade de predefinir os coeficientes de convecção nas interfaces entre as paredes em contato do tanque e o óleo de circulação. Também a representação detalhada de partes

específicas do transformador que desempenham um papel importante na representação exata do fluxo de óleo e dissipação de calor (como dutos sinuosos de refrigeração e de painéis de papelão ondulado no tanque), através de um processo de projeto automatizado, melhorando a precisão do modelo com a menor carga computacional possível, e a definição precisa das fontes de calor no transformador (núcleo e perda nos enrolamentos). A metodologia proposta forneceu uma ferramenta integrada para simulação térmica, capaz de prever a distribuição térmica detalhada em um transformador específico, sem a necessidade de conhecimento prévio de valores nodais de temperatura ou gradiente de temperatura.

Madzarevic et al. (2011) apresentaram alguns modelos térmicos para simular o comportamento térmico de diferentes tipos de transformadores. Segundo os autores, o calor dissipado é sempre um problema em transformadores, especialmente em grandes transformadores, utilizando modelos físicos e matemáticos juntos, foi possível obter o desenvolvimento de um sistema ao mesmo tempo preciso e simples de implementar. O material, a geometria do modelo, e os coeficientes de transferência de calor para cada superfície são apresentados como os valores de entrada. Para resultados mais precisos das distribuições de temperatura, foi necessário o valor exato dos coeficientes de transferência de calor. No entanto, estes podem ser otimizados para resolver a equação de campo de fluxo, utilizando quaisquer meios, ou seja, métodos numéricos e métodos analíticos. O desempenho dos modelos foi comparado utilizando métodos analíticos e experimentais. Softwares como CAD ou outros modos de aplicação de física fundamental proporcionaram vários benefícios: redução dos custos para a concepção de um novo dispositivo, a redução do número de protótipos, a redução do preço, a simplificação do processo de manufatura e aumento da performance técnica.

Gouda, Amer e Salem (2012) tiveram como objetivo apresentar os *Hot Spots* e modelar a temperatura máxima atingida pelo óleo na parte superior do tanque assim como o aumento da temperatura local em relação a temperatura ambiente, sugerindo um modelo térmico para cargas lineares e não-lineares. Para os cálculos de temperatura do modelo térmico dinâmico, foi utilizado o software MATLAB. Como resultado foram calculados os *Hot Spots*, temperatura máxima do óleo e redução da vida útil sob cargas harmônicas.

A análise de aquecimento de transformadores a seco de Lino et al. (2013) que utilizou termômetros de resistência do tipo PT100, e o software LabView para análise de dados, mostrou que existe realmente uma variação significativa na temperatura do núcleo quando se utiliza cargas não lineares em relação às cargas lineares. O aquecimento proporcionado pela carga não-

linear alimentada ficou em torno de 3%, simbolizando um acréscimo de perdas irrisório. Segundo Lino et al. (2013), transformadores são fabricados para uma potência nominal de funcionamento a uma dada temperatura ambiente. Se tal temperatura for diminuída, os transformadores são naturalmente capazes de admitir uma sobrecarga. Desta forma, dependendo das especificações dos equipamentos seria possível obter uma sobrecarga suficiente para a alimentação de cargas não lineares através da instalação de sistemas de ventilação forçada e até mesmo através da instalação de aparelhos de ar condicionado no ambiente de operação do mesmo. Os enrolamentos dos transformadores são projetados para suportar determinadas elevações de temperatura, existem diversas classes de enrolamentos dependendo da temperatura atingida. Desta maneira, também dependendo das características dos equipamentos pode-se projetar um transformador para uma classe de isolamento térmico maior, de forma a compensar o aumento de temperatura, sem que haja necessidade do aumento da potência nominal do transformador.

Barroso (2014) utilizou o COMSOL Multiphysics para simular o aquecimento do núcleo isolado de um transformador. Este trabalho apresentou uma aplicação do COMSOL Multiphysics no estudo da distribuição de temperatura de um transformador trifásico de 5 kVA resfriado a ar. Um modelo tridimensional estacionário da equação da condução de calor foi utilizado nas simulações. A interface com o ar circundante foi modelada pela Lei de resfriamento de Newton, descartando-se a necessidade de resolver o fluxo de ar externo. Os resultados das simulações apresentaram boa concordância com as medidas experimentais com uma margem de erro de 2 a 3°C com um tempo reduzido de simulação. Foi simulado o aquecimento da parte de ferro magnético do núcleo devido à grande densidade de fluxo magnético que age sobre ele. Os resultados experimentais foram obtidos com a colocação de 6 sensores com sensibilidade de 1°C no núcleo e obteve erro de 4,8% em relação as temperaturas calculadas numericamente.

No trabalho de Murugan e Ramasamy (2015) foram analisadas falhas de transformadores de potência e suas causas sistematicamente investigadas com base em 196 casos entre os anos de 2009 e 2013. A análise de falha foi conduzida em duas frentes. Inicialmente em relação ao nível de tensão, zona geográfica e componentes de energia do transformador realizada com base em uma análise estatística. Em segundo lugar, e mais significativo, foram identificados os fatores que causam falhas de transformadores de potência por meio de análise de causa raiz (RCA). Finalmente, a manutenção prática atual foi revista e um planejamento de manutenção efetiva foi proposto, a fim de impedir estas falhas e para manter os transformadores de potência em boas condições de funcionamento durante o seu ciclo de vida.

Percebe-se que existem muitos fatores relacionados ao aquecimento de transformadores à seco, porém a determinação da temperatura com precisão em pontos estratégicos no núcleo do mesmo, pode ser a ferramenta fundamental para projetos otimizados que venham a atender a demanda atual de cargas distorcidas com segurança, e sem redução da vida útil, esta pesquisa também será útil para evitar a necessidade de projetos superdimensionados reduzindo os custos de fabricação.

3 - Fundamentação Teórica

3.1 - Introdução

Neste Capítulo é apresentado o modelo térmico que descreve o núcleo do transformador que é composto basicamente por enrolamento de cobre, papel isolante e ferro magnético. A seguir as correlações empíricas da literatura usadas para a obtenção do coeficiente médio de transferência de calor são apresentadas. Apresenta-se também os testes realizados para definição do tipo de malha e número de elementos usados na simulação numérica com o programa COMSOL.

3.2 - Modelo Térmico

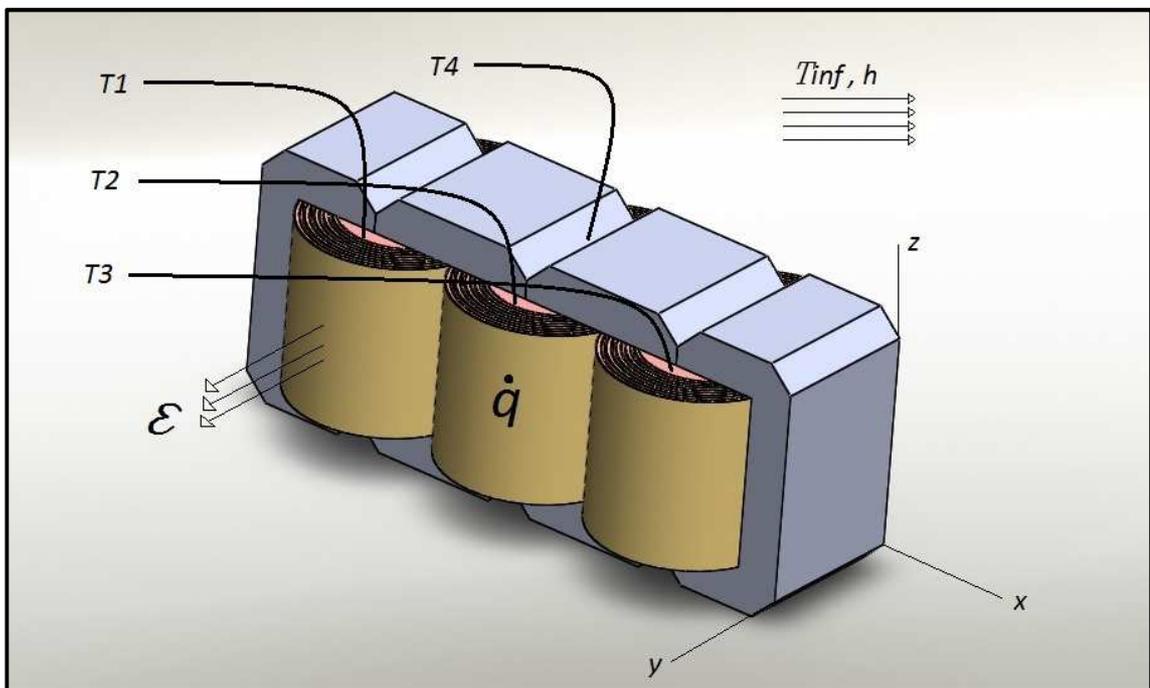


Figura 3.1 – Modelo térmico tridimensional do núcleo do transformador.

Na Figura 3.1 é apresentado o modelo térmico tridimensional do processo de aquecimento do transformador. O problema térmico induzido pelo funcionamento do transformador pode ser descrito pela equação da difusão de calor. A geração de calor foi posicionada no centro geométrico do núcleo. O modelo térmico foi resolvido numericamente para solução da equação da difusão de calor para a obtenção da distribuição tridimensional de temperaturas por todo o núcleo.

Para a obtenção da distribuição de temperatura para o modelo térmico do núcleo do transformador, a equação da difusão de calor é separada em dois tipos de geometrias. Na primeira equação considera-se a região para o núcleo de ferro com coordenadas cartesianas (região cinza na Fig 3.1) e as equações da difusão de calor para este problema transiente é dada por (Ozisik,1993):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = (\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

sendo k a condutividade térmica, ρ a massa específica, C_p o calor específico e \dot{q} a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume. Usando a hipótese de propriedades térmicas constantes com a temperatura e com a posição a Eq. (3.1) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

sendo α a difusividade térmica. Como o material utilizado é o mesmo, a hipótese de propriedades constantes para este caso é bastante pertinente.

Para a região com a forma de um cilindro (região de Cobre da Fig. 3.1) a Equação da difusão de calor em coordenadas cilíndricas com propriedades térmicas constantes é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

As condições de contorno são, convecção e radiação em todas as superfícies externas do núcleo do transformador.

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (3.4)$$

sendo T a temperatura a ser calculada, η a direção normal, σ a constante de Stefan-Boltzmann, e T_∞ a temperatura ambiente.

A condição inicial de temperatura para o modelo térmico da Fig. 3.1 é a condição de temperatura uniforme igual a T_0 em $t = 0$.

Os valores da condutividade térmica e da difusividade térmica variam de acordo com o tipo de material no núcleo que são Cobre, Papel Kraft e Ferro Silício esses valores serão mostrados posteriormente na solução numérica.

Inicialmente o conjunto do núcleo encontra-se em temperatura ambiente, e quando o sistema de carga é ligado inicia-se o aquecimento que demora em média 10 horas para atingir o regime permanente. Como já mencionado para análise térmica, são impostas duas configurações de carga, linear ou não linear, e duas configurações de resfriamento, por convecção natural e convecção forçada. A partir destas configurações foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional do conjunto do núcleo com o objetivo de comparar os resultados de temperaturas calculadas numericamente com as temperaturas medidas em pontos onde foram colocados sensores de temperatura.

Um dos principais objetivos da modelagem numérica deste problema, é que a partir dela pode-se determinar os pontos de maior temperatura (*Hot Spots*). Com a determinação com precisão do valor da temperatura destes *Hot Spots* pode-se entender melhor os problemas que acarretam o mau funcionamento do transformador devido ao excesso de temperatura. A geometria do desenho foi baseada o mais próximo possível do modelo real para garantir a maior precisão da simulação (Fig. 3.1). Os pontos T1 a T4 de acordo com a Figura 3.1 foram definidos através dos pontos que apresentaram maiores valores de temperatura conforme trabalhos anteriores (TSILI et al., 2011), (RAHIMPOUR e AZIZIAN, 2007). Ressalta-se que estas regiões foram também definidas em função do acesso para a inserção dos sensores de temperatura.

Na Figura 3.2 mostra-se em detalhe a parte de ferro silício isolada. Ela é composta de quatro partes cujos vão internos são onde os enrolamentos (Figura 3.3) se acomodam. Apresenta-se na Figura 3.4 em detalhe um dos enrolamentos onde é possível ver o papel isolante colocado entre cada camada das espiras que compõem o enrolamento.

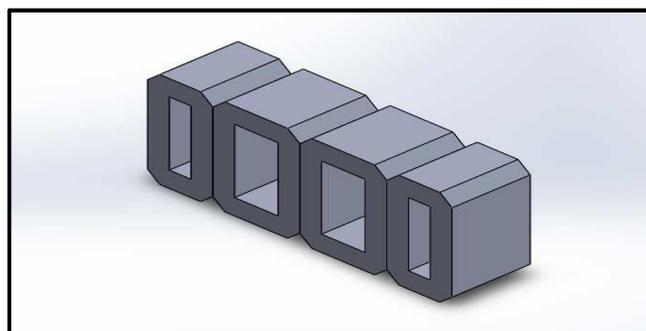


Figura 3.2: Parte de ferro silício do núcleo.

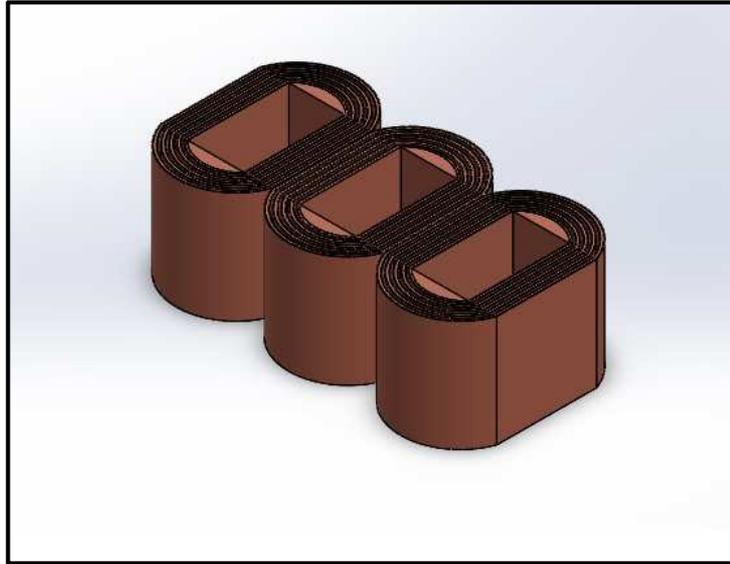


Figura 3.3 – Partes de Cobre envolto com papel.

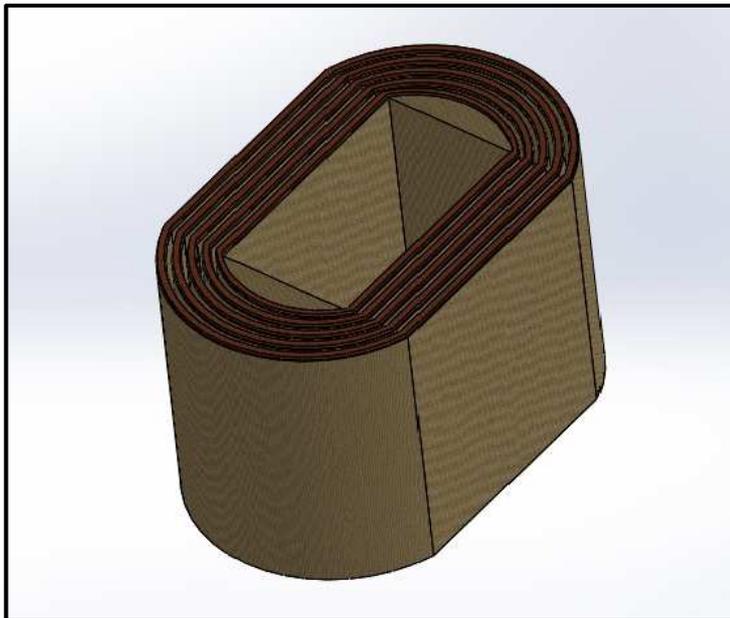


Figura 3.4: Detalhe do enrolamento de papel e cobre.

3.3 Correlações Empíricas

Como já mencionado, a perda de calor por convecção ocorre de forma natural ou forçada dependendo da configuração de ventilação forçada. Assim para o cálculo numérico do campo de temperatura é necessário conhecer os valores do coeficiente médio de transferência de calor por convecção (\bar{h}). Para isso, correlações empíricas retiradas da literatura foram usadas para a lateral e superfície do núcleo. O coeficiente de transferência de calor por convecção depende também do tipo de convecção, forçada ou natural. Assim para cada tipo de convecção existe uma

correlação empírica que permite calcular o valor desse coeficiente. A partir do valor do coeficiente de transferência de calor é possível também determinar o fluxo de calor nas superfícies desejadas.

O núcleo estudado normalmente é colocado dentro de uma caixa fechada com pequenas entradas de ar assim na condição normal de funcionamento dada em projeto ocorre apenas a convecção natural. Para fins de aprimoramento do projeto, neste trabalho foram colocados ventiladores dentro da caixa do transformador, caracterizando assim uma convecção forçada no núcleo. Como mencionado anteriormente, para simplificação dos cálculos o núcleo foi dividido em duas geometrias, o enrolamento foi analisado como um cilindro na vertical (Fig. 3.3). Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção no núcleo de ferro silício (Fig. 3.2), foi utilizada a correlação para transferência de calor sobre a superfície plana.

3.3.1 – Convecção Natural

Considerando a peça de ferro silício que compõe o núcleo (Fig. 3.2) a correlação empírica para determinar o \bar{h} na condição de convecção natural foi a mesma utilizada por Barroso (2014). Para determinar o \bar{h} é necessário encontrar o número de Nusselt para as regiões horizontais e verticais da superfície externa da peça. Primeiramente é determinado o Nu_L para placa plana vertical (lateral da peça) em seguida o Nu_s e Nu_i para as superfícies planas horizontais superior e inferior da peça, respectivamente. Assim serão encontrados os valores para \bar{h}_L , \bar{h}_s e \bar{h}_i . Com as variáveis ajustadas para a temperatura ambiente em que se encontra o núcleo no momento em que atinge a temperatura máxima no regime permanente.

$$Nu_L = \left(\frac{0,825 + 0,387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$Nu_s = 0,15Ra^{\frac{1}{3}} \quad (3.6)$$

$$Nu_i = 0,27Ra^{\frac{1}{4}} \quad (3.7)$$

sendo Nu_L o número de Nusselt para a lateral da peça de ferro silício, Nu_s para a superfície dela e Nu_i para a parte inferior da peça, Ra o número de Rayleigh e Pr o número de Prandtl.

Considerando agora os enrolamentos (Fig. 3.3), cujas geometrias foram aproximadas a de um cilindro, o coeficiente médio de transferência de calor pode ser encontrado a partir da correlação retirada de Rahimpour e Azizian (2007). Esta correlação foi usada para o número de Nusselt (Nu_c), necessário para encontrar o coeficiente de transferência de calor por convecção na lateral do cilindro (\bar{h}_c).

$$Nu_c = \left(\frac{4Pr^2 Gr}{36+45Pr} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.8)$$

onde Nu_c é o número de Nusselt para a lateral dos enrolamentos e Gr o número de Grashoff.

Para calcular o coeficiente médio de transferência de calor por convecção a seguinte expressão foi usada (INCROPERA E DEWITT, 1998)

$$\bar{h}_L = \frac{kNu}{L_c} \quad (3.9)$$

\bar{h}_L representa o coeficiente médio de transferência de calor por convecção para lateral do enrolamento Nu representa o número de Nusselt que está relacionado com a geometria e L_c é o comprimento característico utilizado que também depende da geometria analisada.

3.3.2 – Convecção Forçada

Para obter o coeficiente médio de transferência de calor por convecção \bar{h}_f no núcleo sob convecção forçada, foi utilizada a teoria de jatos colidentes (INCROPERA E DEWITT, 1998). O núcleo foi analisado por inteiro (núcleo de ferro e enrolamentos) gerando uma área de superfície detalhada na Figura 3.5. A seguir são apresentadas as correlações para determinar o número de Nusselt e em seguida o \bar{h}_f que atua na superfície do núcleo promovendo a troca de calor.

$$G = 2 Ar^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1-2,2 Ar^{\frac{1}{2}}}{1+0,2 \left(\frac{H_v}{D_s} - 6 \right) Ar^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (3.10)$$

$$Nu_f := Pr^{0,42} G \left(2Re^{\frac{1}{2}} (1 + 0,005Re^{0,55})^{1/2} \right) \quad (3.11)$$

$$\bar{h}_f = \frac{k Nu_f}{L_f} \quad (3.12)$$

A partir da Equação (3.10) pode-se encontrar o parâmetro G onde Ar é a relação adimensional entre a distância e diâmetro dos ventiladores, H a distância entre o ventilador e a superfície do núcleo e D o diâmetro do ventilador.

Com a Equação (3.11) pode-se encontrar o número de Nusselt para convecção forçada Nu_f a partir do parâmetro G , Re o número de Reynolds aplicado a velocidade do ar que foi obtida a partir de um Anemômetro rotativo de palhetas e Pr o número de Prandtl. A partir da Equação (3.12) é possível encontrar o coeficiente médio de transferência de calor por convecção \bar{h}_f para o caso de convecção forçada, onde k é a condutividade térmica do ar e L_f o comprimento característico do núcleo.

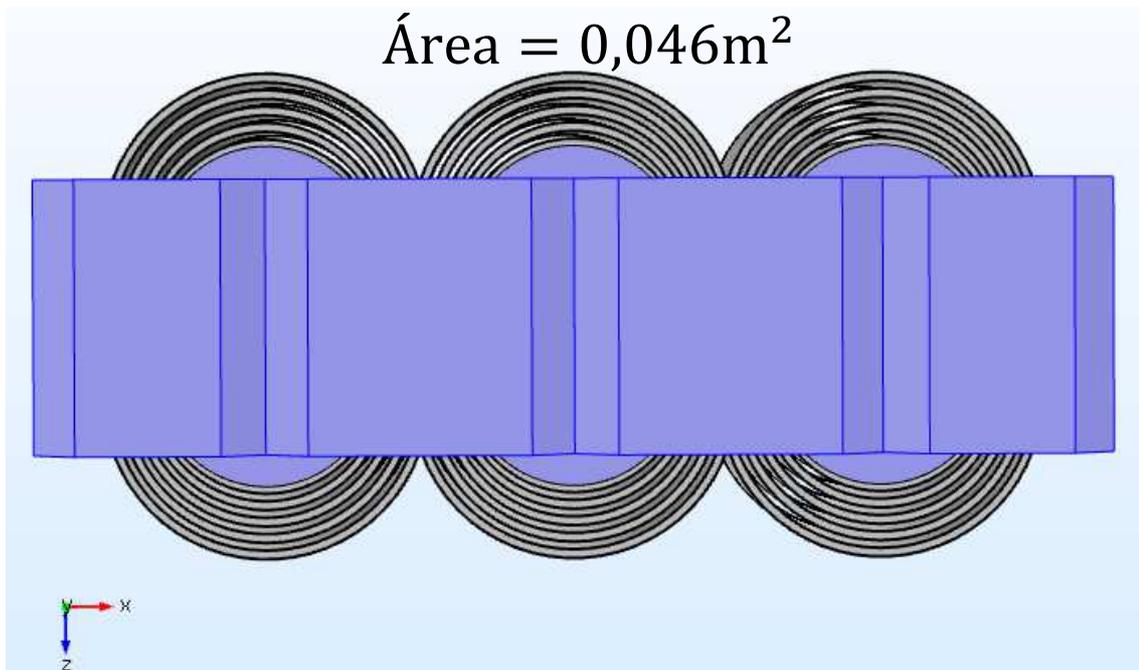


Figura 3.5 – Área de superfície utilizada nos cálculos com convecção forçada.

3.4 – Radiação

Ao se trabalhar com temperaturas acima dos 100 °C como é o caso do núcleo do transformador, a parcela de calor perdida por radiação se torna mais expressiva. O fluxo de calor perdido por radiação pode ser calculado pelo COMSOL e para isso é necessário determinar primeiro a emissividade ϵ do material do núcleo com auxílio de uma câmera termográfica. A temperatura de superfície é medida por um termopar previamente calibrado, conforme descrito no Capítulo 4, e comparada com a temperatura medida pela câmera, ao alterar o valor da

emissividade a temperatura medida pela câmera também muda, assim quando o valor correspondente a temperatura obtida pelo termopar for alcançada, define-se a emissividade do material. A câmera termográfica usada será apresentada no Capítulo 4.

3.5 – Solução Numérica

Para a solução numérica o núcleo do transformador foi desenhado em três domínios que são referentes a cada material utilizado no transformador (Figs. 3.2-3.4). O cobre que constitui os enrolamentos, o papel Kraft isolante localizado entre cada camada do enrolamento e a estrutura de ferro silício. Suas propriedades térmicas são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades térmicas dos materiais do transformador.

Material	Condutividade	Massa Específica	Calor Específico
	$K (W/m.K)$	$\rho (Kg/m^3)$	$C_p (J/Kg.K)$
Cobre	400	8700	385
Papel Kraft	0,089	800	1500
Ferro Silício	45	6400	400

Fonte: Incropera e Dewitt (1998).

A partir das dimensões reais do núcleo foi feito o desenho da geometria no programa SolidWorks, onde foi possível separar as partes de papel, cobre e ferro silício em diferentes domínios. As dimensões do desenho do núcleo são mostradas nas Figuras 3.6 a 3.8. O programa SolidWorks permite desenhar partes separadas e depois uní-las fazendo uma única peça com materiais diferentes, que é importante para manter os aspectos reais dos materiais no núcleo reduzindo assim erros de temperatura devido variação das propriedades térmicas dos materiais.

Para resolver o modelo térmico, representado pelas Equações (3.2 a 3.4), foi utilizado o programa COMSOL Multiphysics que é uma plataforma de software multi-propósito com base em métodos numéricos avançados para modelar e simular problemas de engenharia. Com o COMSOL Multiphysics, é possível levar em conta fenômenos acoplados ou multifísicos. Também é possível conectar simulações do COMSOL Multiphysics a softwares de computação técnica, CAD (*Computer Aided Design*). O COMSOL é um programa com interface gráfica desenvolvido com base no método de elementos finitos, com suporte para modelos geométricos em CAD baseados no modelo físico real. A interface do COMSOL com a distribuição de temperatura no núcleo pode ser vista na Figura 3.9. Nesta figura é possível observar a geometria que representa o núcleo já construído nos 3 domínios de materiais utilizados, e é a partir dessa geometria que o programa resolve as equações da difusão utilizando métodos numéricos. Para

isso o programa divide o domínio geométrico em partes menores que pode ser de forma tetraédrica, caracterizando uma malha, e aplica as equações que regem o problema à estas partes menores.

Neste trabalho o efeito da resistência de contato foi desprezado sendo assim as fronteiras entre os materiais foi caracterizada como contato perfeito.

A etapa de discretizar o domínio em elementos menores tem consequências no pós-processamento. Uma malha bem discretizada possibilita resultados mais próximos dos experimentais, porém com um tempo maior de processamento. Assim para otimização de processamento foi feito um refinamento de malha para garantir precisão e rapidez no processamento.

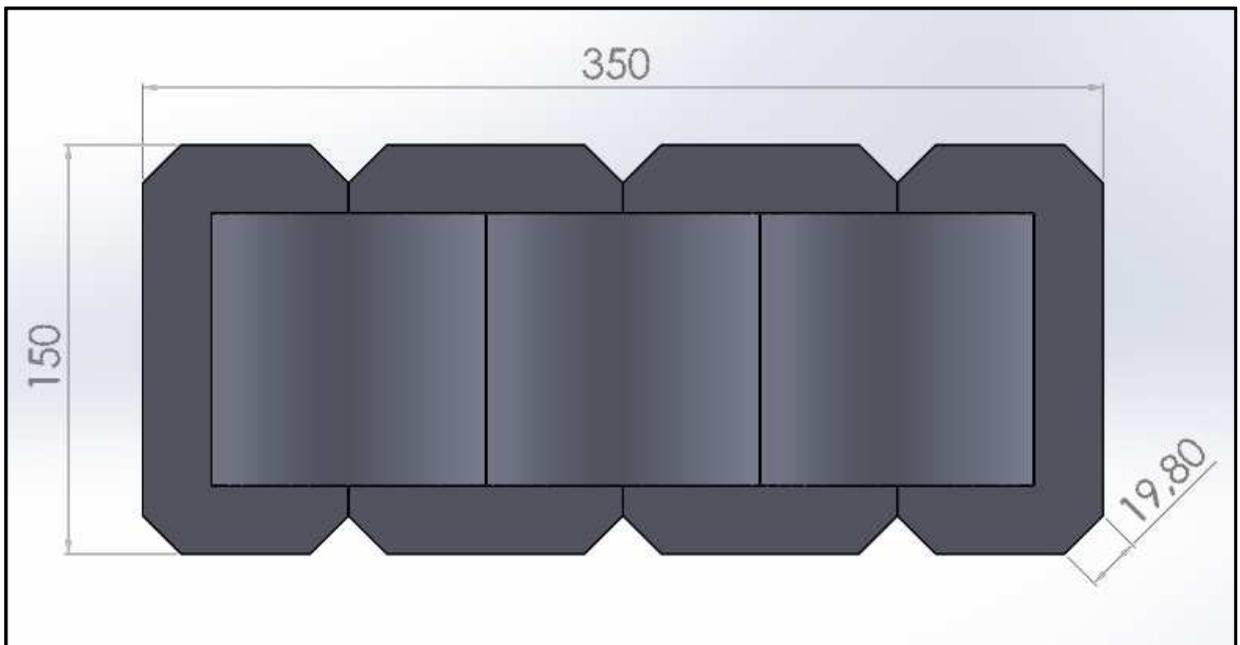


Figura 3.6 - Dimensões do núcleo em milímetros, vista lateral.

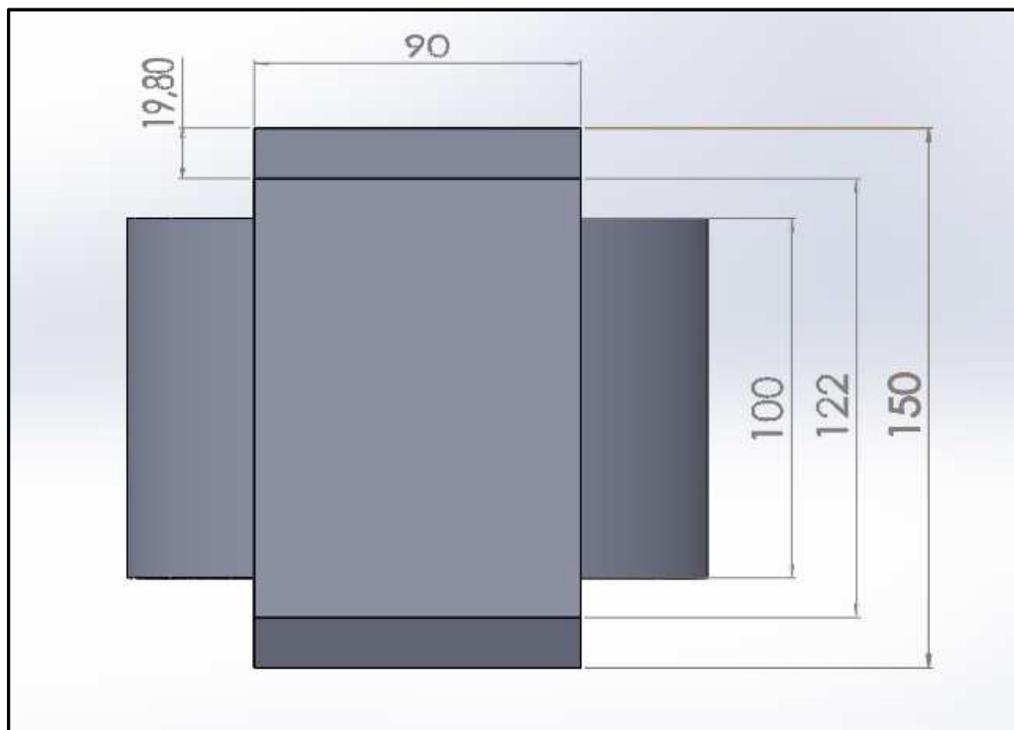


Figura 3.7 - Dimensões do núcleo em milímetros, vista frontal.

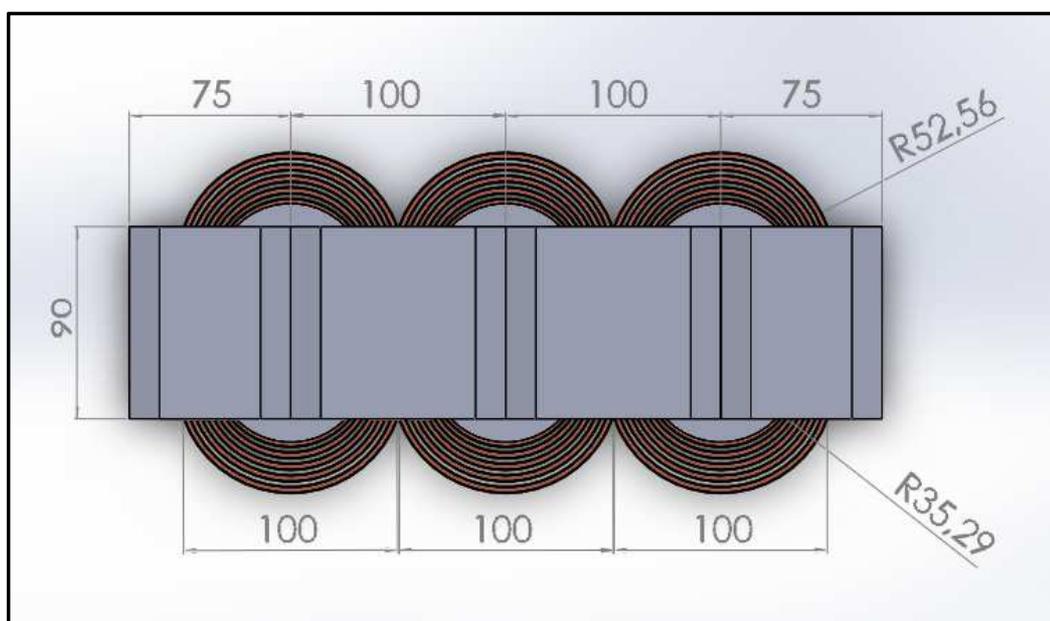


Figura 3.8 - Dimensões do núcleo em milímetros, vista superior.

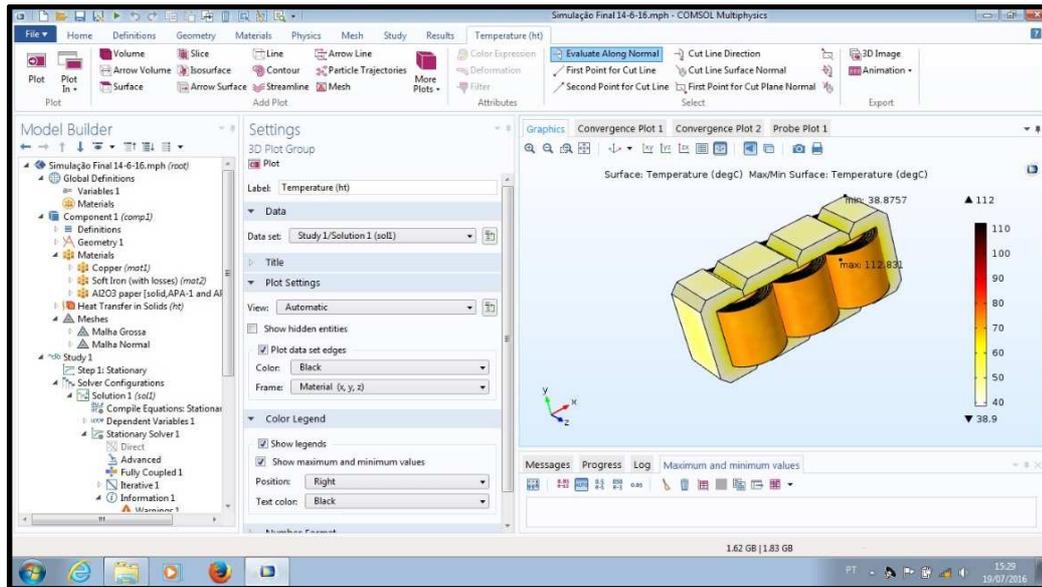


Figura 3.9 - Interface do COMSOL 5.2

A malha utilizada na simulação (Fig. 3.10) possui elementos tetraédricos que se adequam melhor a geometria complexa do núcleo e fornecem resultados mais precisos de temperatura.

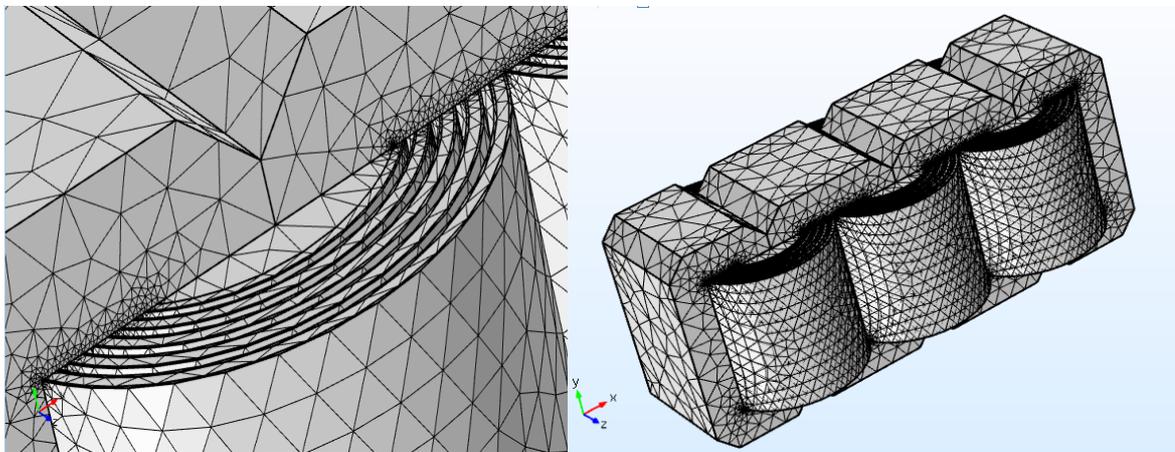


Figura 3.10 – Malha tetraédrica gerada pelo COMSOL.

Na Tabela 3.2 mostra-se um refinamento de malha utilizado para otimizar as simulações. Nesta tabela pode-se observar as variações de temperaturas no enrolamento 2 e os tempos de simulação para cada tamanho de elemento de malha. Foram simuladas cinco malhas, primeiramente com 258617 elementos, depois 545271 elementos, em seguida com 875452 elementos, logo após 1364912 elementos e finalmente 1745736 elementos. Foi possível ver uma convergência nos valores de temperatura a partir das três últimas malhas. Cada número de

elementos de malha gerou um resultado de temperatura no sensor e também um tempo de processamento. A condição de geração interna utilizada foi a equivalente a carga não linear com convecção natural onde foi encontrada a maior temperatura dos testes experimentais realizados, assim foi possível comparar os resultados da simulação para ver qual malha mais se aproximou da situação real.

Tabela 3.2 – Refinamento de malha.

Número de Elementos da Malha Tetraédrica	Temperatura do Enrolamento 2 (°C)	Tempo (min)
258617	127,35	196
545271	129,6	371
875452	135,56	562
1364912	135,88	891
1745736	135,99	1274

A partir dos dados da Tabela 3.2 pode-se perceber uma aproximação dos valores de temperatura simulados com os valores obtidos experimentalmente (Capítulo 5) a partir da malha com 875452 elementos, e com 1364912 elementos pode-se observar que os valores de temperatura convergiram, a variação de temperatura foi mínima e, portanto, a malha com 1364912 elementos foi utilizada na simulação.

3.6 – Vantagens da Simulação Numérica usando o COMSOL

A grande vantagem da utilização de uma simulação numérica deste tipo, é a questão do mapeamento de todas as temperaturas em qualquer ponto do transformador e conseqüentemente é possível encontrar os pontos de maior temperatura (*Hot Spots*) e suas coordenadas. A determinação do *Hot Spot* é uma questão muito discutida em trabalhos atuais devido a sua importância no aprimoramento do projeto de transformadores de médio e grande porte, que são equipamentos de alto custo de fabricação e precisam ter uma vida útil garantida.

No trabalho de Tsili et al. (2011) foi utilizado um programa desenvolvido pelos próprios autores onde a malha era muito grosseira com poucos elementos para determinar a distribuição de temperatura, assim a precisão dos valores de temperatura foi prejudicada. Esta é uma das principais vantagens deste trabalho que usa o COMSOL que permite gerar uma malha muito mais adequada a geometria com valores de temperatura muito mais próximos do real. Este fato

confere ao COMSOL ser uma ótima ferramenta para a determinação da distribuição de temperatura no núcleo. Ainda existe a possibilidade de trabalhar futuramente utilizando a análise de fluidos em conjunto com a transferência de calor permitindo visualizar o campo de temperatura no núcleo do transformador e também no fluido à sua volta.

4 – Montagem Experimental

4.1 – Introdução

Neste capítulo será apresentada toda a montagem experimental realizada para análise térmica do transformador tipo CORE estudado. Esta análise consiste na medição de temperatura em diversos pontos do transformador utilizando termopares e termômetros de resistência juntamente com duas configurações de carga diferentes, linear e não linear. Além disso duas configurações de resfriamento: convecção natural e forçada. Os pontos de posicionamento dos sensores foram definidos a partir de outros trabalhos da literatura e a partir de vários testes experimentais que foram realizados. Apresenta-se também uma descrição detalhada dos sensores, equipamentos e procedimentos utilizados.

4.2 – Descrição da Bancada Experimental

Na Figura 4.1 pode-se observar o aparato experimental desenvolvido para os testes com carga. O computador é ligado na aquisição e o seu programa guarda todos os dados de temperatura fornecidos pela aquisição, a fonte de alimentação fornece a tensão em corrente contínua necessária para alimentação dos ventiladores quando feitos testes com convecção forçada. O transformador é ligado na rede elétrica com tensão trifásica de 220 volts. As cargas são utilizadas separadamente dependendo da configuração linear ou não linear exigida.

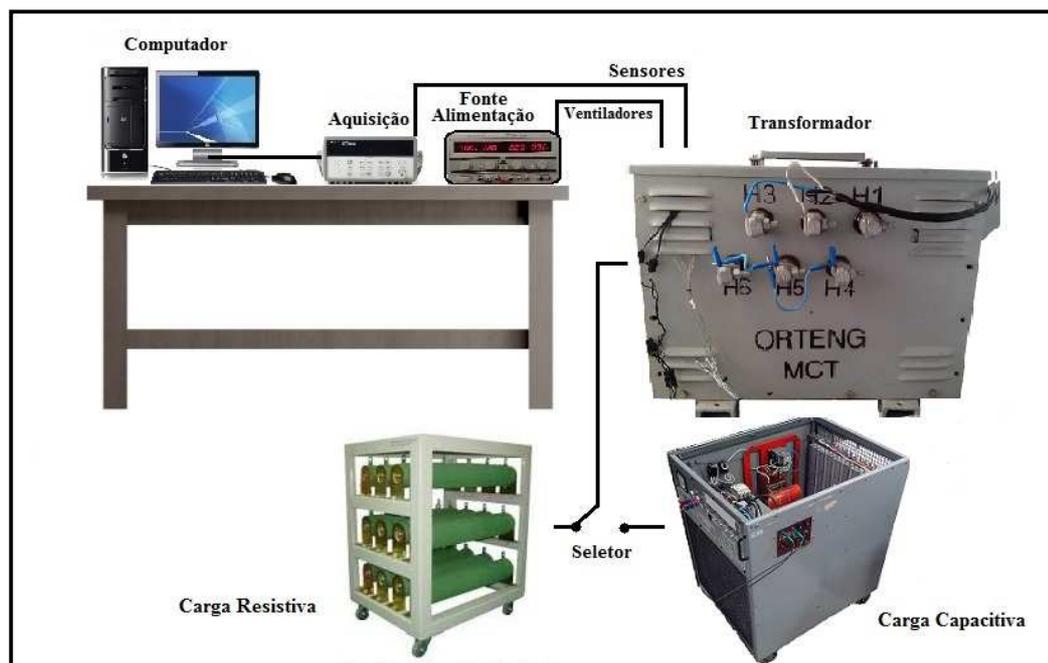


Figura 4.1 – Esquema de montagem do aparato experimental utilizado neste trabalho.

O transformador trifásico à seco utilizado nos testes (Fig. 4.2) foi fabricado pela empresa Orteng e possui potência nominal de 5 kVA, norma NBR 10295. A tensão utilizada é de 220 volts. O transformador possui classe térmica B segundo a IBT, o que significa que o enrolamento suporta temperaturas de até 130°C sem comprometer a vida útil do isolamento. O núcleo (Fig. 4.3) é do tipo envolvido, possui relação 1 para 1, ou seja, mesmo número de espiras no enrolamento primário e secundário, assim as tensões de entrada e saída são iguais. O material da parte indutiva do núcleo é liga de aço silício e a ligação elétrica do transformador é feita em estrela (Y-Y). Na montagem ainda foram selecionados locais para fixação dos sensores de temperatura que são: interior do enrolamento 1; interior do enrolamento 2; interior do enrolamento 3; superfície do enrolamento 2; superfície interna do tanque.

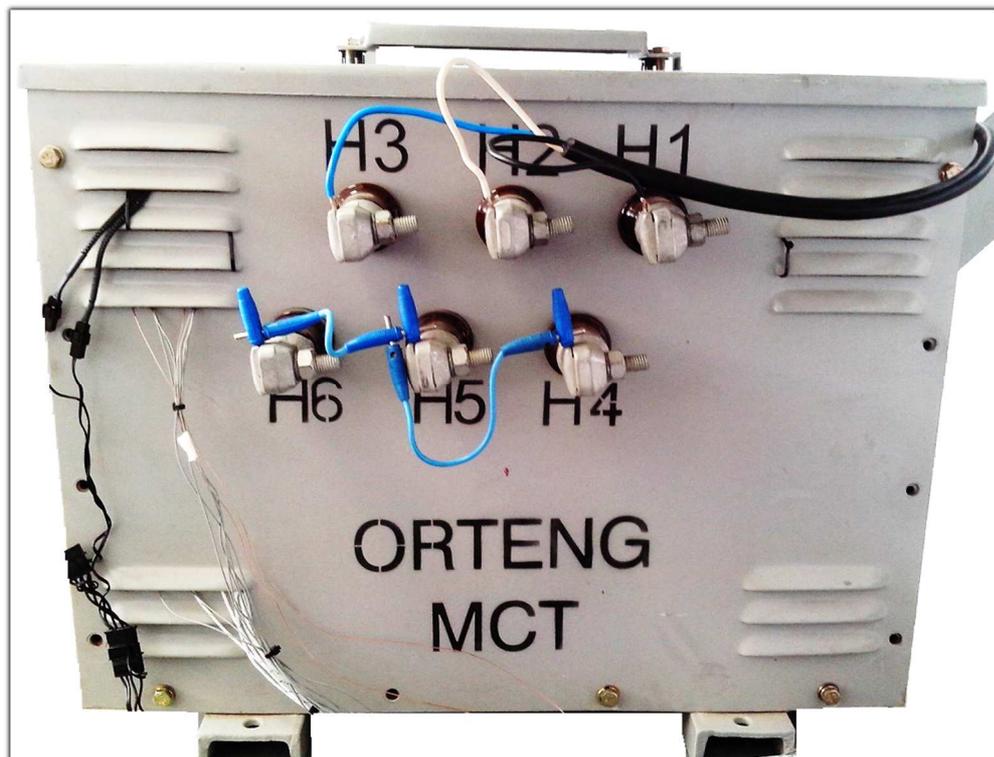


Figura 4.2 – Transformador utilizado nos testes.

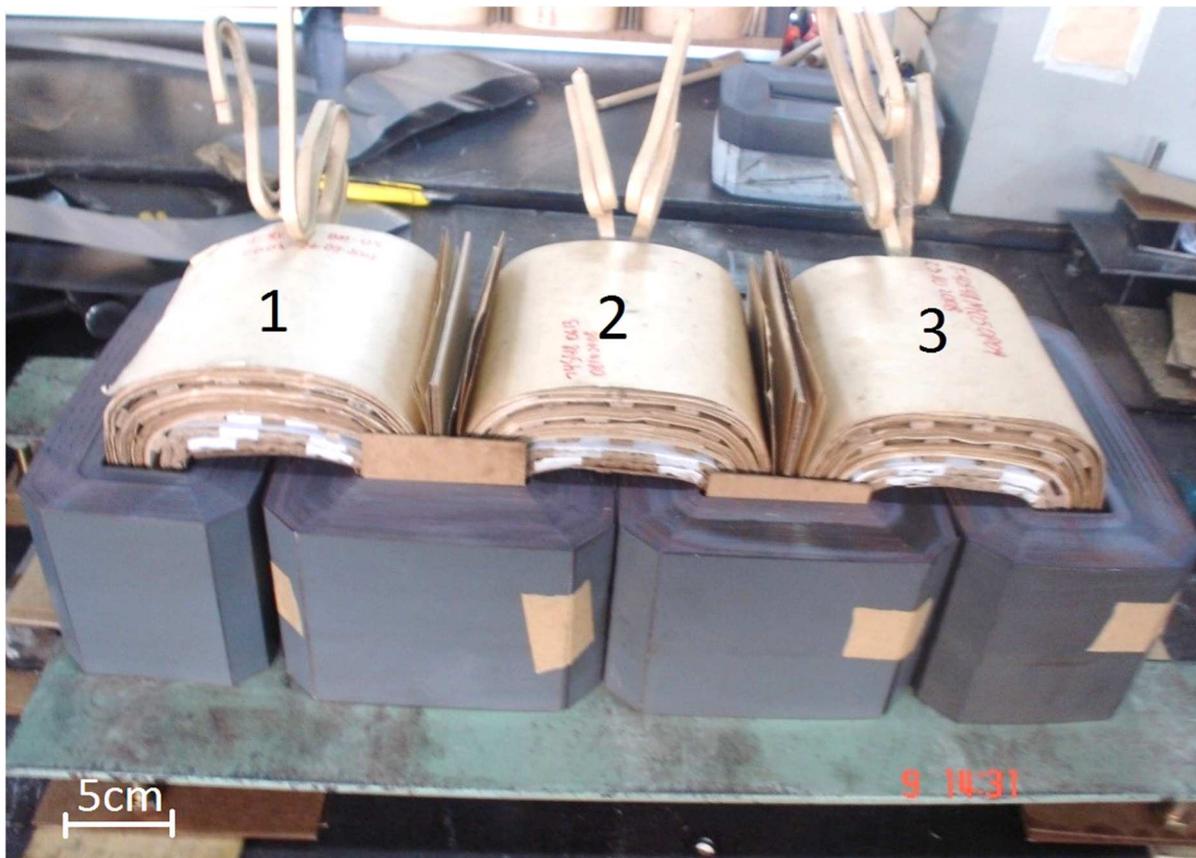


Figura 4.3 – Núcleo do transformador.

Para os testes com ventilação forçada, foram utilizados dois ventiladores NZXT (Fig. 4.4) de 12 volts, 8 watts e 200mm de diâmetro, que geram individualmente um fluxo de ar médio de 6 m/s. Estes ventiladores de uso em computadores de alta performance foram fixados dentro do transformador de forma que o fluxo de ar ficasse perpendicular ao núcleo como pode ser visto na Figura 4.5.

Na Figura 4.6, é mostrado o equipamento utilizado para alimentação dos ventiladores, a fonte de alimentação digital Instrutemp ST 305D-II, esta pode ser configurada para fornecer a tensão de 12 volts necessária para o funcionamento dos ventiladores.

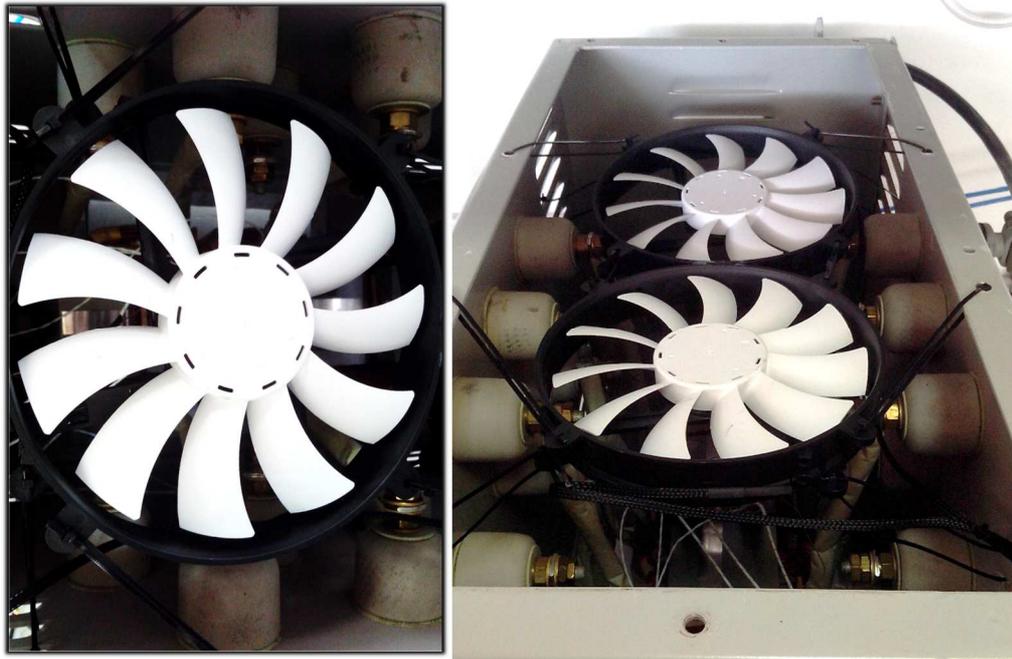


Figura 4.4 – Ventiladores utilizados para testes com convecção forçada.

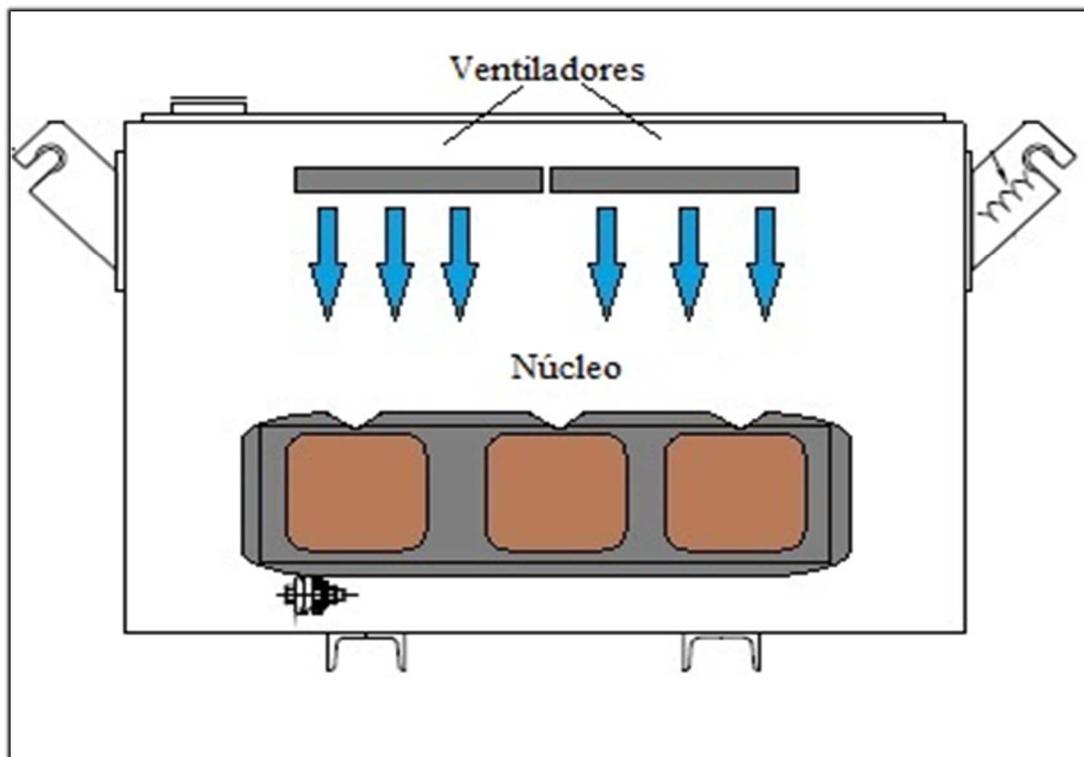


Figura 4.5 – Disposição dos ventiladores dentro do transformador.

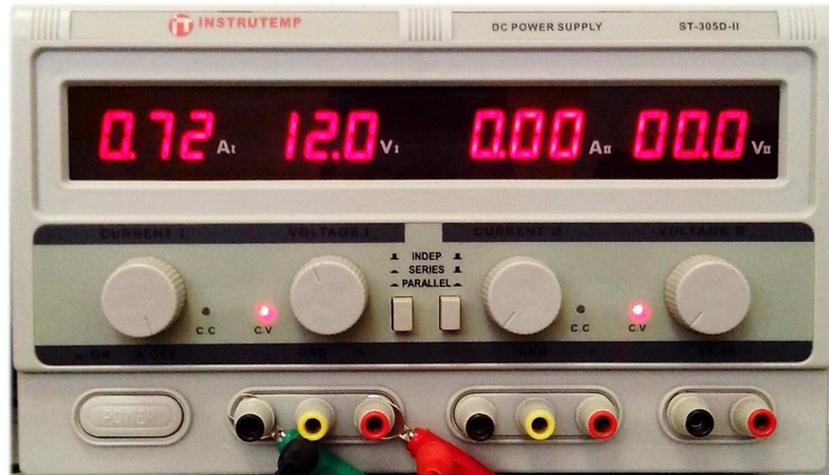


Figura 4.6 – Fonte de alimentação Instrutemp.

Apresenta-se na Figura 4.7 o instrumento utilizado para medição do fluxo de ar gerado pelos ventiladores, que é um anemômetro Testo 445 acoplado a uma sonda rotativa de palhetas que mede a velocidade média ou instantânea do ar em metros por segundo. Esta medição foi feita em três testes de um minuto, sobre 4 posições alternadas sobre a superfície do núcleo, definindo uma velocidade média do fluxo de ar de 4,6 m/s. Esta velocidade será utilizada para o cálculo do número de Reynolds e consequentemente a obtenção do coeficiente médio de transferência de calor por convecção.



Figura 4.7 – Anemômetro utilizado na medição do fluxo de ar dos ventiladores.

A aquisição Agilent 34970A, mostrada na Figura 4.8, previamente calibrada e controlada pelo software de computador Benchlink Datta Logger 3 foi utilizada para coletar as temperaturas de todos os sensores utilizados durante os testes.

Devido ao longo período de tempo que o transformador exige para entrar em regime permanente, todo aparato foi colocado dentro de um laboratório climatizado, afim de evitar interferências do clima externo que é bastante instável na região de Itajubá-MG onde foram executados os testes.



Figura 4.8 – Aquisição Agilent 34970A: a) vista frontal e b) vista posterior.

Para gerar um carregamento no transformador foram utilizados dois tipos de cargas mostrados nas Figuras 4.9 e 4.11. A carga resistiva foi designada para gerar um carregamento no transformador de característica linear, ou seja, senoidal (Fig. 4.10). Ela é constituída por vários resistores de configuração variável e já preparada para exercer no transformador, a corrente nominal máxima suportada. A carga retificadora projetada e fabricada pela UNIFEI, é composta de vários componentes eletrônicos, entre eles, capacitores, circuito retificador e resistores, que conseguem gerar um carregamento de característica não-linear, ou seja, não senoidal no transformador. Esta carga ainda possui configurações: indutiva (Fig. 4.12), que gera uma distorção média na corrente, e capacitiva (Fig. 4.13), que fornece um tipo de distorção de corrente de maior impacto no transformador.

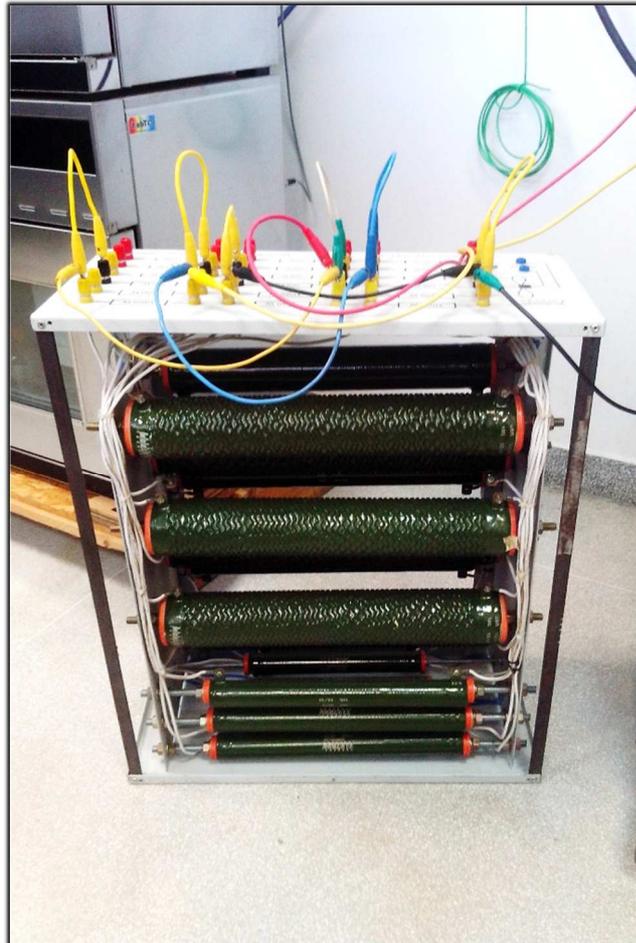


Figura 4.9 – Carga resistiva trifásica.

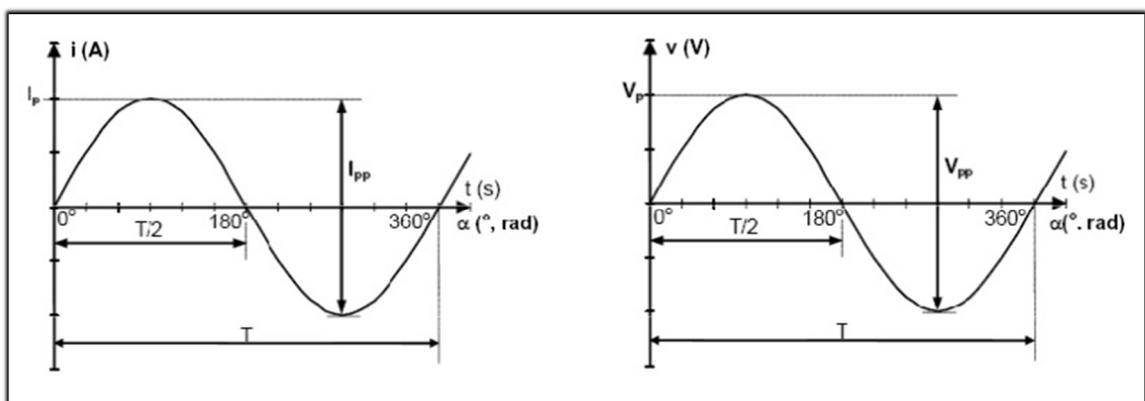


Figura 4.10 – Corrente e Tensão senoidais geradas por carga linear.



Figura 4.11 – Carga retificadora trifásica.

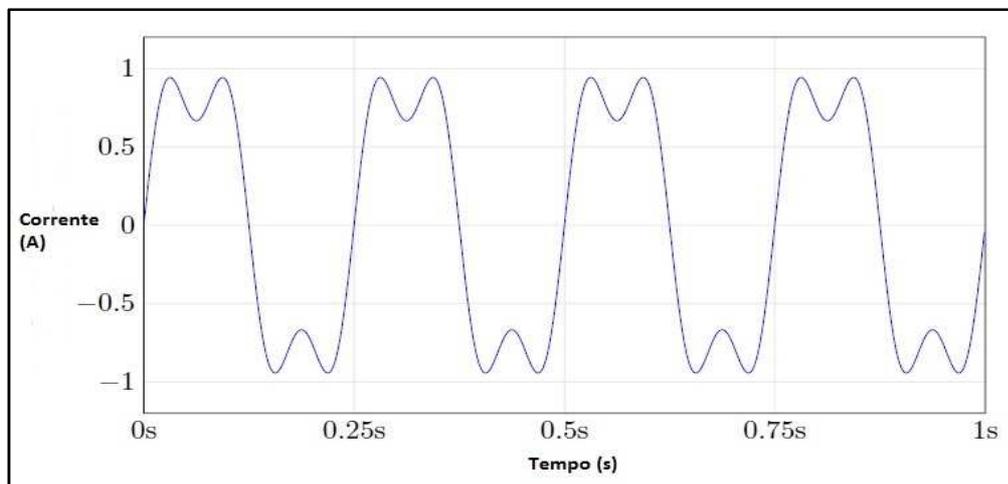


Figura 4.12 – Corrente distorcida por carga não linear indutiva.

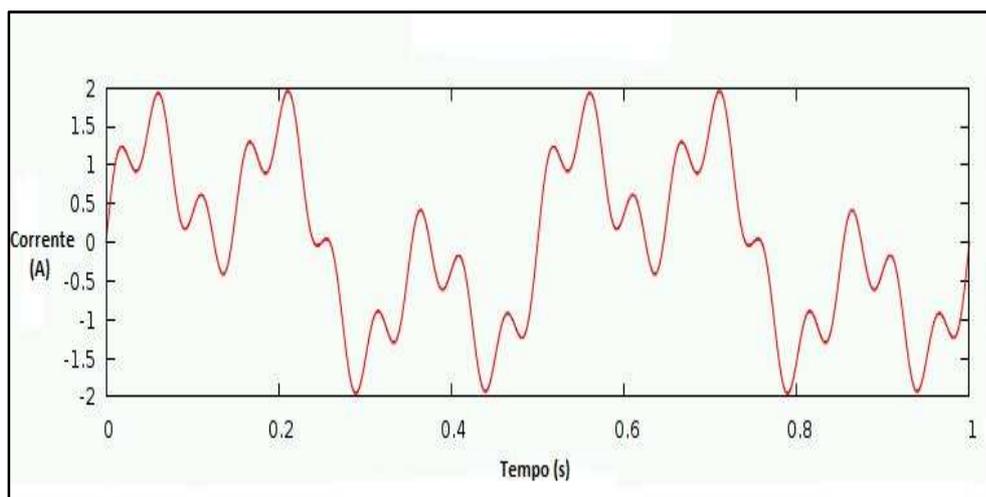


Figura 4.13 – Corrente distorcida por carga não linear capacitiva.

4.3 – Detalhamento dos Sensores de Temperatura

4.3.1 - Termopares

Os Termopares são os sensores de maior uso na indústria para medição de temperatura. Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de -200 a 2300°C aproximadamente, com uma boa precisão e repetibilidade aceitável, tudo isto a um custo que se comparado com outros tipos de sensores de temperatura são mais econômicos.

Um termopar ou par termométrico consiste de dois condutores metálicos de natureza distinta, na forma de metais puros ou ligas homogêneas. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junção de medição; a outra extremidade, junção de referência é levada ao instrumento medidor por onde flui a corrente gerada. Convencionou-se dizer que o metal A é positivo e B é negativo, pois a tensão e corrente geradas são na forma contínua (cc).

O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por T. J. Seebeck quando ele notou que em um circuito fechado formado por dois condutores metálicos e distintos A e B, quando submetidos a um diferencial de temperatura entre as suas junções, ocorre uma circulação de corrente elétrica (i).

O aquecimento de dois metais diferentes com temperaturas diferentes em suas extremidades, gera o aparecimento de uma F.E.M. (Força Eletromotriz) da ordem de milivolts. Este princípio conhecido como efeito Seebeck propiciou a utilização de termopares para medição de temperatura.

Na Figura 4.14 mostra-se os termopares utilizados nos testes, termopares tipo J de Ferro-Constantan e termopares tipo K de Cromel-Alumel que garantem precisão na faixa de temperatura de trabalho do transformador que varia de 15 a 145°C (HOLMAN, 2001).

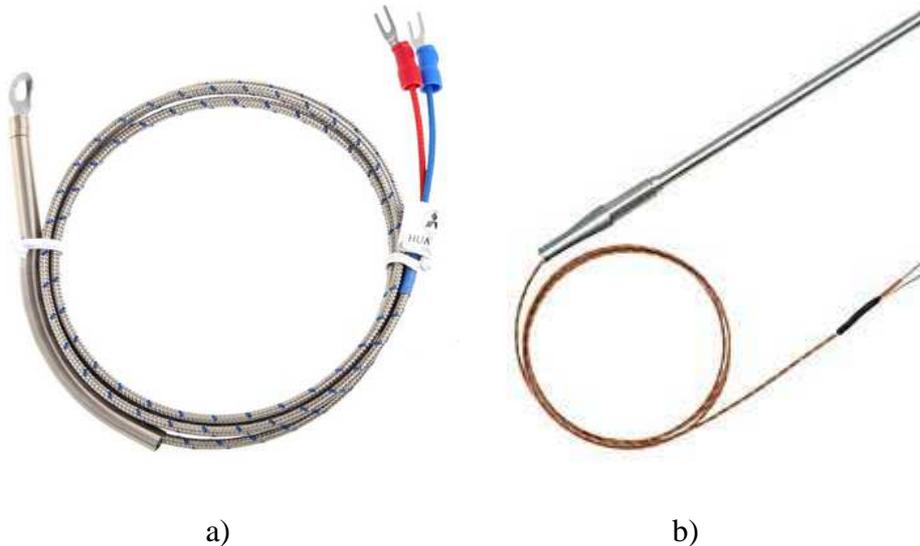


Figura 4.14 – Termopares: a) tipo J e b) tipo K.

4.3.2 – Termômetros de Resistência PT100

A utilização de resistências para medição de temperatura iniciou-se em meados de 1830, porém só houve condições de fabricá-las para utilização em processos industriais a partir do ano de 1925.

Os termômetros de resistência são sensores de temperatura usados amplamente nos processos industriais e laboratoriais, por suas condições de alta estabilidade, repetibilidade, resistência à contaminação, mínimo *delay* (atraso) em relação ao tempo, menor influência de ruídos e a precisão de leitura. Por tais características, este sensor é padrão internacional para a medição de temperatura na faixa de -259,35°C a 961,78°C, segundo a ITS-90. Também chamados de bulbos de resistência, termo resistências ou RTD são sensores baseados no princípio de variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Ocorre um aumento da resistência elétrica com o aumento da temperatura. O material mais utilizado é a platina, pois o mesmo apresenta uma ampla escala de temperatura, alta resistividade permitindo maior sensibilidade, alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura, uma boa linearidade resistência versus temperatura e também a rigidez e ductilidade para ser transformada em fios finos.

Nos testes foram utilizados sensores PT100 de platina conforme mostrado na Figura 4.15. Este sensor também atende a variação de temperatura exigida nos testes que não ultrapassa 200 °C.



Figura 4.15 – Termômetro de Resistência de Platina PT100.

4.4 – Calibração dos Sensores de Temperatura

Na Figura 4.16 apresenta-se o equipamento de Banho Termostatizado Tecnal TE-184 utilizado para calibração dos sensores utilizados nos testes. Utilizando a mesma aquisição de dados dos testes, foram feitas medições começando em 20°C e aumentando 5 °C a cada medição até atingir 80°C. Utilizando dados obtidos da aquisição, pode-se calcular a linha de tendência (Fig. 4.17), onde a correlação tem valores próximos de 1, indicando a precisão do sensor.



Figura 4.16: Equipamento de banho termostático Tecnal TE-184.

Com posse dos dados fornecidos pela aquisição, pode-se construir o gráfico de temperatura do sensor versus temperatura do banho na Figura 4.17.

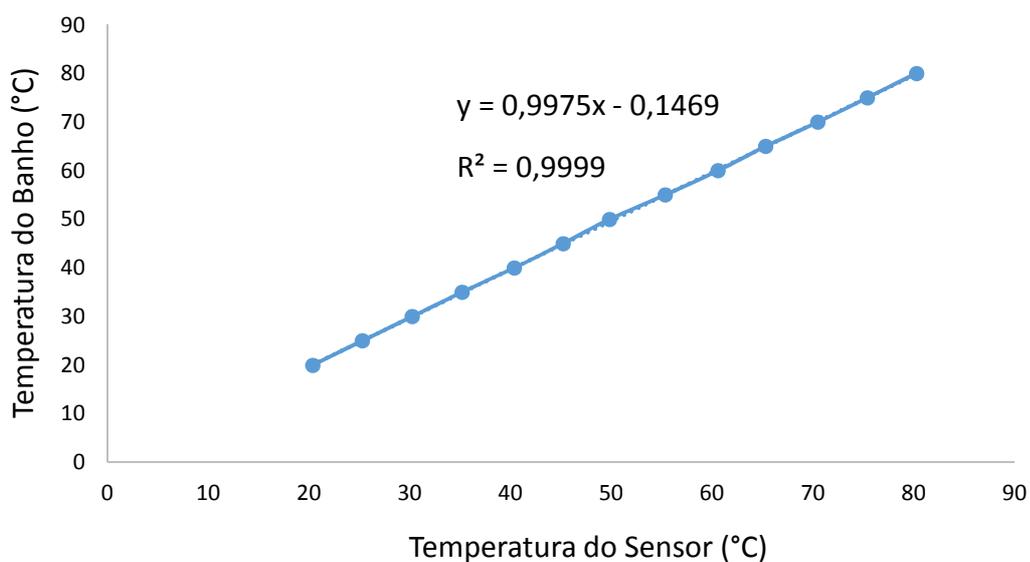


Figura 4.17: Curva de calibração e equação característica do sensor 111.

4.5 – Análise Termográfica

Para melhor verificação dos pontos ideais para colocação dos sensores foi feita também uma análise utilizando o equipamento Câmera Termográfica Flir modelo InfraCAM (Fig. 4.18). Na Figura 4.19 mostra-se um exemplo de medição realizado pela câmera termográfica onde

pode-se observar o núcleo do transformador aquecido, e os pontos em vermelho apresentam as regiões de maiores temperaturas.

Com a utilização da câmera termográfica juntamente com a aquisição de dados, foi possível determinar a emissividade da superfície do material no núcleo. Este valor de emissividade será usado no programa COMSOL para o cálculo da distribuição de temperatura. Ao comparar as temperaturas medidas pelo sensor termopar com as temperaturas medidas pelo termovisor, pode-se chegar a um valor de emissividade.



Figura 4.18 – Câmera termográfica Flir InfraCAM.

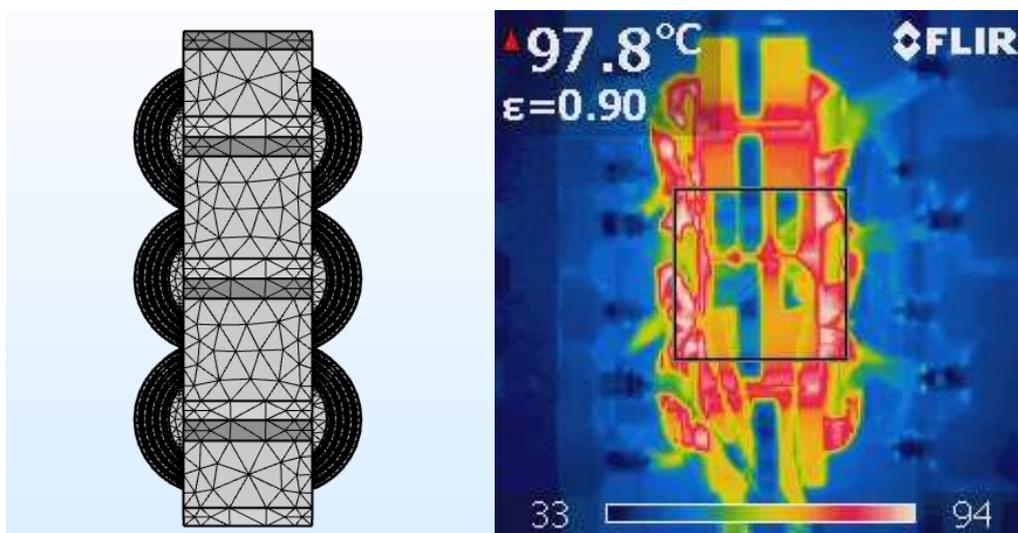


Figura 4.19 – Imagem termográfica superior do núcleo do transformador aquecido.

4.6 – Disposição dos sensores no transformador

Com base em estudos anteriores (RAHIMPOUR e AZIZIAN, 2007 e TSILI et al., 2011), e as imagens termográficas coletadas, foram definidos locais otimizados para fixação dos sensores dentro do transformador. Conforme mostrado na Figura 4.3 os enrolamentos são numerados de 1 a 3, definindo três pontos de medição. No interior de cada núcleo foram colocados sensores do tipo PT100 e Termopares do tipo K e J. Verificando assim a variação entre temperaturas entre termopar e PT100 e também relacionadas ao tipo de termopar. Também foram colocados sensores na superfície do enrolamento 2 e no interior do tanque do transformador onde se encontra o núcleo. A temperatura ambiente foi medida utilizando um Termopar tipo J fixado em um ponto do laboratório onde não houvesse interferência na medição.

Com base em trabalhos anteriores observou-se que as temperaturas mais altas são atingidas no enrolamento central, assim para maior precisão foram colocados termopares do tipo K neste enrolamento, juntamente com os termopares tipo J e os PT100, para avaliar variações oriundas do tipo de sensor. O posicionamento de todos os sensores é apresentado na Tabela 5.1.

Na Figura 4.20 são mostrados os pontos onde foram colocados os sensores no núcleo que são: interior do enrolamento 1, interior do enrolamento 2, interior do enrolamento 3 e superfície do enrolamento 2.



Figura 4.20 – Posição dos sensores no núcleo.

5 – Análise de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados de temperatura obtidos experimentalmente através dos testes com os termopares e termômetros de resistência PT100 inseridos no núcleo do transformador. Apresenta-se a seguir os resultados numéricos de temperatura obtidos pelo programa COMSOL. Comparações das temperaturas experimentais com a numérica em pontos no núcleo do transformador que foram mencionados no Capítulo 4, são apresentadas. Estas comparações foram usadas para validação da metodologia e com as pequenas diferenças encontradas entre as temperaturas calculadas e as medidas poderá ser observada a boa concordância dos resultados. Apresenta-se também a posição dos *Hot Spots* encontrados para cada caso estudado.

5.1 – Resultados Experimentais

Para garantir a repetitividade dos resultados experimentais de temperatura foram feitos três testes para cada configuração de carga e ventilação sendo 12 testes no total com aproximadamente 25 horas de duração cada. Em cada experimento foram adquiridos aproximadamente 1500 pontos de temperatura com intervalo de medição de 1 minuto.

A classe do isolamento de transformador é B o que indica que as temperaturas não devem ultrapassar 130 ° C para não danificar o isolamento e reduzir a vida útil ou até mesmo causar a ruptura do isolamento, curto circuito e conseqüentemente uma falha geral do transformador, assim nos testes em que a temperatura ultrapassou os 130°C foi necessária atenção especial ao equipamento.

Observando os experimentos constatou-se que a partir de 700 min (11,6 horas) de teste o transformador atinge o regime permanente. As temperaturas monitoradas por 13 sensores foram obtidas a partir da aquisição Agilent 34970A. A Figura 5.1 mostra em detalhes as coordenadas dos sensores colocados no núcleo juntamente com a origem de posicionamento foi colocada na superfície central do núcleo. Na Tabela 5.1 mostra-se a posição e o tipo de cada sensor utilizado nos testes. A fixação foi feita manualmente no enrolamento. Como os sensores não puderam ser soldados nem colados devido ao material do enrolamento ser frágil, foram colocados mais de um sensor em cada posição (Tabela 5.1) para compensar os erros de fixação.

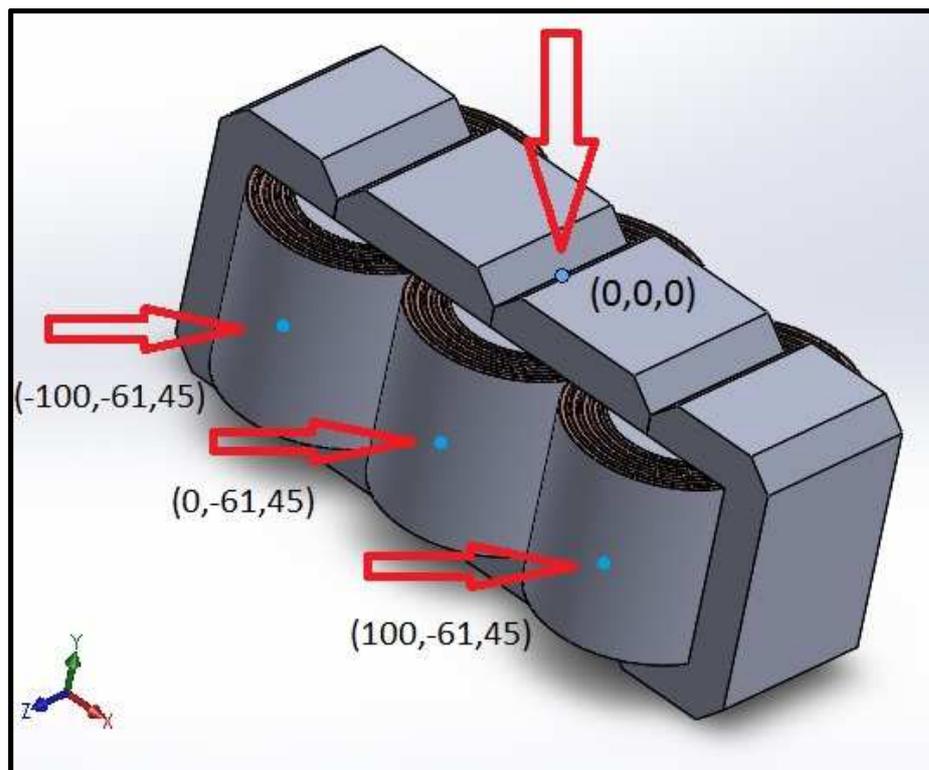


Figura 5.1 – Coordenadas em milímetros dos sensores de temperatura utilizados nos testes experimentais.

Tabela 5.1 – Tipos e Posições dos Sensores de Temperatura.

Canal	Tipo de Sensor	Local	Coordenadas (mm)
102	Termopar J	Enrolamento 1	(-100,-61,45)
104	Termopar J	Enrolamento 2	(0,-61,45)
106	Termopar J	Superfície do Enrolamento 2	(0,0,0)
107	Termopar J	Enrolamento 3	(100,-61,45)
109	Termopar J	Temperatura Ambiente	N/A
111	Termopar J	Temperatura Interior do Tanque	N/A
112	PT100	Enrolamento 3	(100,-61,45)
113	PT100	Enrolamento 2	(0,-61,45)
114	PT100	Enrolamento 1	(-100,-61,45)
115	PT100	Superfície do Enrolamento 2	(0,0,0)
116	PT100	Temperatura Interior do Tanque	N/A
117	Termopar K	Enrolamento 2	(0,-61,45)
118	Termopar K	Enrolamento 2	(0,-61,45)

5.1.1 – Testes com Carga Linear e Convecção Natural

Na Figura 5.2 é possível observar dos sinais de temperatura o comportamento durante o período de aquecimento e resfriamento do transformador, a carga utilizada foi a resistiva fornecendo um carregamento de caráter linear e com convecção natural. Pode-se notar que a temperatura mais elevada ocorreu no Enrolamento 2 com o sensor 118 (Termopar Tipo K) onde a máxima temperatura atingida foi 118,20 °C. Apesar dos sensores 104, 113 e 117 também estarem posicionados no enrolamento 2 eles apresentaram temperaturas diferentes. Esta variação ocorreu devido fixação manual dos sensores no local de difícil acesso e também ao fato de trabalhar com sensores de tipos diferentes (Termopar J, Termopar K e PT100).

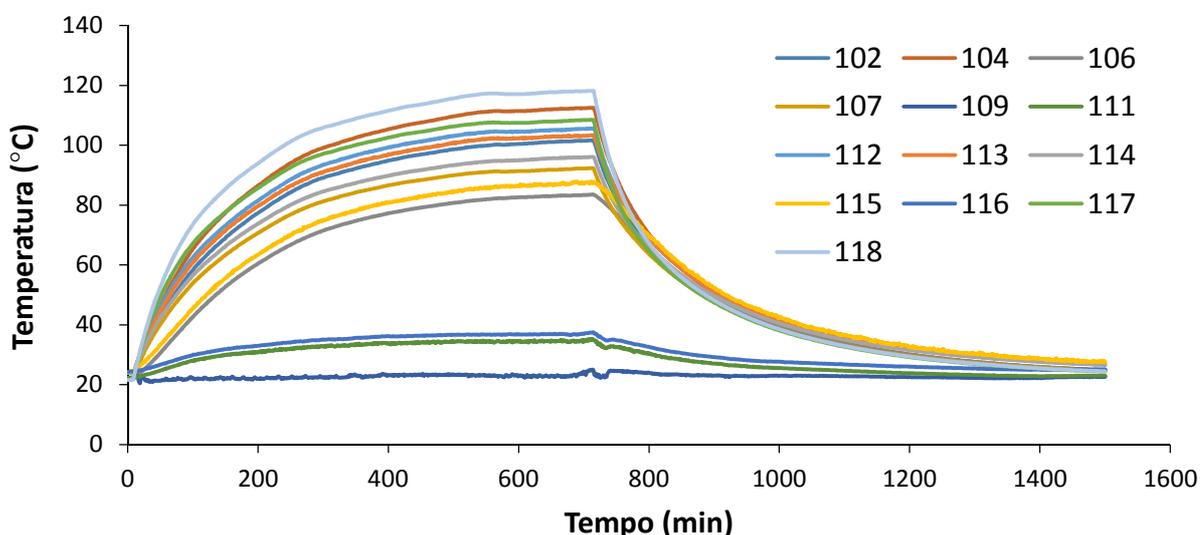


Figura 5.2 – Resultados da distribuição de temperatura medidos no núcleo do transformador para condição de convecção natural.

5.1.2 – Testes com Carga Linear e Convecção Forçada

Na Figura 5.3 é mostrado o comportamento dos sinais de temperatura onde a carga utilizada foi a mesma do caso anterior com os ventiladores ligados caracterizando a condição de convecção forçada. Pode-se notar que a temperatura mais elevada também ocorreu no Enrolamento 2, só que desta vez no sensor 104 (Termopar Tipo J), atingindo 92,43 °C. No teste anterior a maior temperatura (118,2 °C) foi encontrada pelo sensor 118 isto se deve ao fato de provavelmente a convecção forçada ter mais influência sobre o sensor 118 do que o 104 e também a possíveis erros na fixação manual dos sensores. O sensor 104 no teste anterior obteve como maior temperatura 112 °C, ou seja, o uso da ventilação forçada reduziu a temperatura em 20 °C, uma redução de 17,8% na temperatura final deste sensor. Na Figura 5.3 é possível observar

também que a partir de aproximadamente 700 min (aproximadamente 12 horas) o regime permanente é alcançado.

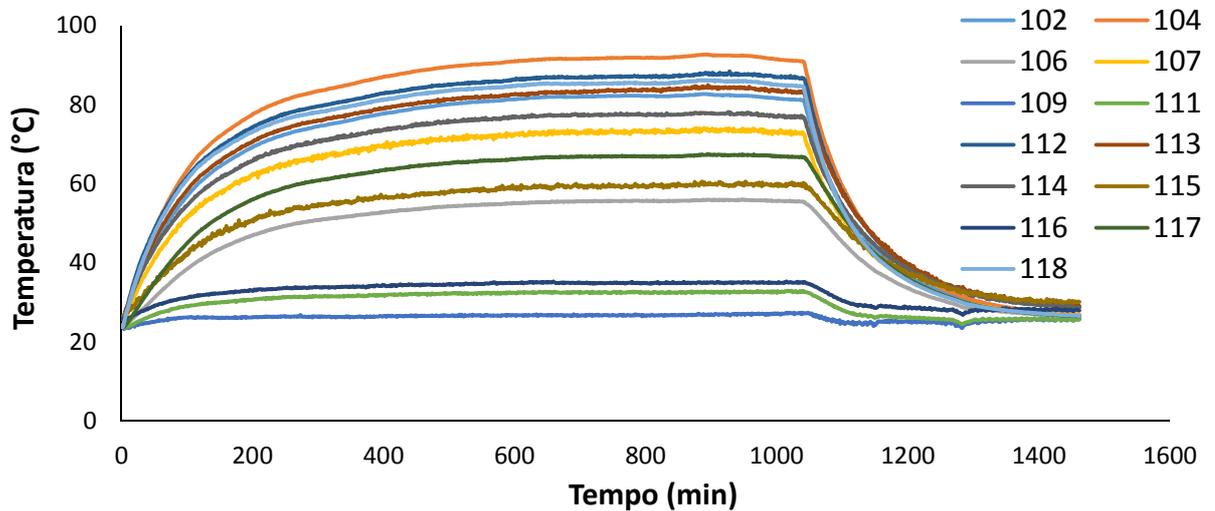


Figura 5.3 – Temperaturas medidas em função do tempo para o núcleo do transformador para condição de convecção forçada.

5.1.3 – Testes com Carga Não Linear e Convecção Natural

Na Figura 5.4 apresenta-se os resultados experimentais de temperatura durante o período de aquecimento e resfriamento do transformador. Para este caso a carga utilizada foi a capacitiva fornecendo um carregamento de caráter Não Linear e os ventiladores estavam desligados caracterizando a convecção natural. A temperatura mais elevada ocorreu no enrolamento 2 no sensor 118 (Termopar Tipo K) atingindo 144,02 °C. Esta temperatura ultrapassou bastante a temperatura limite para o isolamento do transformador de 130 °C, isto é uma demonstração de que a utilização de carga não linear reduz de fato a vida útil do transformador pois o isolamento não foi dimensionado para atingir estas temperaturas. Também é possível observar que o teste foi interrompido aos 600 minutos, ao invés de 700 minutos como nos outros testes, pois as temperaturas elevadas poderiam danificar o equipamento.

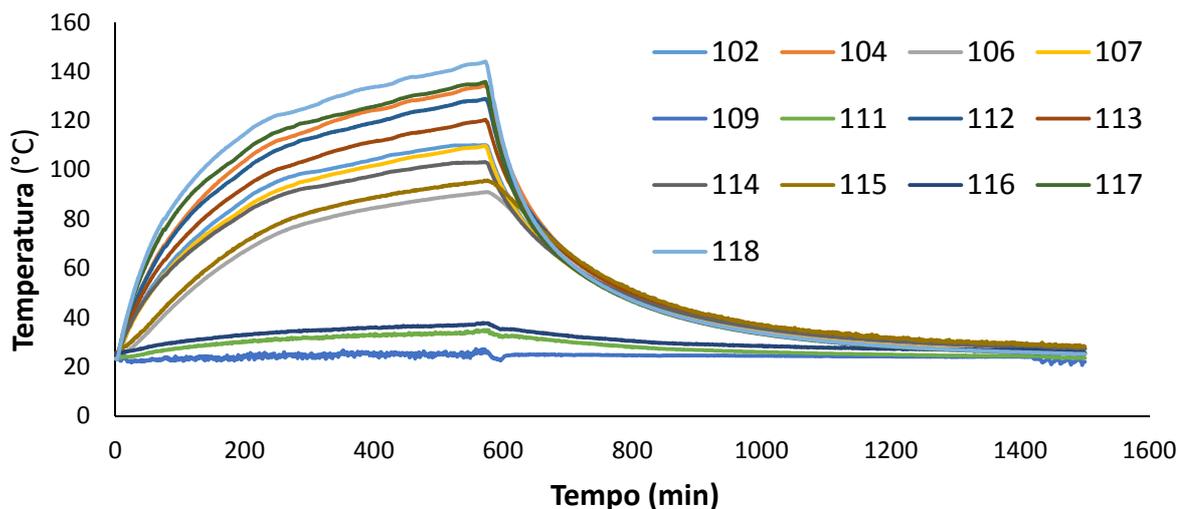


Figura 5.4 – Evolução temporal das temperaturas experimentais no núcleo do transformador para condição de carga Não Linear e Convecção Natural.

5.1.4 – Testes com Carga Não Linear e Convecção Forçada

Na Figura 5.5 mostra-se o comportamento dos sinais de temperatura para uma carga capacitiva fornecendo um carregamento de caráter Não Linear e com os ventiladores ligados caracterizando convecção forçada. Como ocorreu para a maioria dos testes realizados a maior temperatura ocorreu no Enrolamento 2 no sensor 118 (Termopar Tipo K) atingindo 113,01 °C. Mais uma vez o uso de ventiladores provou ser eficiente em reduzir a temperatura máxima atingida pelo núcleo com efeito de carga não linear, conseguindo ainda manter a temperatura numa faixa aceitável para proteção do isolamento (abaixo de 130 °C).

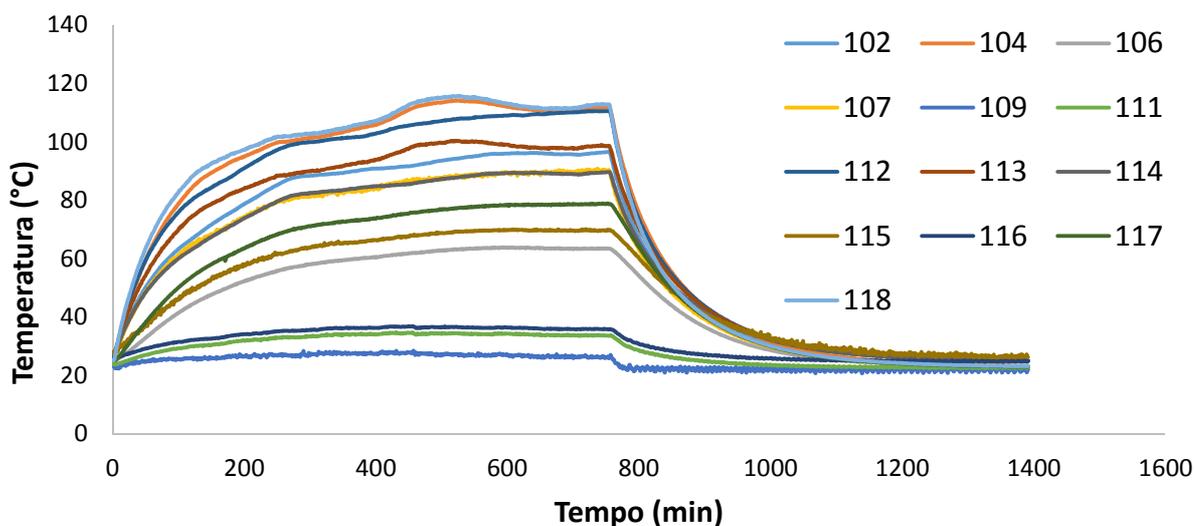


Figura 5.5 – Evolução temporal das temperaturas medidas para carga Não Linear e Convecção Forçada.

5.2 – Análise dos Resultados Experimentais de Temperatura

Observa-se nos testes que as temperaturas médias têm um acréscimo de até 20°C quando utilizada carga não linear. O caso de condição mais alta de temperatura ocorreu com carga não linear e convecção natural ultrapassando a temperatura limite do isolamento do enrolamento de 130°C. O uso de ventiladores possibilitou reduzir a temperatura máxima em até 31°C comprovando sua eficácia.

Na Figura 5.6, pode-se observar os perfis de temperaturas máximas para as quatro condições estudadas neste trabalho. Foi comprovado que a condição de carga de natureza Não Linear provocou um maior aquecimento no núcleo do transformador, e pode ser vista na curva lilás que atinge valores de temperatura de até 20% acima dos casos com carga linear.

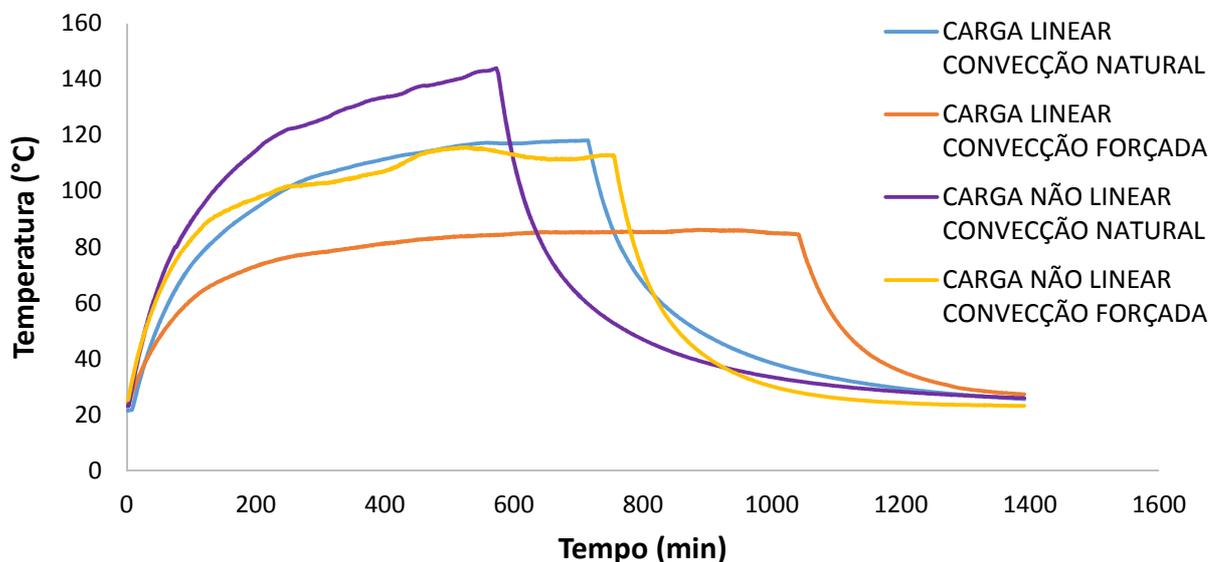


Figura 5.6 – Evolução temporal das temperaturas medidas para as condições de maiores aquecimentos.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 pode-se observar a comparação dos sensores do tipo Termopar K e PT100 fixados na mesma posição dentro do núcleo do transformador e submetidos a dois tipos de testes. A Figura 5.7 apresenta um teste com carga linear e convecção forçada onde o Termopar atingiu valores 3 % maiores do que as temperaturas medidas pelo PT100. Na Figura 5.8 é apresentado um teste com carga não linear com convecção natural, sendo que neste teste o Termopar detectou temperaturas 16 % maiores do que o PT100. Isto se deve ao fato de Termopares trabalharem melhor no regime transiente devido a resposta mais rápida e também pode-se afirmar que quanto maiores as temperaturas de trabalho maior a variação de medição

entre Termopar e PT100. Sendo assim, é possível afirmar que o Termopar é o sensor mais indicado para testes em transformadores garantindo maior precisão de medição.

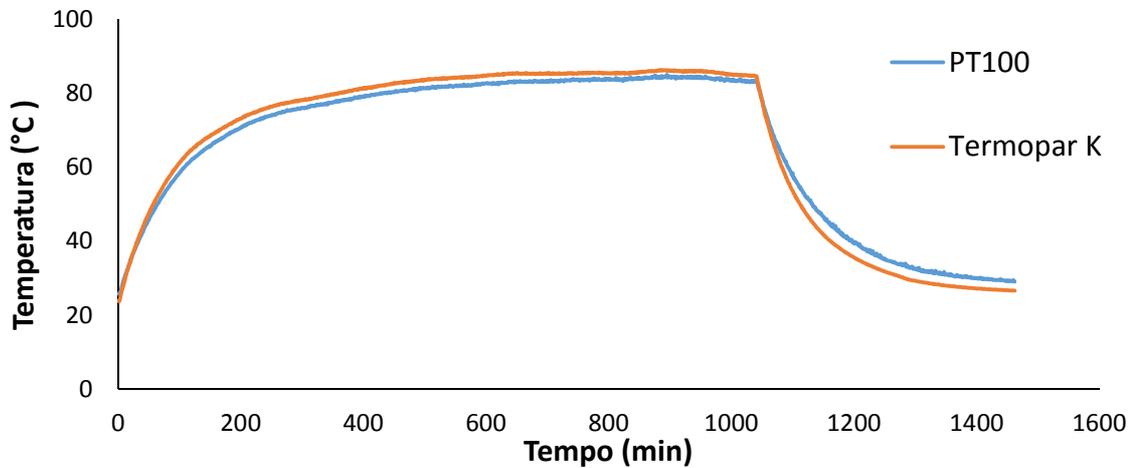


Figura 5.7 - Comparação de Sensores para Carga Linear com Convecção Forçada.

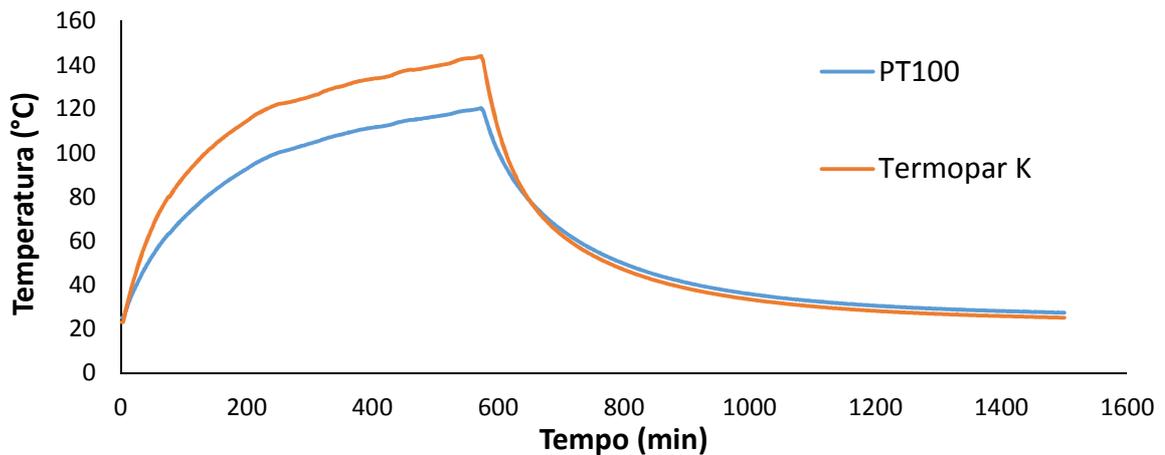


Figura 5.8 - Comparação de Sensores para Carga Não-Linear com Convecção Natural.

5.3 – Resultados da Simulação Numérica usando o COMSOL

O programa COMSOL 5.2 foi utilizado para simular a distribuição de temperatura no transformador a partir de um modelo tridimensional baseado o mais próximo possível das dimensões e materiais reais do transformador e também nas equações da difusão tanto para o regime transiente quanto para o permanente. As partes de ferro silício foram consideradas sólidas, ou seja, a fabricação delas em chapas sobrepostas não foi considerada devido as perdas no ferro serem muito inferiores as perdas no cobre. O enrolamento foi desenhado levando em conta as

camadas de papel Kraft e espaçamentos de ar. A malha tetraédrica gerada pelo COMSOL para a simulação numérica possui 1745736 elementos e está representada na Figura 5.9. A precisão é aumentada dos enrolamentos onde a malha é mais densa.

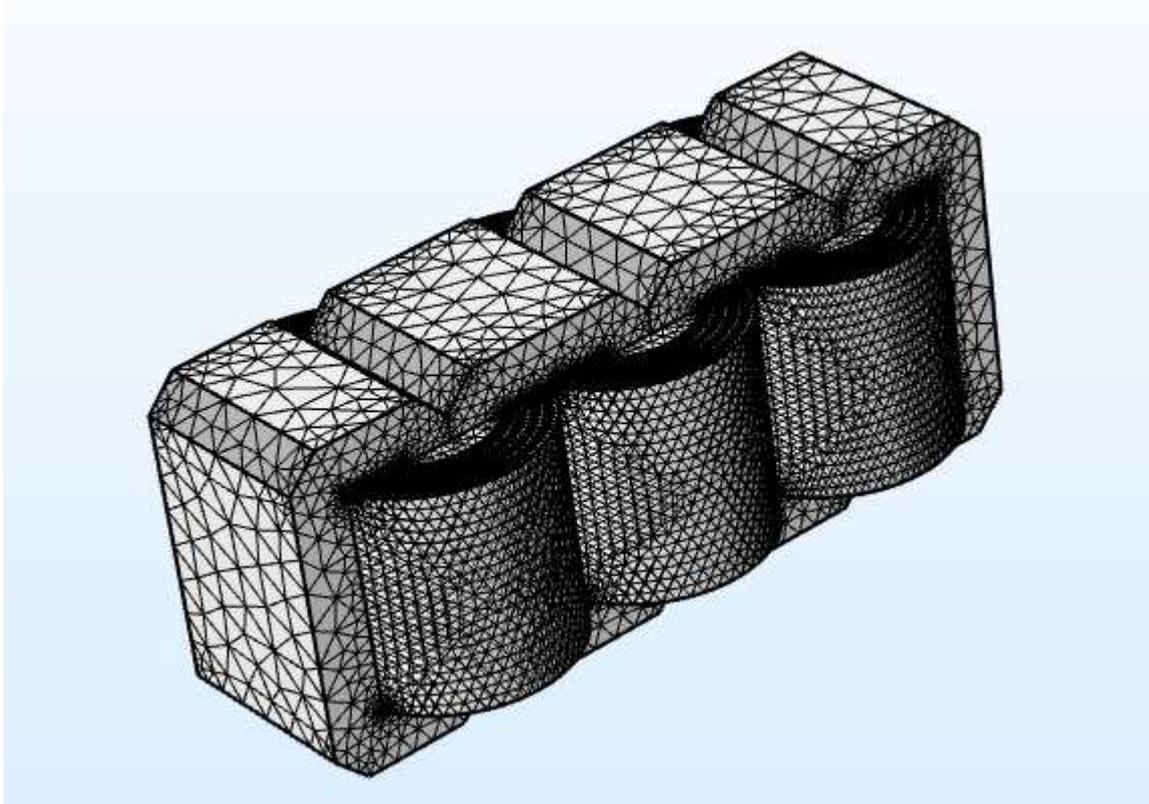


Figura 5.9 – Malha Tetraédrica gerada para simulação numérica com o programa COMSOL.

A geração interna utilizada na simulação foi calculada a partir dos valores de taxa de transferência de calor para cada tipo de carga, apresentados no Apêndice A. Sendo necessário dividir este valor de perda em Watts pelo volume dos 3 enrolamentos no valor de $0,00126 \text{ m}^3$ para assim encontrar a geração volumétrica em W/m^3 . Para a carga linear foi determinada a geração interna de $91269 \text{ W}/\text{m}^3$ para carga não linear a geração interna de $94912 \text{ W}/\text{m}^3$.

Para a condição de convecção natural foi utilizado um coeficiente médio de transferência de calor por convecção de $6,49 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ para carga linear e $6,83 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ para carga não linear. Para convecção forçada foi utilizado o valor de $13,32 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ para carga linear e $13,09 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ para carga não linear. O procedimento usado para obtenção destes valores de \bar{h} estão descritos no Apêndice A. Para a radiação foi utilizado a emissividade 0,9 obtida experimentalmente conforme descrito no Capítulo 4. Valores de temperatura inicial foram obtidos dos testes experimentais realizados.

Na Figura 5.10 é mostrada a evolução temporal dos campos de temperatura no núcleo do transformador. As partes de cor mais avermelhada representam as mais altas temperaturas, próximas ao centro dos enrolamentos. As temperaturas nas partes de ferro silício são mais brandas devido as perdas maiores se concentrarem nos enrolamentos. Esta simulação foi feita com as gerações internas referentes ao uso de carga não linear com resfriamento por convecção natural. Condição que representou nos testes experimentais a situação mais crítica de aquecimento do núcleo.

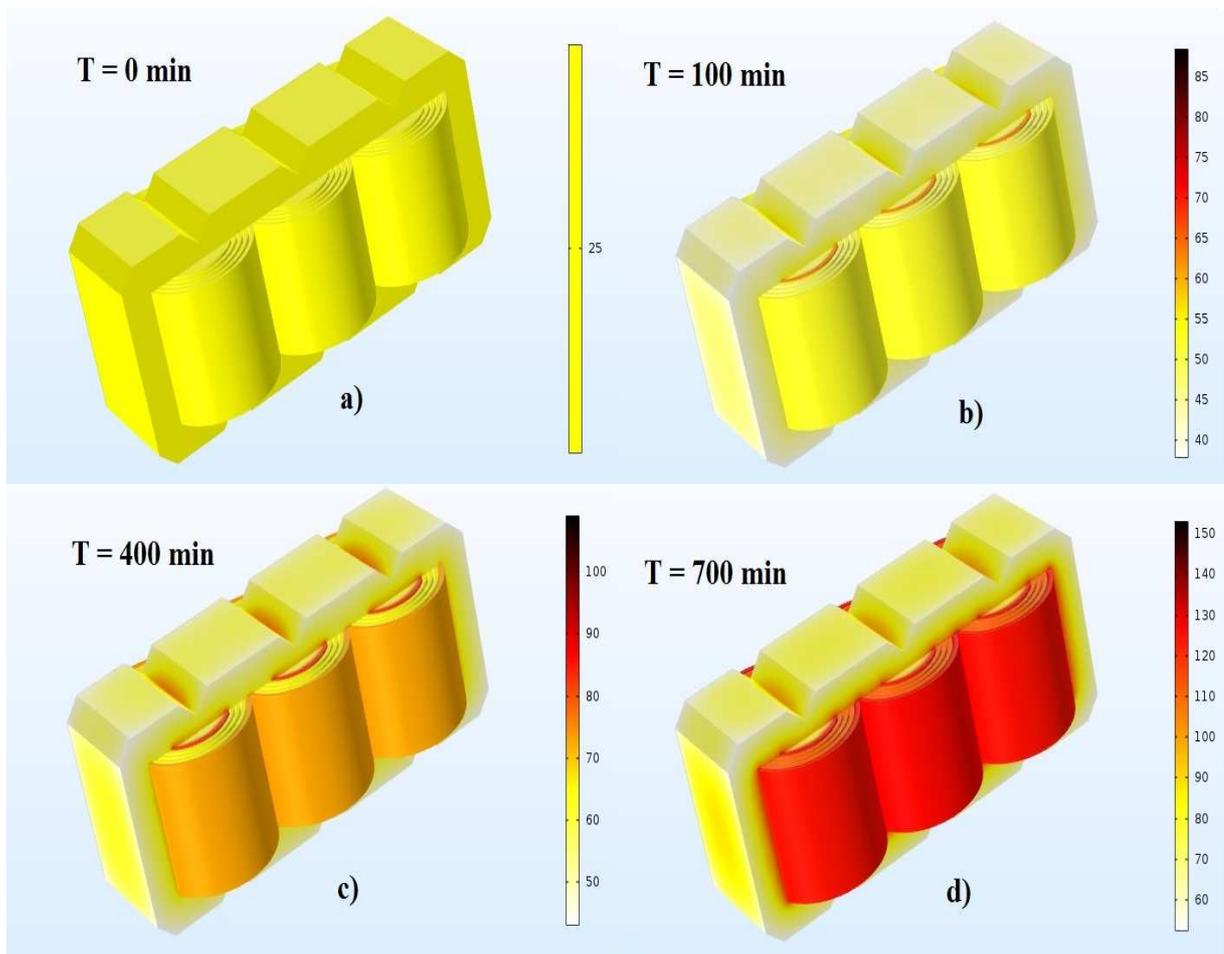


Figura 5.10 – Evolução temporal dos campos de temperatura a partir da simulação, para os instantes de aquecimento.

5.3.1 – Comparação entre resultados numéricos e experimentais

A partir dos dados obtidos pode ser feita uma comparação entre resultados numéricos obtidos pelo programa COMSOL e os dados experimentais. Nas Figuras 5.11, 5.13, 5.15 e 5.17 são mostradas as curvas obtidas pela simulação comparadas com a curvas experimentais para os 4 casos de carga e convecção utilizados. Nas Figuras 5.12, 5.14, 5.16 e 5.18 são mostradas as

curvas de resíduos calculados pela diferença percentual entre as temperaturas experimentais e numéricas para cada caso estudado. A posição de comparação é referente ao sensor 118 para as curvas experimentais e para a simulação foi utilizada as mesmas coordenadas de posição do sensor 118.

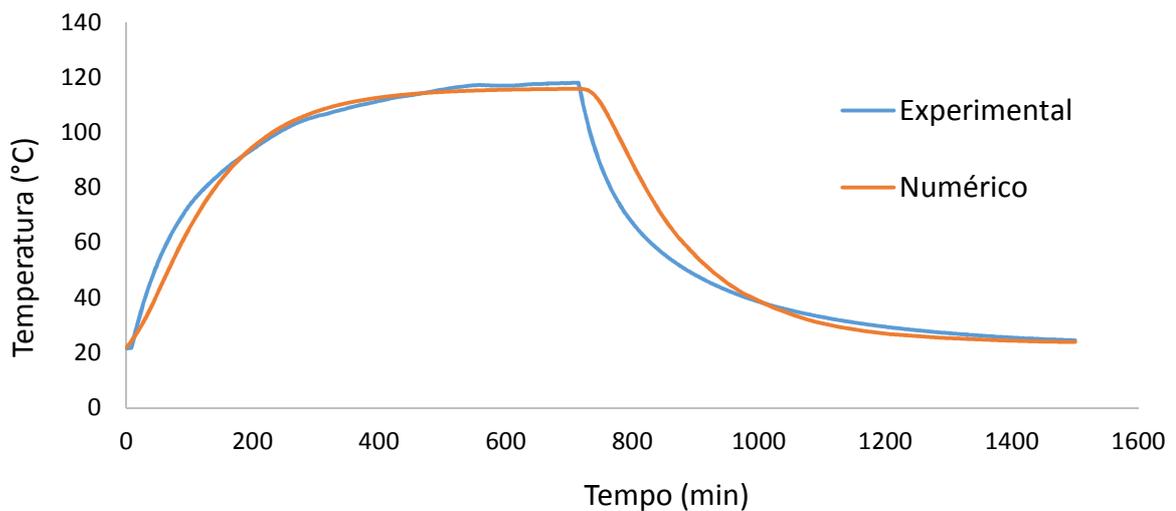


Figura 5.11– Comparação entre temperatura numérica e experimental para a condição de carga linear com convecção natural.

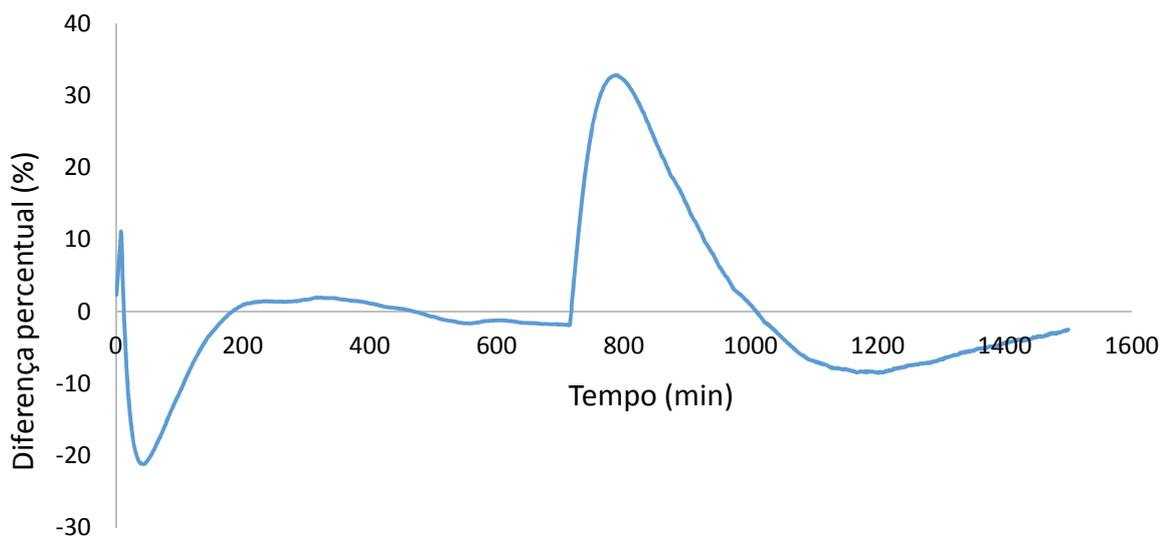


Figura 5.12 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga linear com convecção natural.

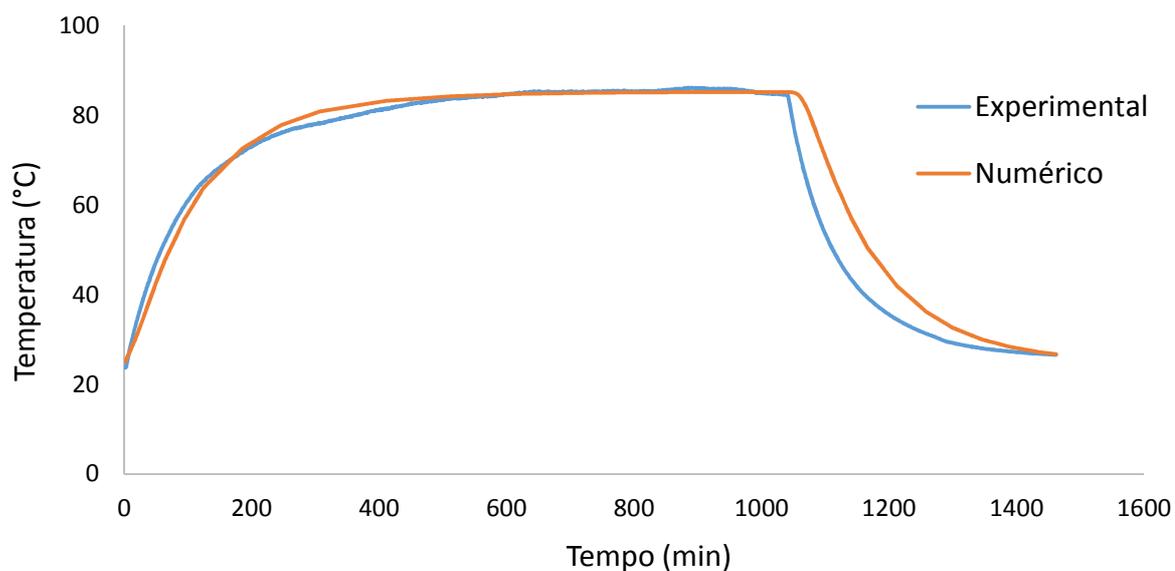


Figura 5.13 – Comparação entre a temperatura numérica e experimental para condição de carga linear com convecção forçada.

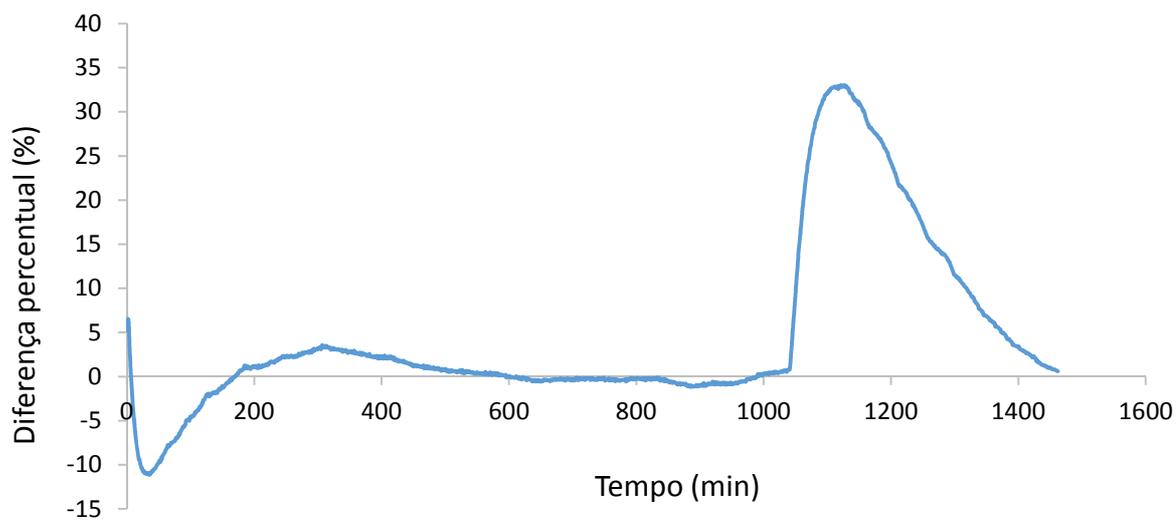


Figura 5.14 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga linear com convecção forçada.

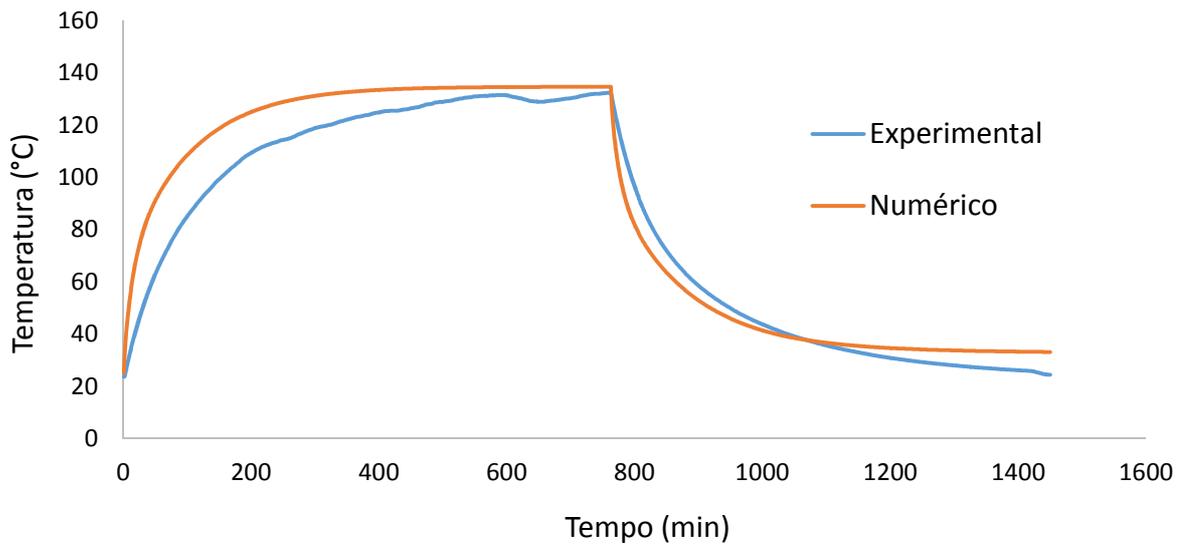


Figura 5.15 – Comparação entre temperatura numérica e experimental par condição de carga não linear com convecção natural.

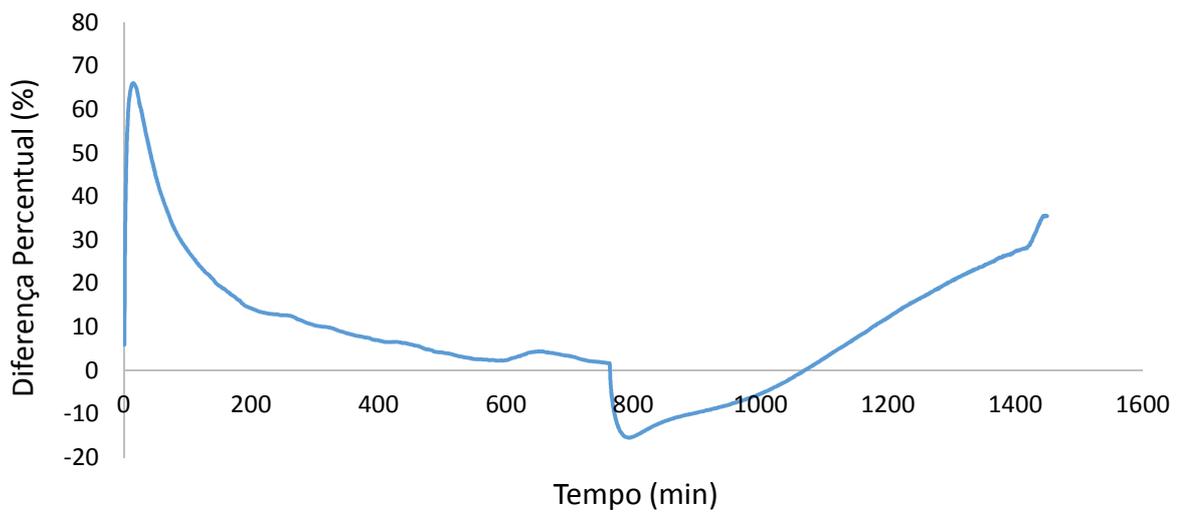


Figura 5.16 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga não linear com convecção natural.

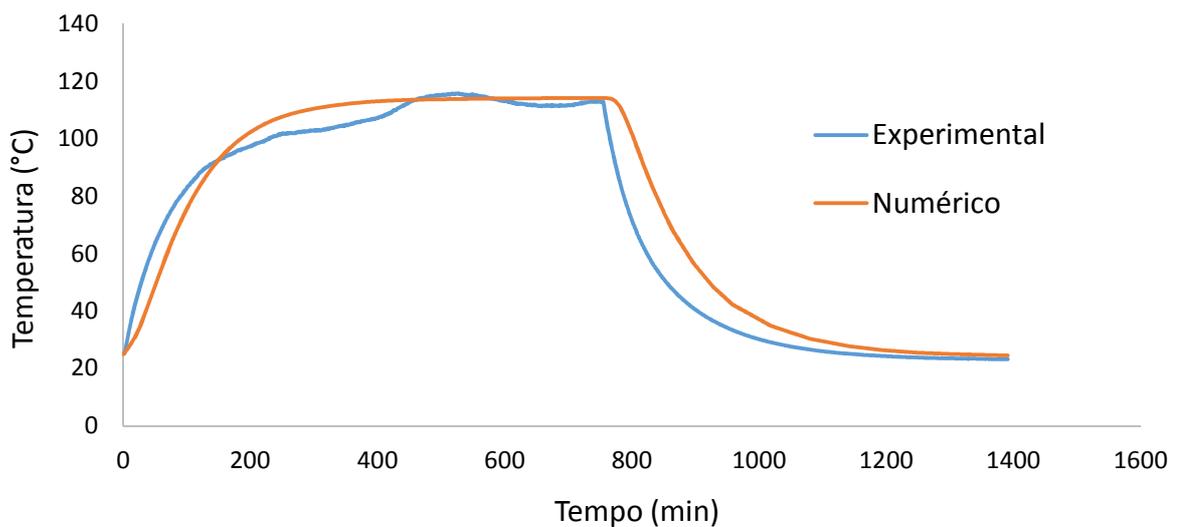


Figura 5.17 – Comparação entre temperatura numérica e experimental para condição de carga não linear com convecção forçada.

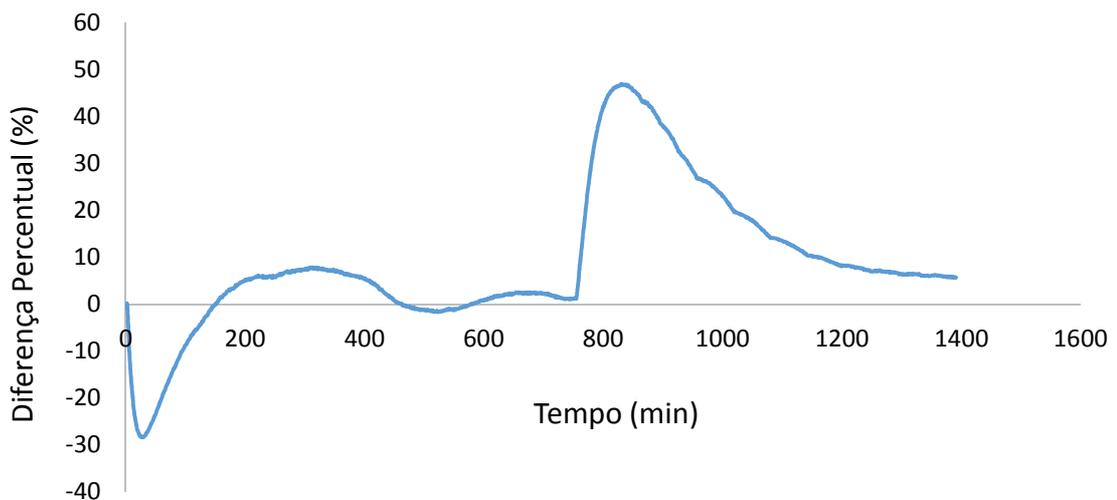


Figura 5.18 – Percentual dos resíduos na comparação dos valores de temperatura numérica em relação a experimental para carga não linear com convecção forçada.

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 5.11 a 5.18, observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, principalmente na região que representa o aquecimento. Analisando os resíduos, observa-se que a diferença máxima para a maioria das condições analisadas foi menor que 10% na região de aquecimento. Os picos maiores encontrados nas figuras de resíduos ocorreram nos momentos iniciais quando carga é ligada e a partir do momento que ela é desligada. Estes pontos não são relevantes e não foram levados em

consideração na análise, pois durante o tempo de aquecimento as variações foram mínimas. Levando-se em conta todas as hipóteses simplificadoras do problema e as dificuldades em se fazer a geometria, pode-se dizer que os resultados foram satisfatórios.

5.4 – *Hot Spots*

A partir dos resultados do campo de temperatura fornecidos pelo COMSOL foi possível determinar os pontos de maior temperatura (*Hot Spots*) para cada tipo de carga. Na Tabela 5.2 mostra-se os *Hot Spots* para cada tipo de carga e suas coordenadas onde o centro geométrico do núcleo é o ponto (0,0,0). É possível notar que o valor máximo de 153,29 °C ocorre na simulação com carga não linear e convecção natural. Como era esperado, porém o valor ultrapassa e muito o limite de 130 °C suportado pelo isolamento do transformador. Este fato comprova que a carga não linear é prejudicial a vida útil do transformador, entretanto os *Hot Spots* gerados por cargas lineares não atingiram o limite de temperatura do isolamento.

Tabela 5.2 – Temperaturas e Coordenadas dos *Hot Spots* de acordo com a natureza da carga.

Tipo de Carga e Resfriamento	Temperatura (°C)	Coordenadas (x,y,z)
Linear Natural	109,25	(102,5;-63,43;0,63)
Linear Forçada	88,65	(100;-60,53;-0,49)
Não Linear Natural	153,29	(103;-63,43;0,63)
Não Linear Forçada	113,38	(101,6;-60,53;0,49)

Nas Figuras 5.19 a 5.22 são apresentados os campos de temperatura no núcleo do transformador com a localização visual do *Hot Spot* para cada configuração de carga e convecção. A partir das coordenadas dos *Hot Spots*, nota-se que as maiores temperaturas não se encontram no enrolamento 2, como era esperado, as aproximações e as pequenas variações entre as temperaturas de cada núcleo fazem que os *Hot Spots* oscilem entre o interior dos núcleos 2 e 3.

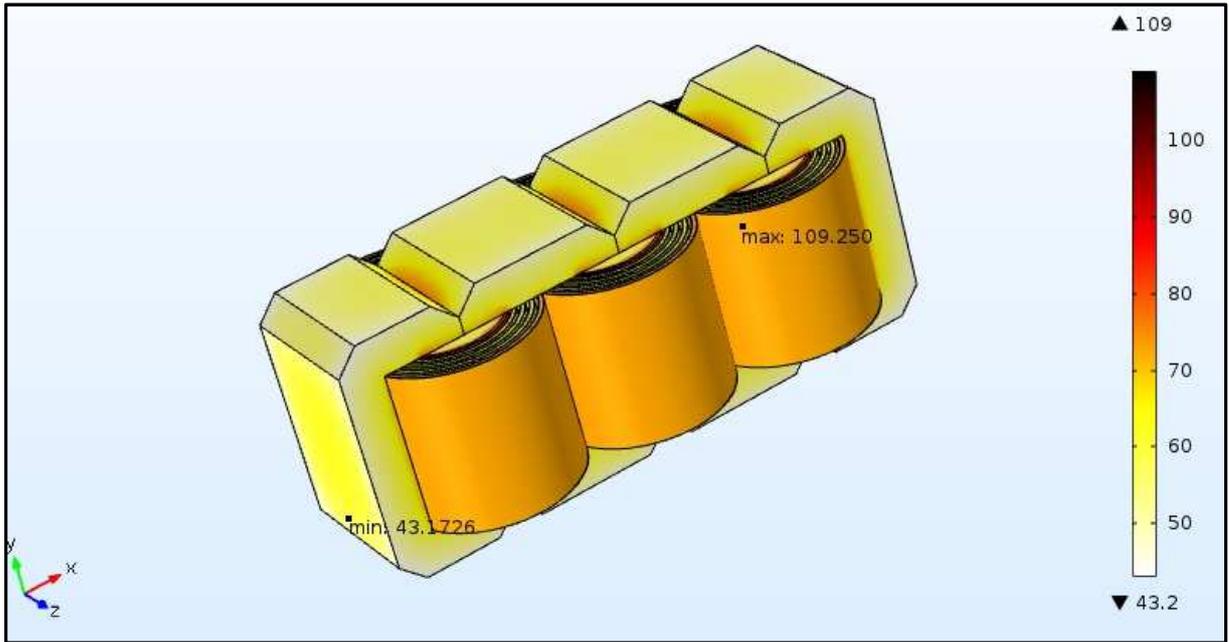


Figura 5.19 – Localização do Hot Spot para configuração de carga linear com convecção natural.

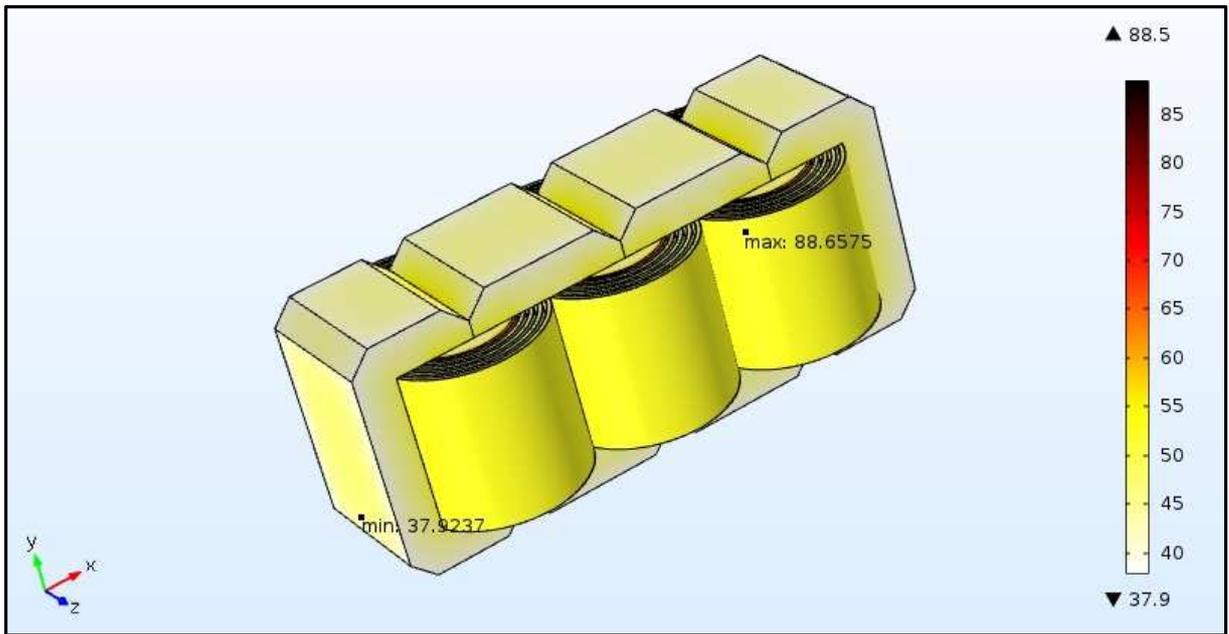


Figura 5.20 – Localização do Hot Spot para configuração de carga linear com convecção forçada.

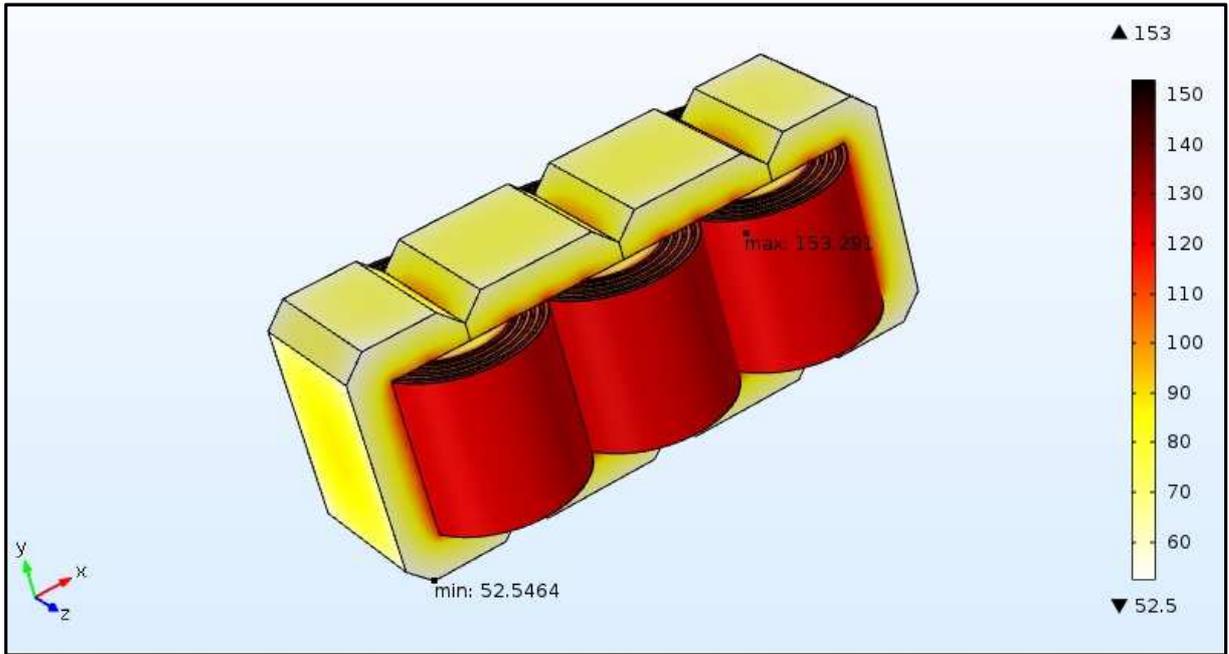


Figura 5.21 – Localização do Hot Spot para configuração de carga não linear com convecção natural.

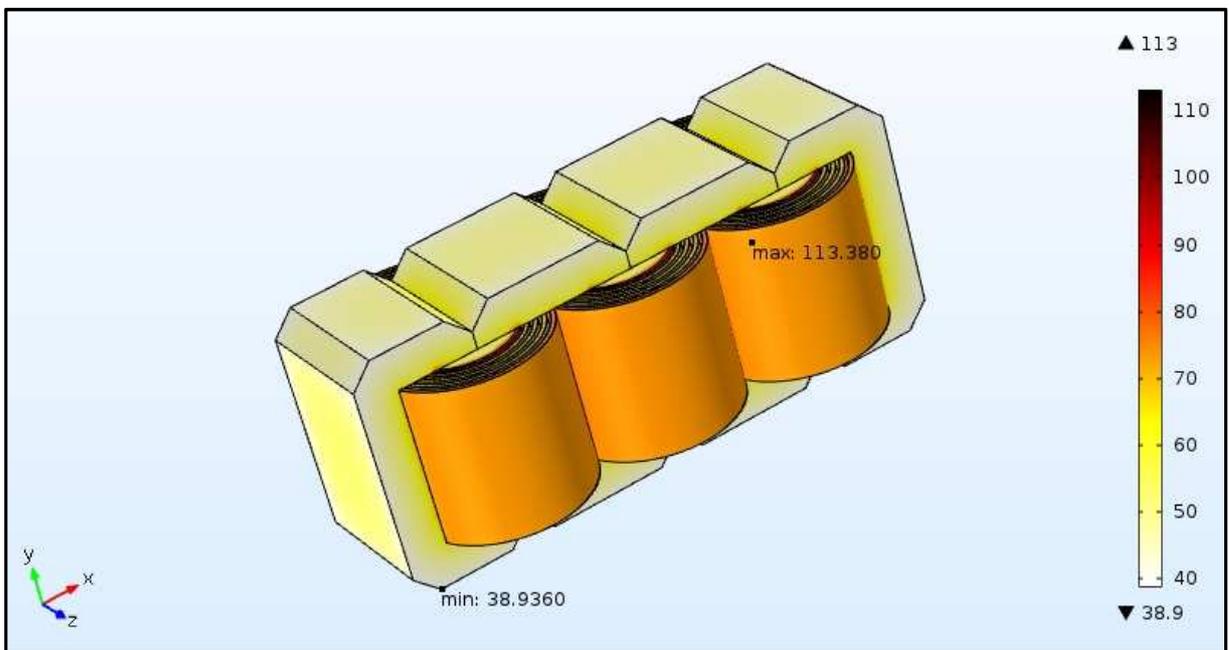


Figura 5.22 – Localização do Hot Spot para configuração de carga não linear com convecção forçada.

6 - Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para análise numérica e experimental do comportamento térmico do núcleo de um transformador de 5 Kva à seco sujeito a cargas tanto de origem lineares quanto não lineares.

Foi desenvolvido um sistema de resfriamento forçado dentro do núcleo usando ventiladores dentro do tanque que conseguiu reduzir a temperatura do núcleo a valores aceitáveis mesmo com carga não linear capacitiva. Ficou comprovado que este procedimento pode ser usado para reduzir a temperatura em projetos de transformadores à seco.

Uma outra comprovação foi que os termopares apresentaram melhores resultados para medição de temperatura, principalmente quando o tempo foi considerado no estudo, ou seja, a análise transiente, onde foram obtidas leituras de temperatura até 16 % maiores em relação aos sensores PT100. Assim conforme um dos objetivos deste trabalho, comprovou-se que o sensor mais indicado para medições de temperatura em transformadores à seco é o Termopar.

A simulação numérica utilizando o programa COMSOL provou sua eficácia pela proximidade entre os valores de temperatura numéricos e experimentais. Também foi possível comprovar o efeito da carga não linear de origem capacitiva no acréscimo de temperatura do núcleo, quantificando este acréscimo e localizando os pontos onde ocorrem maiores temperaturas. A análise numérica possibilitou a determinação de *Hot Spots* no núcleo para cada tipo de carga e convecção utilizado. O uso das correlações empíricas da literatura permitiu obter com exatidão os valores do coeficiente médio de transferência de calor por convecção. Um outro procedimento que possibilitou o conhecimento com precisão da taxa de transferência de calor perdida por radiação foi a utilização de uma câmera termográfica. Além disso, o desenho da geometria em CAD do núcleo possibilitou que a análise numérica usando COMSOL pudesse ser realizada. Assim com uma boa precisão do conhecimento dos valores de \bar{h} e de ϵ do desenho do núcleo foi possível estudar o transformador da forma mais realista possível.

6.1 - Sugestões para Trabalhos Futuros

A simulação numérica desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada para analisar o comportamento térmico de transformadores diferentes potencias e também transformadores resfriados a óleo.

A determinação dos Hot Spots pode também ser utilizada para trabalhos de otimização e eficiência térmica de transformadores.

Um aprimoramento da simulação utilizando CFD para determinar o comportamento térmico dos fluidos em volta do núcleo também pode ser aplicado.

Como as propriedades térmicas neste trabalho foram consideradas constantes, também é possível utilizar propriedades térmicas variando com o tempo na simulação numérica.

Apêndice A – Determinação do Coeficiente Médio de Transferência de Calor por Convecção e das Taxas de Transferência de Calor por Convecção e Radiação.

Utilizando as correlações empíricas mencionadas no Capítulo 3 foi possível obter os resultados do coeficiente médio de transferência de calor por convecção utilizados para cálculo da taxa de transferência de calor perdida por convecção. A área de superfície superior do núcleo utilizada nos cálculos com convecção forçada é mostrada na Figura A.1, e a área utilizada para convecção natural nas laterais dos enrolamentos é mostrada na Figura A.2. O ajuste das propriedades do ar para as condições do ambiente e todos os cálculos de taxa de transferência de calor foram feitos com o uso do programa matemático Maple 18. Como as propriedades térmicas variam com a temperatura, a temperatura do ar foi atualizada de acordo com as condições dos testes.

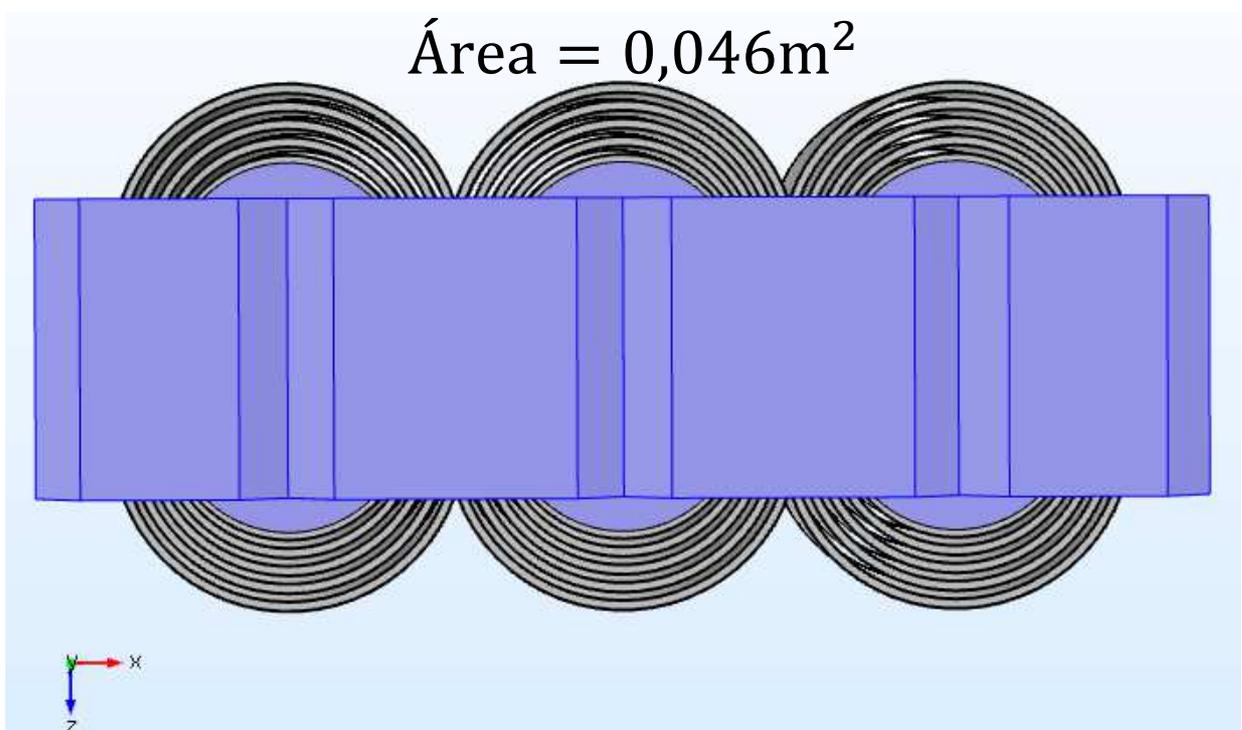


Figura A.1 – Área de superfície do núcleo.

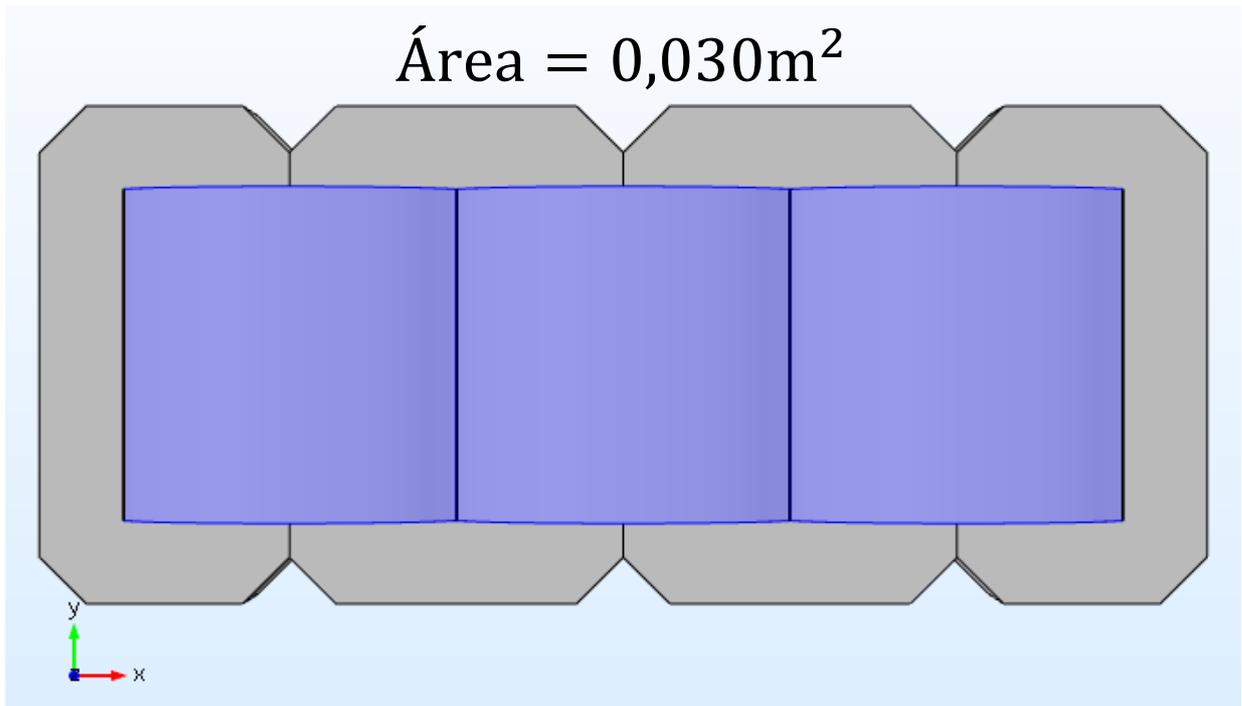


Figura A.2– Área lateral do núcleo.

Para determinar a taxa de transferência de calor por convecção com carga linear foi utilizada a temperatura ambiente média de 298,93 K e a temperatura máxima atingida no núcleo que foi de 391,2 K. Utilizando as correlações empíricas apresentadas no Capítulo 3 foi encontrado o valor do \bar{h}_L de 6,49 W/m²K, e a taxa de transferência de calor perdida por convecção de 18,80 W para um enrolamento e 56,42 W nos três enrolamentos. Para a configuração de carga linear e convecção forçada foi utilizado o valor de 301,29 K para a temperatura ambiente e 365,43 K para a temperatura máxima do enrolamento. Para esta condição o valor de \bar{h}_f é de 13,32 W/m²K e a taxa de transferência de calor perdida por convecção forçada é de 39,81 W. Já para o cálculo da taxa de transferência de calor por convecção natural com a configuração de carga não linear foi utilizado o valor de 298,29 K para a temperatura ambiente e para a temperatura máxima do enrolamento foi utilizado o valor de 417,02 K, obtendo o valor de \bar{h}_L de 6,83 W/m²K, a taxa de transferência de calor de 25,47 W para 1 enrolamento e 76,43 W para três enrolamentos. Por último a configuração de carga não linear com convecção forçada, com o valor de 301,29 K para a temperatura ambiente e 386,01 K para a temperatura máxima do enrolamento. Foi obtido para esta configuração o valor de \bar{h}_f de 13,09 W/m²K e 51,66 W para a taxa de transferência de calor.

Para a radiação foram utilizados valores de temperatura de superfície do núcleo e a temperatura ambiente. Para essa região do núcleo foi utilizada a emissividade 0,9 conforme mencionado no Capítulo 4. A área de superfície do núcleo calculada foi de 0,030144 m². Para a condição de carga linear foi utilizado o valor de 356,58 K para a temperatura do núcleo e 298,93 K para a temperatura ambiente, obtendo assim o valor de 37,75 W para a taxa de transferência de calor por radiação. Para o caso de carga linear com convecção forçada foi utilizado o valor de 300,08 K para a temperatura ambiente, para a superfície do enrolamento o valor de 329,08 K, obtendo assim 16 W para a taxa de transferência de calor por radiação. Para carga não linear foi utilizado 299,12 K para a temperatura ambiente, 364,03 K para a superfície do núcleo obtendo o valor de 44 W para a taxa de transferência de calor por radiação. Finalmente para a condição de carga não linear com convecção forçada foi utilizado 299,64 para a temperatura ambiente, 336,79 para a superfície do núcleo, obtendo 22,17 W para taxa de transferência de calor por radiação.

Apresenta-se os cálculos realizados e todo o procedimento para obtenção dos valores do coeficiente médio de transferência de calor e as taxas de transferência de calor por convecção e radiação.

A-1: Equações de ajuste das propriedades térmicas do ar com base na temperatura ambiente T .

```

> restart;
> T := 357.9770000;
                                     T := 357.9770000

> k := -3·10-8·T2 + 9·10-5·T + 0.0005;
                                     k := 0.02887350402

> μ := -3E-11·T2 + 7E-08·T + 1E-06;
                                     μ := 0.00002221396402

> ν := 1E-10·T2 + 4E-08·T - 4E-06;
                                     ν := 0.00002313383325

> Cp := 0.0004·T2 - 0.226·T + 1035.9;
                                     Cp := 1006.256211

> Pr := 5E-07·T2 - 0.0005·T + 0.8159;
                                     Pr := 0.7009852662

> α := 2E-10·T2 + 4E-08·T - 3E-06;
                                     α := 0.00003694858650

```

A-2: Cálculos do Coeficiente Médio de Transferência de Calor e Taxa de Transferência de Calor por Convecção Natural para a Carga Linear.

```

> restart;
>
> A := 2·3.14·0.05·0.1;
                                     A := 0.03140
> Tinf := 298.93;
                                     Tinf := 298.93
> Ts := 391.2;
                                     Ts := 391.2
> Tf :=  $\frac{Tinf + Ts}{2}$ ;
                                     Tf := 345.0650000
> v := 1E-10·Ts2 + 4E-08·Ts - 4E-06;
                                     v := 0.000026951744
> B :=  $\frac{1}{Tf}$ ;
                                     B := 0.002898004724
> g := 9.81;
                                     g := 9.81
> L1 := 0.1;
                                     L1 := 0.1
> Cp := 0.0004·Ts2 - 0.226·Ts + 1035.9;
                                     Cp := 1008.703776
> μ := -3E-11·Ts2 + 7E-08·Ts + 1E-06;
                                     μ := 0.0000237928768
> k := -3·10-8·Ts2 + 9·10-5·Ts + 0.0005;
                                     k := 0.03111687680
> Pr :=  $\frac{Cp·μ}{k}$ ;
                                     Pr := 0.7712844970
> Gr1 :=  $\frac{g·B·(Ts - Tinf)·L1^3}{v^2}$ ;
                                     Gr1 := 3.611227685 106
> Ra1 := Gr1·Pr;
                                     Ra1 := 2.785283929 106
> NusseltL :=  $\left( \frac{0.825 + 0.387·Ra1^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$ ;
                                     NusseltL := 20.86275692

```

> $hL := \frac{k \cdot NusseltL}{Ll}$
 $hl := 6.491838368$
 > $q := hL \cdot A \cdot (Ts - Tinf);$
 $q := 18.80866049$
 > $qtotal := 3 \cdot q;$
 $qtotal := 56.42598147$

A-3: Cálculos do \bar{h}_f e Taxa de Transferência de Calor por Convecção Forçada para a Carga Linear

> *restart;*
 > $A := 0.35 \cdot 0.09 + 3 \cdot (3.14 \cdot 0.04^2);$
 $A := 0.046572$
 > $L := 0.35;$
 $L := 0.35$
 > $r := 0.4;$
 $r := 0.4$
 > $As := 3.14 \cdot r^2;$
 $As := 0.5024$
 > $Ds := 0.2;$
 $Ds := 0.2$
 > $H := 0.26;$
 $H := 0.26$
 > $Ar := \frac{Ds^2}{4 \cdot r^2};$
 $Ar := 0.06250000000$
 > $Vs := 4.2;$
 $Vs := 4.2$
 > $Ps := 2 \cdot 3.14 \cdot r;$
 $Ps := 2.512$
 > $Dh := \frac{4 \cdot As}{Ps};$
 $Dh := 0.8000000000$
 > $Tinf := 28.29 + 273;$
 $Tinf := 301.29$
 > $Ts := 92.43 + 273;$
 $Ts := 365.43$
 > $Tf := \frac{Tinf + Ts}{2};$
 $Tf := 333.3600000$

```

> G := 2 \cdot Ar^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{1 - 2 \cdot 2 \cdot Ar^{\frac{1}{2}}}{1 + 0.2 \cdot \left( \frac{H}{Ds} - 6 \right) \cdot Ar^{\frac{1}{2}}} \right);
G := 0.2941176470

> v := 0.00002397110849;
v := 0.00002397110849

>
>
> Rey := \frac{Vs \cdot Ds}{v};
Rey := 35042.18423

> Cp := 1006.728454;
Cp := 1006.728454

> \mu := 0.00002257392745;
\mu := 0.00002257392745

> k := 0.02938252745;
k := 0.02938252745

> Pr := \frac{Cp \cdot \mu}{k};
Pr := 0.7734465702

> \frac{H}{Dh};
0.3250000000

>
> Nuf := Pr^{0.42} \cdot G \cdot \left( 2 \cdot Rey^{\frac{1}{2}} \cdot \left( 1 + 0.005 \cdot Rey^{0.55} \right)^{\frac{1}{2}} \right)
N := 158.7624041

> hf := \frac{k \cdot Nuf}{L}
h := 13.32811627

> qconv := hf \cdot A \cdot (Ts - Tinf)
qconv := 39.81279036

```

A-4: Cálculos do \bar{h}_L e Taxa de Transferência de Calor por Convecção Natural para a Carga Não Linear.

```

> restart;
>
> A := 2 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 0.05 \cdot 0.1;
A := 0.03140

> Tinf := 298.29;
Tinf := 298.29

> Ts := 417.02;

```

$T_s := 417.02$

> $T_f := \frac{T_{inf} + T_s}{2};$
 $T_f := 357.6550000$

> $v := 1E-10 \cdot T_s^2 + 4E-08 \cdot T_s - 4E-06;$
 $v := 0.00003007136804$

> $B := \frac{1}{T_f};$
 $B := 0.002795990550$

> $g := 9.81;$
 $g := 9.81$

> $Ll := 0.1;$
 $Ll := 0.1$

> $C_p := 0.0004 \cdot T_s^2 - 0.226 \cdot T_s + 1035.9;$
 $C_p := 1011.215752$

> $\mu := -3E-11 \cdot T_s^2 + 7E-08 \cdot T_s + 1E-06;$
 $\mu := 0.00002497422959$

> $k := -3 \cdot 10^{-8} \cdot T_s^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot T_s + 0.0005;$
 $k := 0.03281462959$

> $Pr := \frac{C_p \cdot \mu}{k};$
 $Pr := 0.7696059555$

> $Gr_l := \frac{g \cdot B \cdot (T_s - T_{inf}) \cdot Ll^3}{v^2};$
 $Gr_l := 3.601295867 \cdot 10^6$

> $Ra_l := Gr_l \cdot Pr;$
 $Ra_l := 2.771578747 \cdot 10^6$

> $NusseltL := \left(\frac{0.825 + 0.387 \cdot Ra_l^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2;$
 $NusseltL := 20.82708678$

> $hL := \frac{k \cdot NusseltL}{Ll};$
 $hl := 6.834331381$

> $q := hL \cdot A \cdot (T_s - T_{inf});$
 $q := 25.47922118$

> $q_{total} := 3 \cdot q;$
 $q_{total} := 76.43766354$

A-5: Cálculo do \bar{h}_f e da Taxa de Transferência de Calor por Convecção Forçada para a Carga Não Linear.

```

> restart;
> A := 0.35·0.09 + 3·(3.14·0.042);
                                     A := 0.046572
> L := 0.35;
                                     L := 0.35
> r := 0.4;
                                     r := 0.4
> As := 3.14·r2;
                                     As := 0.5024
> Ds := 0.2;
                                     Ds := 0.2
> H := 0.26;
                                     H := 0.26
> Ar :=  $\frac{Ds^2}{4·r^2}$ ;
                                     Ar := 0.06250000000
> Vs := 4.2;
                                     Vs := 4.2
> Ps := 2·3.14·r;
                                     Ps := 2.512
> Dh :=  $\frac{4·As}{Ps}$ ;
                                     Dh := 0.8000000000
> Tinf := 28.29 + 273;
                                     Tinf := 301.29
> Ts := 113.01 + 273;
                                     Ts := 386.01
> Tf :=  $\frac{Tinf + Ts}{2}$ ;
                                     Tf := 343.6500000
> G :=  $2·Ar^{\frac{1}{2}} · \left( \frac{1 - 2.2·Ar^{\frac{1}{2}}}{1 + 0.2·\left(\frac{H}{Ds} - 6\right)·Ar^{\frac{1}{2}}} \right)$ ;
                                     G := 0.2941176470
> v := 0.00002634077201;
                                     v := 0.00002634077201
>
>
> Rey :=  $\frac{Vs·Ds}{v}$ ;

```

```

Rey := 31889.72592
> Cp := 1008.263228;
Cp := 1008.263228
> μ := 0.00002355058840;
μ := 0.00002355058840
> k := 0.03077078840;
k := 0.03077078840
> Pr :=  $\frac{Cp \cdot \mu}{k}$ ;
Pr := 0.7716796844
>  $\frac{H}{Dh}$ ;
0.3250000000
>
> Nuf := Pr0.42 · G ·  $\left( 2 \cdot Rey^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 0.005 \cdot Rey^{0.55})^{\frac{1}{2}} \right)$ 
N := 148.9484711
> hf :=  $\frac{k \cdot Nuf}{L}$ 
h := 13.09503396
> qconv := hf · A · (Ts - Tinf)
qconv := 51.66750200

```

A-6: Cálculo da Taxa de Transferência de Calor Perdida por Radiação nos Enrolamentos para Carga Linear com Convecção Natural

```

> restart;
> ε := 0.90;
ε := 0.90
> A := 3.14 · 0.042 + 2 · 3.14 · 0.04 · 0.1;
A := 0.030144
> σ := 5.670 · 10-8;
σ := 5.670000000 10-8
> Ts := 83.58 + 273;
Ts := 356.58
> Tinf := 298.929;
Tinf := 298.929
> hr :=  $\frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - Tinf^4)}{(Ts - Tinf)}$ ;
hr := 7.242322527
>
> qr := hr · A · (Ts - Tinf);
qr := 12.58593799

```

```
> qrtotal := 3·qr;
                                qrtotal := 37.75781397
```

A-7: Cálculo da Taxa de Transferência de Calor Perdida por Radiação nos Enrolamentos para Carga Linear com Convecção Forçada.

```
> restart;
> ε := 0.90;
                                ε := 0.90

> A := 3.14·0.042 + 2·3.14·0.04·0.1;
                                A := 0.030144

> σ := 5.670·10-8;
                                σ := 5.670000000 10-8

> Ts := 56.089 + 273;
                                Ts := 329.089

> Tinf := 27.085 + 273;
                                Tinf := 300.085

> hr :=  $\frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - Tinf^4)}{(Ts - Tinf)}$ ;
                                hr := 6.368392246

>
> qr := hr·A·(Ts - Tinf);
                                qr := 5.567863536

> qrtotal := 3·qr;
                                qrtotal := 16.70359061
```

A-8: Cálculo da Taxa de Transferência de Calor Perdida por Radiação nos Enrolamentos para Carga Não Linear com Convecção Natural

```
> restart;
> ε := 0.90;
                                ε := 0.90

> A := 3.14·0.042 + 2·3.14·0.04·0.1;
                                A := 0.030144

> σ := 5.670·10-8;
                                σ := 5.670000000 10-8

> Ts := 91.036 + 273;
                                Ts := 364.036

> Tinf := 26.121 + 273;
                                Tinf := 299.121

> hr :=  $\frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - Tinf^4)}{(Ts - Tinf)}$ ;
                                hr := 7.512530671

>
```

```

> qr := hr·A·(Ts - Tinf);
qr := 14.70050319

> qrtotal := 3·qr;
qrtotal := 44.10150957

```

A-9: Cálculo da Taxa de Transferência de Calor Perdida por Radiação nos Enrolamentos para Carga Linear com Convecção Forçada.

```

> restart;
> ε := 0.90;
ε := 0.90

> A := 3.14·0.042 + 2·3.14·0.04·0.1;
A := 0.030144

> σ := 5.670·10-8;
σ := 5.670000000 10-8

> Ts := 63.794 + 273;
Ts := 336.794

> Tinf := 26.646 + 273;
Tinf := 299.646

> hr :=  $\frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - Tinf^4)}{(Ts - Tinf)}$ ;
hr := 6.600016870

>
> qr := hr·A·(Ts - Tinf);
qr := 7.390628349

> qrtotal := 3·qr;
qrtotal := 22.17188505

```

Apêndice B - Geração Interna de Calor

A partir da literatura pode-se afirmar que a parcela mais significativa de geração interna de calor, é baseada no efeito joule devido a passagem de corrente nos enrolamentos (Pierce 1994 e Tsili et al., 2011). As correntes parasitas não foram consideradas como parcela de perda devido ao núcleo ser de ferro silício em lâminas que reduz consideravelmente o efeito destas correntes.

A partir das Tabelas B.1 e B.2 é possível notar que a maior quantidade de calor é gerado com a configuração de carga não linear e convecção natural dando um total de 76,43 W para a taxa de transferência de calor por convecção e 44,10 W para a taxa de transferência de calor por radiação. Somando as taxas de transferência de calor perdida por convecção e radiação foi encontrado o valor de 120,53 W.

As perdas elétricas foram calculadas a partir do efeito Joule onde foi necessário encontrar a resistência elétrica do enrolamento através de um multímetro digital, que foi de 0,11 Ohms, a corrente nominal sob a condição de carga máxima foi de 13.2 Amperes, utilizando a relação da literatura $P = Ri^2$ foi encontrado o valor de 115 W de perda total nos 6 enrolamentos (primário e secundário) que constituem o transformador trifásico.

Tabela B.1 – Taxas de Transferência de Calor de Convecção.

Tipo de Carga e Resfriamento	Taxa de Transferência de Calor por Convecção (W)
Linear Convecção Natural	55,42
Linear Convecção Forçada	39,81
Não Linear Convecção Natural	76,43
Não Linear Convecção Forçada	51,66

Tabela B.2 – Taxas de Transferência de Calor por Radiação.

Tipo de Carga e Resfriamento	Taxa de Transferência de Calor por Radiação (W)
Linear Convecção Natural	37,75
Linear Convecção Forçada	16,70
Não Linear Convecção Natural	44,10
Não Linear Convecção Forçada	22,17

Pode-se notar que as perdas elétricas por efeito Joule são da ordem de 115 W enquanto que as taxas de transferência de calor perdidas pelo transformador na condição de carga não linear com convecção natural são próximas de 120 W. Esta diferença ainda seria mais expressiva se levado em conta efeitos de condução nas diversas áreas internas e externas do núcleo e também erros de aproximações para as correlações empíricas. Sendo assim, a temperatura excessiva no núcleo com a configuração de carga não linear e convecção forçada é justificada pela geração de calor superior as determinadas apenas por perdas elétricas.

B-1: Balanço de energia entre taxa de perdas elétricas calculadas e taxa de transferência de calor gerado no núcleo para a condição de carga não linear e convecção natural.

```

> restart;
> grad := 44.10;
                                     grad := 44.10
>
> qconv := 75.89;
                                     qconv := 75.89
>
> i := 13.2;
                                     i := 13.2
>
> R := 0.11;
                                     R := 0.11
>
> qger := 6·R·i2;
                                     qger := 114.9984
>
> qtermico := grad + qconv;
                                     qtermico := 119.99
>
> Bal := qtermico - qger;
                                     Bal := 4.9916

```

7 – Referências Bibliográficas

ASSEMBLEIA, A. J. B.; Simulação do Escoamento e Transferência de Calor em Transformadores de Potência, tese de mestrado, Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009, 95p.

BARROSO, R.; Simulation and Experimental Validation of the Core Temperature Distribution of a Three- Phase Transformer, COMSOL Conference in Curitiba, 2014.

BECHARA, R.; Análise de Falhas de Transformadores de Potência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica, 2010, 102p.

CAMARGO, J. M.; SOUTO, O. C. N.; PACHECO, C. R.; LIMA, A.; Estudo do Desempenho Térmico de Transformadores a Seco Alimentando Cargas Não Lineares, Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2005.

DEL TORO, V.; MARTINS, O. A.; Livro Fundamentos de Máquinas Elétricas, LTC, 1999.

GOUDA, O. E.; AMER, G. M.; SALEM, W. A. A.; Predicting Transformer Temperature Rise and Loss of Life in the Presence of Harmonic Load Currents, Aim Shams Engineering Journal, Vol. 3, pp. 113-121, 2012.

GRADNIK, T.; KONCAN-GRADNIK, M.; PETRIC, N.; MUC, N.; Experimental Evaluation of Water Content Determination in Transformer Oil Moisture Sensor, Elektrotehniko Milan Vidmar, International Conference on Dielectric Liquids, Ljubljana, Slovenia, 2011.

GUIMARÃES, H.; Mudança de tensão e hábitos (radiografia de transformadores). Revista O Setor Elétrico, São Paulo, ed. 38, 2009.

GUIMARÃES, M. B.; Comparação entre Métodos de Cálculo de Perdas em Transformadores Alimentando Cargas Não Lineares, Dissertação do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, 2006.

HOLMAN, J. P.; Experimental Methods for Engineers, 7ª ed., McGraw Hill Book Company, New York, 2001.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 4ª ed. Rio de Janeiro, 1998.

JORDÃO, R. G.; Transformadores, 1ª ed. Edgard Blucher, 1969.

LINO, I. S. S.; RAMALHO, R. C.; BERNARDI, A. N.; EMERENCIO, L. L.; BELCHIOR, F. N.; Análise do Aquecimento de Transformadores Suprindo Carga Não Linear – Análise Comparativa entre Teoria e Prática, GQEE, UNIFEI, pp.1-7, 2013.

MADZAREVIC, V.; KAPETANOVIC, I.; TESANOVIC, M.; KASUMOVIC, M.; Different Approach to Thermal Modeling of Transformers – a comparison of methods, International Journal of Energy and Environment, Vol. 5, pp. 610-617, 2011.

Manual de Transformadores à Seco WEG, 2010. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEGmanualdetransformadoressecos1000064775809.1manualportuguesbr.pdf>>. Acesso em: 27 janeiro 2017.

MURUGAN, R.; RAMASAMY, R.; Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities, Engineering Failure Analysis, Vol. SS, pp. 182-192, 2015.

OZIZIK, M. N.; Heat Conduction, 2ª ed. John Wiley & Sons, United States of America, 1993.

PIERCE, L. W.; Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 257-264, General Electric Company, Rome, Georgia, 1994.

RAHIMPOUR, E.; AZIZIAN, D.; Analysis of Temperature Distribution in Cast-resin Dry-type Transformers, Electrical Engineering, Vol. 89, pp. 301-309, 2007.

ROSITO L. H.; História do Transformador, Revista o Setor Elétrico, ed. 38, 2009.

SANTOS, M. T. R.; Avaliação do Ciclo de Vida de um transformador tipo Core produzido na Efacec Energia, Maquinas e Equipamentos Elétricos, S.A. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

SGUAÇABIA, R. R.; CARVALHO, M. M.; LUNARDI, T.; Estudo de Avaliação do Impacto de Distorções Harmônicas sobre Transformadores do Tipo Seco. In: IX CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá. Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (IX CBQEE), 2011. p. 214-219.

STEGEMANN, D.; Livro Fundamentos do Método de Correntes Parasitas, Forschungszentrum Julich, 1990.

SUSA, D.; Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers. Doctoral Dissertation, Power Systems and High Voltage Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland 2005, 131p.

TSILI, M. A.; AMOIRALIS, E. I.; KLADAS, A.; SOUFLARIS, T.; Power transformer thermal analysis using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 53. pp. 188-201, 2011.