

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO DE ELEVADA EFICIÊNCIA E
REDUZIDA RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA
EMPREGANDO NÚCLEO AMORFO E ÓLEO
VEGETAL ISOLANTE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dion Lenon Prediger Feil

Santa Maria, RS, Brasil

2015

2015

Mestre

FEIL, Dion Lenon Prediger

PPGEE/UFSM, RS

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO DE ELEVADA EFICIÊNCIA E REDUZIDA
RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA EMPREGANDO NÚCLEO
AMORFO E ÓLEO VEGETAL ISOLANTE**

Dion Lenon Prediger Feil

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Prediger Feil, Dion Lenon

Desenvolvimento de Transformador de Distribuição de Elevada Eficiência e Reduzida Relação Peso/Potência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante / Dion Lenon Prediger Feil.-2015.

177 p.; 30cm

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan

Coorientador: Daniel Pinheiro Bernardon

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2015

1. Transformador de Distribuição 2. Eficiência 3. Dinâmica Computacional de Fluidos 4. Núcleo Amorfo 5. Óleo Vegetal Isolante I. Bandeira Marchesan, Tiago II. Pinheiro Bernardon, Daniel III. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Dion Lenon Prediger Feil. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Facco, 723. CEP: 98125-000 Bairro: Centro,

Fortaleza dos Valos, RS. Celular: (55) 9152-0940; Email: dionlenonpf@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO DE ELEVADA EFICIÊNCIA E REDUZIDA
RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA EMPREGANDO NÚCLEO AMORFO
E ÓLEO VEGETAL ISOLANTE**

elaborada por
Dion Lenon Prediger Feil

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:



Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



Manuel Luis Barreira Martinez, Dr. (UNIFEI)



Mauricio Sperandio, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 12 de março de 2015.

*À minha família,
pelo amor, dedicação, apoio
e incentivo em todas as minhas
escolhas e decisões e por sempre
acreditarem nas minhas capacidades.*

*Aos meus amigos,
pelo incentivo e carinho
sempre dedicados.*

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Lauro e Elizete pela educação, amor, carinho e dedicação, sempre acreditando em meu potencial e me incentivando em todos os momentos na busca por meus objetivos.

Agradeço aos meus irmãos Diogo e Dione, e às minhas cunhadas Ariele e Julianna pelo apoio e incentivo sempre dedicados.

Agradeço ao meu sobrinho Gabriel, sempre transmitindo calma e alegria em todos os momentos.

Aos meus amigos pelas palavras de carinho e apoio nas horas mais difíceis e pelos momentos de descontração. Em especial aos amigos Alam Luis Hermes Cancian, Criciane Moreira Hansen e Luana Hermes Cancian.

Agradeço ao professor Tiago Bandeira Marchesan pela amizade, por acreditar nas minhas capacidades, me ensinando, orientando e sempre transmitindo segurança no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Daniel Pinheiro Bernardon pela troca de experiências e pelas orientações dadas.

Agradeço aos colegas futuros engenheiros Alexander do Canto Dutra e Leonardo Hautrive Medeiros, pela dedicação no auxílio para o desenvolvimento deste trabalho, e pela amizade demonstrada.

Ao Grupo de Inteligência em Iluminação – GEDRE pelo ambiente de trabalho, amizade e oportunidade proporcionada.

Agradeço aos colegas e amigos do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência – CEESP Ana Paula Carboni de Mello, Bruno Brondani Toller, Iuri Castro Figueiró, Laura Lisiane Callai do Santos, Leonardo Fontoura e Nelson Knak Neto, e aos amigos do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC Celso Tischer e Guilherme Sebastião da Silva, pela amizade, troca de conhecimentos e momentos de descontração.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade da realização de um curso de pós-graduação e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ELEVADA EFICIÊNCIA E REDUZIDA RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA EMPREGANDO NÚCLEO AMORFO E ÓLEO VEGETAL ISOLANTE

AUTOR: DION LENON PREDIGER FEIL

ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Local da Defesa e Data: Santa Maria - RS, 12 de março de 2015.

A elevada quantidade de transformadores envolvidos no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro justifica trabalhos e estudos realizados com o intuito de melhorar a eficiência destes equipamentos. Qualquer melhoria representa uma significativa melhora no índice de rendimento de um sistema de distribuição. Dessa forma, este trabalho apresenta o projeto de um transformador de distribuição de elevada eficiência e reduzida relação peso/potência, por meio da utilização de núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante. Para tanto, é proposta uma metodologia de projeto para transformadores de distribuição, por meio da redução de perdas, com o objetivo de maximizar o desempenho destes dispositivos elétricos. A metodologia considera, além da substituição dos convencionais núcleos de aço-silício por metal amorfo, o comportamento das perdas de transformadores diante a variação de parâmetros de projeto, reduzindo assim as perdas nestes equipamentos. Esse efeito, além de reduzir desperdícios de energia, possibilita também à diminuição da geração de calor na parte ativa dos transformadores, podendo levar a um aumento de vida útil destes dispositivos. Além dessa metodologia de projeto, com o propósito de analisar a eficiência de refrigeração de transformadores de distribuição e com isso melhorar a eficiência destes equipamentos, simulações térmicas, em elementos finitos, de geometrias de radiadores para sistemas de refrigeração destes equipamentos, são realizadas. Um ensaio de elevação de temperatura de um transformador de distribuição, empregando núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante, projetado a partir da metodologia de projeto proposta e das simulações computacionais de dinâmica dos fluidos, foi realizada com o intuito de comprovar os resultados obtidos.

Palavras-chave: Transformador de Distribuição. Eficiência. Perdas. Dinâmica Computacional de Fluidos. Sistema de Refrigeração. Núcleo Amorfo. Óleo Vegetal Isolante. Elevação de Temperatura.

ABSTRACT

Master Thesis

Post-Graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

DEVELOPMENT DISTRIBUTION TRANSFORMER HIGH EFFICIENCY AND LOW RATIO WEIGHT/POWER USING AMORPHOUS CORE AND INSULATING VEGETABLE OIL

AUTHOR: DION LENON PREDIGER FEIL

ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Place and Date: Santa Maria - RS, March 12th, 2015.

The high amount of transformers connected to the Brazilian distribution system justifies the works and studies performed in order to improve the efficiency of these equipment. Any progress represents a significant improve in the yield index of a distribution system. Therefore, this work presents the design of a distribution transformer of high efficiency and low weight/power ratio, by the use of amorphous metal core and insulating vegetable oil. For that, it is proposed a project methodology of distribution transformers, considering losses reduction, in order to maximize the performance of these electrical devices. The methodology, contemplates not only the replacement of conventional silicon steel cores of amorphous metal, but also the behavior of losses in transformers accordingly to the variation of project parameters, thus reducing losses in these equipment. This effect, besides reducing energy waste, also allows the reduction of heat generation in the active part of the transformer, leading to an increase of life-cycle of these devices. Beyond this design methodology, aiming at analyzing the cooling efficiency of distribution transformers and with that improve the efficiency of these equipment, thermal simulations of geometries of radiators for the cooling systems these equipment are performed by the application of finite elements. A temperature rise test of a distribution transformer, employing amorphous metal core and the insulating vegetable oil, projected from the project methodology proposed and of the computational fluid dynamics simulation was performed in order to confirm the results.

Keywords: Distribution Transformer. Efficiency. Losses. Computational Fluid Dynamics. Cooling System. Amorphous core. Insulating Vegetable Oil . Temperature Rise.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 – CICLO DE HISTERESE MAGNÉTICA (PRONTO, 2010).....	43
FIGURA 1.2 – PERDAS PARASITAS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CONDUTORES EM PARALELO (SALUSTIANO, 2012).....	49
FIGURA 1.3 – PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE UM TRANSFORMADOR A ÓLEO (ADAPTADO DE: (SALUSTIANO, 2012)).....	53

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 – MALHA DE ELEMENTO FINITOS (SOUZA, 2003).....	57
FIGURA 2.2 – DIFERENTES TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS (IARONKA, 2014).....	57
FIGURA 2.3 – CRITÉRIO <i>ORTHOGONAL QUALITY</i> (ANSYS, 2014).....	58
FIGURA 2.4 – CRITÉRIO <i>SKEWNESS</i> (ANSYS, 2014).....	58
FIGURA 2.5 – QUALIDADE DOS ESPECTROS (ANSYS, 2014).....	59
FIGURA 2.6 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO PARA O CRITÉRIO <i>ORTHOGONAL QUALITY</i>	59
FIGURA 2.7 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO PARA O CRITÉRIO <i>SKEWNESS</i>	60
FIGURA 2.8 – TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO (ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A, 2014).....	61
FIGURA 2.9 – REPRODUÇÃO EM 3D DO TRANSFORMADOR EM ANÁLISE.....	62
FIGURA 2.10 – PARTE ATIVA DO TRANSFORMADOR.....	62
FIGURA 2.11 – MALHA DA PARTE ATIVA DO TRANSFORMADOR.....	62
FIGURA 2.12 – REPRODUÇÃO EM 3D DO TRANSFORMADOR MODELO1. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR.....	63
FIGURA 2.13 – MALHA INTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 1.....	64
FIGURA 2.14 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO1.....	64
FIGURA 2.15 – TEMPERATURA DO ÓLEO DO MODELO 1. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	65
FIGURA 2.16 – REPRODUÇÃO EM 3D DO TRANSFORMADOR MODELO 2. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR.....	66
FIGURA 2.17 – MALHA INTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 2.....	66
FIGURA 2.18 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 2.....	67
FIGURA 2.19 – TEMPERATURA DO ÓLEO DO MODELO 2. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	67
FIGURA 2.20 – REPRODUÇÃO EM 3D DO TRANSFORMADOR MODELO 3. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR.....	68
FIGURA 2.21 – MALHA INTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 3.....	69

FIGURA 2.22 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 3.....	69
FIGURA 2.23 – TEMPERATURA DO ÓLEO DO MODELO 3. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO	70
FIGURA 2.24 – REPRODUÇÃO EM 3D DO TRANSFORMADOR MODELO 4. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR	71
FIGURA 2.25 – MALHA INTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 4.	71
FIGURA 2.26 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR MODELO 4.....	71
FIGURA 2.27 – TEMPERATURA DO ÓLEO DO MODELO 4. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO	72
FIGURA 2.28 – DETALHE DA ALETA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 1.	74
FIGURA 2.29 – VISÃO GERAL DA GEOMETRIA DA CONFIGURAÇÃO 2. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR. ..	75
FIGURA 2.30 – DETALHE DA ALETA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 2.	76
FIGURA 2.31 – VISÃO GERAL DA GEOMETRIA DA CONFIGURAÇÃO 3. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR. ..	77
FIGURA 2.32 – DETALHE DA ALETA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 3.	77
FIGURA 2.33 – VISÃO GERAL DA GEOMETRIA DA CONFIGURAÇÃO 4. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR. ..	78
FIGURA 2.34 – DETALHE DA ALETA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 4.	78
FIGURA 2.35 – VISÃO GERAL DA GEOMETRIA DA CONFIGURAÇÃO 5. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR. ..	79
FIGURA 2.36 – DETALHE DA ALETA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 5.	80
FIGURA 2.37 – VISÃO GERAL DA GEOMETRIA DA CONFIGURAÇÃO 6. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO SUPERIOR. ..	81
FIGURA 2.38 – DETALHE DA ALETA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 6.	81
FIGURA 2.39 – VARIAÇÕES DA DISTÂNCIA DO TANQUE.	82
FIGURA 2.40 – VARIAÇÕES DO PONTO DE ENTRADA/SÁIDA.	83

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR BASE.	85
FIGURA 3.2 – TEMPERATURA DO ÓLEO DA CONFIGURAÇÃO 1. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	86
FIGURA 3.3 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR - CONFIGURAÇÃO 2.....	87
FIGURA 3.4 – TEMPERATURA DO ÓLEO DA CONFIGURAÇÃO 2. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	87
FIGURA 3.5 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR - CONFIGURAÇÃO 3.....	88
FIGURA 3.6 – TEMPERATURA DO ÓLEO DA CONFIGURAÇÃO 3. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	88
FIGURA 3.7 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR - CONFIGURAÇÃO 4.....	89
FIGURA 3.8 – TEMPERATURA DO ÓLEO DA CONFIGURAÇÃO 4. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	89
FIGURA 3.9 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR - CONFIGURAÇÃO 5.....	90
FIGURA 3.10 – TEMPERATURA DO ÓLEO DA CONFIGURAÇÃO 5. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	90
FIGURA 3.11 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR - CONFIGURAÇÃO 6.....	91

FIGURA 3.12 – TEMPERATURA DO ÓLEO DA CONFIGURAÇÃO 6. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	91
FIGURA 3.13 – COEFICIENTE DE PENETRAÇÃO TÉRMICA. (A) ALETA ELÍPTICA. (B) ALETA TUBULAR.....	92
FIGURA 3.14 – TEMPERATURA DO ÓLEO PARA DISTÂNCIA DE 115 MM. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	93
FIGURA 3.15 – TEMPERATURA DO ÓLEO PARA DISTÂNCIA DE 274,66 MM. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	93
FIGURA 3.16 – TEMPERATURA DO ÓLEO PARA DISTÂNCIA DE 380 MM. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	95
FIGURA 3.17 – TEMPERATURA DO ÓLEO PARA DISTÂNCIA DE 190 MM. (A) TEMPERATURA MÉDIA GERAL. (B) TEMPERATURA DO TOPO DE ÓLEO.....	95

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA PROJETO DO TRANSFORMADOR EM ANÁLISE.	101
FIGURA 4.2 – VARIAÇÃO DAS PERDAS EM FUNÇÃO DO VOLT/ESPIRA.....	105
FIGURA 4.3 – PERDAS A VAZIO OBTIDAS EM SIMULAÇÃO.....	106
FIGURA 4.4 – CURVA DE TENSÃO NOS ENROLAMENTOS DE AT OBTIDA EM SIMULAÇÃO.....	107
FIGURA 4.5 – PERDAS A VAZIO VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA.....	108
FIGURA 4.6 – REDUÇÃO DE PERDAS A VAZIO VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA.....	108
FIGURA 4.7 – REDUÇÃO DE PERDAS A VAZIO VARIANDO O VOLT/ESPIRA.....	109
FIGURA 4.8 – PERDAS SOB CARGA VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA.....	109
FIGURA 4.9 – REDUÇÃO DE PERDAS SOB CARGA VARIANDO O VOLT/ESPIRA.....	110
FIGURA 4.10 – PERDAS A VAZIO VARIANDO A DENSIDADE DE CORRENTE E O VOLT/ESPIRA.....	110
FIGURA 4.11 – REDUÇÃO DE PERDAS A VAZIO VARIANDO A DENSIDADE DE CORRENTE.....	111
FIGURA 4.12 – PERDAS SOB CARGA VARIANDO A DENSIDADE DE CORRENTE E O VOLT/ESPIRA.....	111
FIGURA 4.13 – REDUÇÃO DE PERDAS SOB CARGA VARIANDO A DENSIDADE DE CORRENTE.....	112
FIGURA 4.14 – PERDAS TOTAIS VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA.....	113
FIGURA 4.15 – PERDAS A VAZIO E SOB CARGA VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA.....	114
FIGURA 4.16 – PERDAS A VAZIO VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA PARA NÚCLEO AMORFO.....	115
FIGURA 4.17 – PERDAS SOB CARGA VARIANDO A INDUÇÃO E O VOLT/ESPIRA PARA NÚCLEO AMORFO.....	115
FIGURA 4.18 – COMPARAÇÃO ENTRE PERDAS A VAZIO PARA METAL AMORFO E AÇO-SILÍCIO VARIANDO O VOLT/ESPIRA.....	116
FIGURA 4.19 – COMPARAÇÃO ENTRE PERDAS TOTAIS PARA METAL AMORFO E AÇO-SILÍCIO VARIANDO O VOLT/ESPIRA.....	117
FIGURA 4.20 – PERDAS A VAZIO DO TRANSFORMADO COM NÚCLEO AMORFO VIA SIMULAÇÃO.....	117
FIGURA 4.21 – TENSÃO NOS ENROLAMENTOS DE AT VIA SIMULAÇÃO.....	118
FIGURA 4.22 – TRANSFORMADOR COM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ANTERIOR AO ESTUDO DE EFICIÊNCIA. (A) VISÃO SUPERIOR. (B) FORMATO ALETA.....	119
FIGURA 4.23 – TRANSFORMADOR COM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EFICIENTE. (A) VISÃO SUPERIOR. (B) FORMATO ALETA.....	119

CAPÍTULO 5

FIGURA 5.1 – TRANSFORMADOR SUBMETIDO AO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.	122
FIGURA 5.2 – SETUP PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.	122
FIGURA 5.3 – VARIAÇÃO DAS PERDAS TOTAIS.	123
FIGURA 5.4 – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.	123
FIGURA 5.5 – ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA REALIZADO PELA ROMAGNOLE.	124
FIGURA 5.6 – IMAGEM TÉRMICA NO INÍCIO DO ENSAIO. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO LATERAL.	125
FIGURA 5.7 – IMAGEM TÉRMICA APÓS 9H DE ENSAIO. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO LATERAL.	125
FIGURA 5.8 – IMAGEM TÉRMICA APÓS 17H DE ENSAIO. (A) VISÃO FRONTAL. (B) VISÃO LATERAL.	125
FIGURA 5.9 – TEMPERATURA DE TOPO DE ÓLEO MEDIDA ATRAVÉS DE TERMÔMETRO E VIA GPRS.	127
FIGURA 5.10 – TEMPERATURA EXTERNA DO TRANSFORMADOR. (A) SIMULAÇÃO ELEMENTOS FINITOS. (B) IMAGEM TÉRMICA.	127

APÊNDICE A

FIGURA A.1 – TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO (ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A, 2014).	138
FIGURA A.2 - CIRCUITO ELETROMAGNÉTICO DE UM TRANSFORMADOR (ADAPTADO DE: (KULKARNI E KHAPARDE, 2004)).....	138
FIGURA A.3 – ENROLAMENTO DO TIPO PANQUECA (HARLOW, 2004).	142
FIGURA A.4 – ENROLAMENTO EM CAMADAS (ADAPTADO DE: (SALUSTIANO, 2012)).	143
FIGURA A.5 – ENROLAMENTO EM CAMADAS DURANTE PROCESSO DE MONTAGEM (HARLOW, 2004).....	143
FIGURA A.6 – ENROLAMENTO HELICOIDAL (RIES, 2007).	144
FIGURA A.7 – ENROLAMENTO HELICOIDAL DURANTE PROCESSO DE MONTAGEM (HARLOW, 2004).	144
FIGURA A.8 – ESQUEMA DE LIGAÇÃO DOS ENROLAMENTOS (ADAPTADO DE: (HARLOW, 2004)).....	145
FIGURA A.9 – ENROLAMENTO DO TIPO DISCO DURANTE PROCESSO DE MONTAGEM (HARLOW, 2004).....	145
FIGURA A.10 – ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS (ADAPTADO DE: (RIES, 2007)).....	146
FIGURA A.11 – ENROLAMENTOS INTERCALADOS (ADAPTADO DE: (RIES, 2007)).....	146
FIGURA A.12 – TRANSPOSIÇÃO DE CONDUTORES EM PARALELO (IARONKA, 2014).....	147
FIGURA A.13 – HISTÓRICO DE COTAÇÃO ENTRE 2011 E 2014 PARA COBRE E ALUMÍNIO.....	149
FIGURA A.14. – TEMPERATURA DO ENROLAMENTOS PARA CURTO-CIRCUITO DE 4 SEGUNDOS (ADAPTADO DE: (SALUSTIANO, 2012)).....	151
FIGURA A.15 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO TEOR DE SILÍCIO (ADAPTADO DE: (ABNT NBR 5161, 1977)).....	152
FIGURA A.16 – ESQUEMÁTICO DE UM TRANSFORMADOR DE NÚCLEO ENVOLVIDO TRIFÁSICO. (A) VISTA FRONTAL. (B) VISTA SUPERIOR. (ADAPTADO DE: (HARLOW, 2004)).....	153
FIGURA A.17 – ESQUEMÁTICO DE UM TRANSFORMADOR DE NÚCLEO ENVOLVENTE TRIFÁSICO. (A) VISTA FRONTAL. (B) VISTA SUPERIOR. (ADAPTADO DE: (HARLOW, 2004)).....	154
FIGURA A.18 – NÚCLEO EMPILHADO. (SALUSTIANO, 2012).....	155
FIGURA A.19 – NÚCLEO ENROLADO. (NUNES, 2011).....	155

FIGURA A.20 –MICROGRAFIA DE UMA CHAPA DE FESI. (A) GRÃO NÃO ORIENTADO. (B) GRÃO ORIENTADO (PRONTO, 2010)	157
FIGURA A.21 –ESTRUTURAS ATÔMICAS. (A) CRISTALINA. (B) AMORFA (SALUSTIANO, 2012)	158
FIGURA A.22 – CICLOS DE HISTERESE DE UM METAL AMORFO E AÇO-SILÍCIO (ADAPTADO DE: (STEINMETZ, CRANGANU-CRETU E SMAJIC, 2010))	159
FIGURA A.23 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO NÚCLEO DE UM TRANSFORMADOR (PORTELLA, 2010).	162
FIGURA A.24 – ISOLAÇÃO SÓLIDA APÓS ENSAIO DE TEMPO DE ENVELHECIMENTO (ADAPTADO DE: (MCSHANE, RAPP, <i>ET AL.</i> , 2002)).	166
FIGURA A.25 – SISTEMA DE RESFRIAMENTO <i>ONAN</i> . (ADAPTADO DE: (KULKARNI E KHAPARDE, 2004)).	169
FIGURA A.26 – SISTEMA DE RESFRIAMENTO <i>ONAF</i> . (ADAPTADO DE: (KULKARNI E KHAPARDE, 2004)).	169
FIGURA A.27 – SISTEMA DE RESFRIAMENTO <i>OFAF</i> . (ADAPTADO DE: (KULKARNI E KHAPARDE, 2004)).....	170
FIGURA A.28 – SISTEMA DE RESFRIAMENTO <i>ODAF</i> . (ADAPTADO DE: (KULKARNI E KHAPARDE, 2004)).	170

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1.1 – CLASSE DE ISOLAMENTO DOS MATERIAIS E TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DAS PERDAS.....	47
TABELA 1.2 – RESISTIVIDADE DE MATERIAIS CONDUTORES.....	48
TABELA 1.3 – ALTERAÇÃO DO CARREGAMENTO COM RELAÇÃO A TEMPERATURA AMBIENTE.....	52

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE TRANSFORMADORES PARA VALIDAÇÃO DO MEF.....	72
TABELA 2.2 – CARACTERÍSTICAS DAS CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS PARA SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	82
TABELA 2.3 – CARACTERÍSTICAS DAS VARIAÇÕES DE DISTÂNCIA EM RELAÇÃO AO TANQUE.	83
TABELA 2.4 – CARACTERÍSTICAS DAS VARIAÇÕES DE DISTÂNCIA ENTRE ENTRA/SAÍDA.....	84

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 – RESULTADOS TÉRMICOS DAS CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS PARA SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.	92
TABELA 3.2 – RESULTADOS TÉRMICOS DAS VARIAÇÕES DE DISTÂNCIA ENTRE AS ALETAS E O TANQUE.....	94
TABELA 3.3 – RESULTADOS TÉRMICOS DAS VARIAÇÕES DE DISTÂNCIA ENTRE ENTRADA/SAÍDA DAS ALETAS NO TANQUE	96

CAPÍTULO 5

TABELA 5.1 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DE TOPO DE ÓLEO MEDIDA ENTRE TERMÔMETRO E IMAGEM TÉRMICA.....	126
---	-----

APÊNDICE A

TABELA A.1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COBRE E ALUMÍNIO	148
TABELA A.2 – COMPARATIVO DE PERDAS NO NÚCLEO ENTRE AÇO-SILÍCIO E METAL AMORFO.....	160
TABELA A.3 – COMPARATIVO DE CARACTERÍSTICAS ENTRE AÇO-SILÍCIO E METAL AMORFO	160
TABELA A.4 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO OMI NOVO.	165
TABELA A.5 – CLASSIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES QUANTO AO TIPO DE RESFRIAMENTO.....	168
TABELA A.6 – LÍMITES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.	171

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEM	<i>Computational Electromagnetics</i> (Eletromagnetismo Computacional)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i> (Fluidodinâmica Computacional)
GO	Aço de Grão Orientado
GNO	Aço de Grão não Orientado
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MMM	Materiais Magnéticos Macios
ODAF	Óleo Direcional Forçado, Ar Forçado
ODWF	Óleo Direcional Forçado, Água Forçada
OFAF	Óleo Forçado, Ar Forçado
OFWF	Óleo Forçado, Água Forçada
OMI	Óleo Mineral Isolante
ONAF	Óleo Natural, Ar Forçado
ONAN	Óleo Natural, Ar Natural
OVI	Óleo Vegetal Isolante

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Indução magnética
B_{ef}	Valor eficaz da indução magnética
B_m	Indução magnética máxima
B_r	Magnetização remanescente
J	Densidade de corrente
E_1	Valor eficaz da tensão induzida no enrolamento primário
E_2	Valor eficaz da tensão induzida no enrolamento secundário
e_1	Tensão induzida no enrolamento primário
e_2	Tensão induzida no enrolamento secundário
f	Frequência
H	Intensidade de campo magnético
H_c	Campo coercivo ou Coercividade
H_m	Intensidade de campo magnético máxima
I	Corrente de carga
I_0	Corrente de excitação
I_1	Corrente no enrolamento primário
I_2	Corrente no enrolamento secundário
k_f	Coefficiente de perdas por Foucault
k_h	Constante de perdas por histerese
k_p	Coefficiente de Rogowski
N_1	Número de espiras do enrolamento primário
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário
p_c	Peso do condutor
P_{exc}	Perdas excedentes
P_f	Perdas por corrente de Foucault
P_{F_cond}	Perdas de Foucault nos condutores
P_h	Perdas por histerese
Pot	Potência do transformador
P_t	Perdas totais

R_{CC}	Resistência ôhmica
T_C	Temperatura em °C
T_F	Temperatura em °F
t	Espessura das chapas do núcleo
t_{cond}	Espessura do condutor
VA/kg	Potência aparente por quilograma
V_1	Tensão eficaz do enrolamento primário
V_2	Tensão eficaz do enrolamento secundário
W/kg	Perdas no núcleo por quilograma
W_0	Perdas ôhmicas nos enrolamentos
α	Coefficiente de Steinmetz
α_{20}	Coefficiente de variação da resistividade a 20°C
γ	Peso específico
γ_{cond}	Peso específico do condutor
Θ	Temperatura de referência da classe de isolamento do material
ρ	Resistividade
ρ_{cond}	Resistividade do condutor
ρ_{20}	Resistividade a 20°C
Φ_m	Fluxo magnético mútuo
Φ_{mp}	Valor de pico do fluxo magnético mútuo
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	153
RESUMO	175
ABSTRACT	197
LISTA DE FIGURAS	219
LISTA DE TABELAS	27
LISTA DE ABREVIATURAS	29
LISTA DE SÍMBOLOS.....	31
SUMÁRIO	33
INTRODUÇÃO	37
CAPÍTULO 1	41
PERDAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO	41
1.1. Introdução	41
1.2. Perdas em Transformadores	41
1.2.1. Perdas a vazio: <i>Histerese</i>	42
1.2.2. Perdas a vazio: <i>Correntes de Foucault</i>	45
1.2.3. Perdas a vazio: <i>Excedentes</i>	46
1.2.4. Perdas sob carga: <i>Ôhmicas</i>	46

1.2.5.	Perdas sob carga: <i>Parasitas</i>	48
1.3.	Temperatura e Vida Útil do Transformador	50
1.4.	Influência da Temperatura Ambiente nos Transformadores	51
1.5.	Aspectos Térmicos do Transformador	52
1.6.	Conclusão	53

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E GEOMETRIAS DE RADIADORES PARA SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

2.1.	Introdução	55
2.2.	Método de Elementos Finitos (MEF)	55
2.2.1.	Qualidade de Malha	58
2.3.	Etapas para a Análise com MEF	60
2.4.	Validação de Simulações Térmicas Utilizando o Método de Elementos Finitos	61
2.4.1.	Transformador Modelo 1	63
2.4.2.	Transformador Modelo 2	65
2.4.3.	Transformador Modelo 3	68
2.4.4.	Transformador Modelo 4	70
2.5.	Geometrias de Radiadores para Sistema de Refrigeração	73
2.6.	Conclusão	84

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES TÉRMICAS PARA AS GEOMETRIAS DE RADIADORES

		85
--	--	-----------

3.1.	Introdução	85
3.2.	Configuração 1: Transformador Base	85
3.3.	Configuração 2: Aleta Tubular	86
3.4.	Configuração 3: Aleta Tubular com Entrada em Curva	87
3.5.	Configuração 4: Aleta Tubular com Ramo Extra	88
3.6.	Configuração 5: Aleta Tubular com Ramo Extra com Entrada em Curva	89
3.7.	Configuração 6: Aleta Elíptica Extra	91
3.8.	Variação da Distância entre Aletas e Tanque do Transformador	93
3.9.	Variação da Distância entre os Pontos de Entrada e Saída das Aletas do Tanque	94
3.10.	Conclusão	96

CAPÍTULO 4

ANÁLISE TEÓRICA DE PROJETO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO.....

4.1.	Introdução	99
4.2.	Metodologia de Cálculo de Projeto de Transformadores de Distribuição ...	100
4.2.1.	Número de Espiras nos Enrolamentos de Alta Tensão.....	102
4.2.2.	Dimensões Físicas do Transformador	103
4.2.3.	Perdas em Vazio e Perdas em Carga	103
4.2.4.	Corrente de Excitação.....	104
4.2.5.	Impedância.....	104
4.3.	Projeto de Redução de Perdas	105

4.4.	Análise de Perdas Utilizando Núcleo de Metal Amorfo e Óleo Vegetal Isolante	114
4.5.	Conclusão	120
CAPÍTULO 5		121
ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA		121
5.1.	Introdução.....	121
5.2.	Resultados Experimentais	121
5.3.	Conclusão	128
CONCLUSÃO GERAL		129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		131
APÊNDICE A		137
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS.....		137
A.1.	Introdução.....	137
A.2.	Princípio de Funcionamento	138
A.3.	Componentes Construtivos	141
A.3.1.	Enrolamentos	141
A.3.3.1.	Comparativo entre Cobre e Alumínio.....	148
A.3.2.	Núcleo	151
A.3.2.1.	Aços Utilizados em Núcleos de Transformadores.....	155
A.3.2.2.	Comparativo entre Aço-Silício e Metal Amorfo.....	157
A.3.3.	Sistema de Isolamento	161
A.3.3.1.	Isolação Sólida.....	163
A.3.3.2.	Líquido Isolante	163
A.3.4.	Sistema de Refrigeração.....	167

APÊNDICE B	173
ARTIGOS PUBLICADOS	173
APÊNDICE C	175
PEDIDO DE PATENTE.....	175
APÊNDICE D	177
TRABALHOS FUTUROS	177

INTRODUÇÃO

A qualidade nos serviços prestados pelas empresas do setor energético está sendo cada vez mais exigida pelos órgãos regulamentadores. Esse serviço de qualidade, se tratando de concessionárias de energia elétrica, significa uma energia de qualidade disponível ao consumidor final. Além de qualidade, a quantidade também é muito importante, uma vez que, com o aumento do consumo, as concessionárias de energia têm o papel de suprir essa demanda e garantir o abastecimento (BECHARA, 2010) (IARONKA, 2014). Para garantir a qualidade e quantidade de energia que chega ao consumidor, os equipamentos utilizados em todo o sistema elétrico devem ter um alto grau de confiabilidade, desde a geração até a distribuição da energia elétrica (IARONKA, 2014). Levando em consideração esse contexto, os transformadores são os dispositivos em maior número e com um papel fundamental em todo o sistema elétrico, uma vez que são utilizados para adequar os níveis de tensão às necessidades de consumo, distribuição, transmissão e geração.

A operação do transformador de distribuição é acompanhada por diversas perdas, que acarretam custos na operação das redes de distribuição e, conseqüentemente, aos consumidores finais (NUNES, 2011) (PICANÇO, 2006), além do aquecimento do próprio dispositivo. Nesse contexto, estima-se que no Brasil cerca de 15% da energia gerada é perdida, sendo que 70% desta perda ocorre nos sistemas de distribuição. Ou seja, os transformadores são responsáveis por grande parte desta perda de energia (SALUSTIANO, 2012).

O transformador de distribuição, assim como todo equipamento elétrico, apresenta uma determinada vida útil. Dentre todos os fatores que têm efeito na vida útil do transformador, a temperatura é o principal agente determinador desse parâmetro. A elevação da temperatura ocorre em função das perdas que incidem no dispositivo causando aquecimento do transformador. Este calor gerado, por sua vez, deve ser conduzido ao ambiente. Essa transferência de calor é responsável pela manutenção das condições de operação nominais do transformador (IARONKA, 2014). Assim, entender o funcionamento térmico do dispositivo é de fundamental importância, para se desenvolver melhorias no sistema de refrigeração já existente ou para o desenvolvimento de novas geometrias, para que os transformadores operem com temperaturas dentro dos limites térmicos estipulados por normas regulamentadoras. Além disso, a utilização do óleo vegetal isolante, em substituição

ao óleo mineral, pode aumentar a vida útil do transformador, uma vez que a degradação do isolamento de papel destes dispositivos é muito inferior com a utilização do óleo vegetal, se comparado ao óleo mineral. Outra característica presente nos óleos vegetais é sua alta biodegradabilidade.

Visando a efficientização do sistema elétrico, os projetistas procuram melhorar o desempenho do transformador tendo em vista a redução de suas perdas. Alternativas para aumento da eficiência destes equipamentos normalmente resultam em elevação do custo de manufatura dos mesmos, devido à utilização de materiais com maior qualidade, ou em maior quantidade. Em contrapartida, reduz-se o custo operacional do sistema (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011) (PICANÇO, 2006). Dessa forma, uma alternativa, que já vêm sendo empregada em transformadores fabricados no Brasil e que apresenta impactos diretos na eficiência, é a utilização de metal amorfo no núcleo de transformadores de distribuição ao invés de aço-silício. Esta alternativa, além de reduzir as perdas que incidem no transformador, também acarretam uma redução no aquecimento destes equipamentos. Outra alternativa também adotada, com a finalidade de reduzir custos de manufatura, é a substituição do cobre pelo alumínio como condutor dos enrolamentos, apesar de o alumínio possuir um menor valor de condutividade.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um transformador de distribuição de elevada eficiência e ambientalmente correto, por meio da utilização de núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante. Considerando que este é o primeiro trabalho desenvolvido nesta instituição sobre transformadores de distribuição, optou-se por fazer uma revisão bibliográfica aprofundada sobre aspectos básicos como: princípio de funcionamento e componentes construtivos destes equipamentos, os quais são apresentados no Apêndice A. Uma metodologia de projeto para transformadores de distribuição, por meio da redução de perdas, é proposta com o objetivo de fornecer ao projetista indicativos para maximizar o desempenho destes dispositivos elétricos. A metodologia considera, além do comportamento das perdas destes equipamentos diante a variação de parâmetros de projeto, a substituição dos convencionais núcleos de aço-silício, por metal amorfo, reduzindo assim significativamente as perdas nos transformadores. Esse efeito, além de reduzir desperdícios de energia, possibilita também à diminuição da geração de calor na parte ativa dos transformadores, podendo levar a um aumento de vida útil destes dispositivos. Além disso, simulações térmicas em elementos finitos, de geometrias de radiadores, são realizadas com o propósito de analisar a eficiência dos sistemas de refrigeração do transformador.

Para atingir o objetivo desejado neste trabalho, no primeiro capítulo é apresentada a contextualização sobre perdas e geração de calor nos transformadores, bem como a influência da temperatura nestes dispositivos. No segundo capítulo são propostas geometrias de radiadores para emprego em sistemas de refrigeração de transformadores, com o propósito de analisar a eficiência de refrigeração destes sistemas, além da contextualização do Método de Elementos Finitos para utilização em simulações térmicas das referidas geometrias. No terceiro capítulo são apresentados os resultados, através de simulações térmicas, utilizando o Método de Elementos Finitos, das geometrias de radiadores para sistemas de refrigeração de transformadores de distribuição propostas no terceiro capítulo.

No quarto capítulo apresenta-se uma metodologia de cálculo de projeto de transformadores de distribuição, bem como uma metodologia para melhoria de desempenho destes equipamentos. Adicionalmente a este capítulo, é apresentada uma análise de perdas e simulações térmicas para um transformador de distribuição com núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante. Por fim, no quinto capítulo, é apresentado o ensaio de elevação de temperatura de um transformador de distribuição com núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante.

CAPÍTULO 1

PERDAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO

1.1. Introdução

O transformador, assim como todo equipamento elétrico, possui uma certa eficiência, a qual é determinada pelas perdas desse equipamento (IARONKA, 2014). Um transformador ideal seria um transformador com 100% de eficiência, ou seja, sem perdas de energia. No entanto, na prática, parte da energia é dissipada na forma de calor nos enrolamentos, núcleo e estruturas adjacentes (SALUSTIANO, 2012). O calor gerado nos transformadores, devido às perdas na parte ativa destes equipamentos, afeta diretamente a vida útil do dispositivo (IARONKA, 2014). Dessa forma, devido ao grande número de transformadores presentes no sistema de distribuição de energia elétrica, justifica-se a busca por melhorias na eficiência desses dispositivos, a fim de se reduzir perdas, bem como melhorar o sistema de refrigeração destes equipamentos. A contextualização sobre perdas e, por consequência, geração de calor nos transformadores, bem como a influência da temperatura nestes equipamentos é realizada neste capítulo.

1.2. Perdas em Transformadores

As perdas nos transformadores ocorrem principalmente na parte ativa destes equipamentos, ou seja, nos enrolamentos e no núcleo. Essas perdas podem apresentar diferentes parâmetros que dependem das condições de construção, operação e manutenção do dispositivo. De um modo geral, as perdas no transformador podem ser resumidas como a soma de duas parcelas, as perdas a vazio e as perdas em carga (IARONKA, 2014).

As perdas em vazio podem ser analisadas quando o transformador esta operando sem carga, ou seja, apenas com tensão (energizado). Estas perdas são ocasionadas pela corrente de magnetização responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético. As perdas a vazio são

divididas, basicamente, em perdas por histerese, perdas por corrente de Foucault e perdas excedentes (IARONKA, 2014) (NUNES, 2011) (PICANÇO, 2006). As perdas por histerese resultam da inversão dos domínios magnéticos do material do núcleo a cada ciclo de operação. As perdas por corrente de Foucault são decorrentes das corrente parasitas induzidas pelos campos magnéticos que o núcleo está sujeito. As perdas excedentes representam as demais perdas ocorridas no núcleo, totalizando as perdas a vazio (IARONKA, 2014).

As perdas sob carga se concentram nos enrolamentos e demais componentes do transformador percorridos pela corrente de carga. As perdas sob carga são divididas basicamente em perdas ôhmicas e perdas adicionais. As perdas ôhmicas são decorrentes da circulação de corrente nos condutores dos enrolamentos, devido a resistência ôhmica presentes nestes condutores. As perdas adicionais, as quais podem ocorrer nos enrolamentos, núcleo e partes metálicas dos transformadores, resultam da dispersão do fluxo magnético (IARONKA, 2014) (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011).

1.2.1. Perdas a vazio: *Histerese*

A passagem de corrente pelos enrolamentos origina um campo magnético alternado. A intensidade deste campo magnético é proporcional à corrente que o gerou. Dessa forma, a variação da corrente provoca uma variação da intensidade do campo magnético, ocasionando, assim, uma alteração no módulo do fluxo magnético ou da indução magnética.

Essas variações acontecem respeitando a curva de saturação do material ferromagnético no qual foi gerado o campo. Para cada inversão no sentido de variação do campo magnético se tem um momento em que a intensidade de campo se anula. Um metal sujeito a um campo magnético alternado, os átomos se reorientam para ficarem alinhados com o campo que o gerou, formando pequenos ímãs, também denominados dipolos magnéticos. Quando o campo magnético alternado se anula, os átomos retornam a mesma orientação que tinham antes de serem alterados devido a aplicação do campo magnético. Esse movimento dos átomos causa atrito molecular que resulta na geração e liberação de calor. Essa geração e liberação de calor é chamada de *perda por histerese*.

Essa energia é consumida para cada inversão no sentido de orientação dos dipolos (IARONKA, 2014) (SALUSTIANO, 2012). Dessa forma, a histerese pode ser representada por uma curva de indução magnética, B , versus a intensidade de campo magnético, H . A área determinada por esta curva indica a energia dissipada no núcleo, em forma de calor, durante

um ciclo de alimentação (PICANÇO, 2006). A Figura 1.1 apresenta a curva do ciclo de histerese de um material magnético.

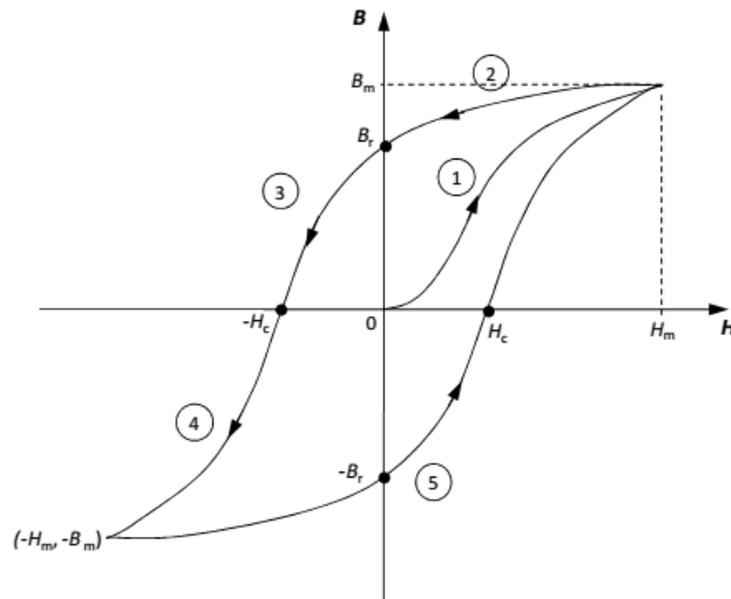


Figura 1.1 – Ciclo de histerese magnética (PRONTO, 2010).

A partir da curva apresentada na Figura 1.1 pode-se observar que ao se magnetizar um material ferromagnético com valores crescentes de intensidade de campo H até um valor máximo H_m , obtém-se uma curva semelhante à representada pelo caminho (1) (RIES, 2007). Uma vez atingida a saturação máxima, cujo valor é B_m , ao se reduzir gradativamente a intensidade de campo H , a indução não apresenta o mesmo comportamento apresentado na curva (1), ou seja, a indução apresenta valores maiores para os mesmos valores de H , conforme a curva representada pelo caminho (2), observando que para um valor de $H=0$, o material apresenta uma certa magnetização, cujo valor é B_r , chamada de magnetização remanescente (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010) (RIES, 2007). Em seguida, invertendo o sentido do campo magnético aplicado, a indução se reduz gradualmente até se anular completamente quando o campo atinge o valor $-H_c$, apresentando comportamento conforme o caminho (3) (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010). O valor deste campo, onde a indução se anula, chama-se campo coercivo ou coercividade (PRONTO, 2010). Continuando a aumentar o campo magnético em sentido contrário, a magnetização do material inverte também de sentido, conforme o caminho (4), até que se atinge a saturação, no ponto $(-H_m, -B_m)$ cujo sentido é contrário ao obtido no fim do caminho (1). Por fim, se o campo for reduzido a zero e aplicado novamente no sentido inicial, a resposta do material descreve o caminho (5),

formando, dessa forma, uma curva fechada, a qual é conhecida por *ciclo de histerese* (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010).

As perdas por histerese são proporcionais à área do laço de histerese. Dessa forma, as perdas por ciclo e por unidade de volume do material ferromagnético podem ser determinadas pela equação (1.1), segundo (RIES, 2007).

$$P_h = \frac{f}{\gamma} \int_{-B_m}^{B_m} H dB \quad (1.1)$$

Onde:

P_h = perdas por histerese por kg do material (W/kg);

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

γ = peso específico do material (kg/m³);

H = intensidade de campo magnético (Ae/m).

As perdas por histerese dependem diretamente da indução magnética ao qual o material ferromagnético esta sendo submetido. Dessa forma, ao aumentar a indução magnética, as perdas por histerese também aumentam. Porém, à medida que a indução magnética tende a saturação, as perdas por histerese também tendem a saturação, pois a área do laço pouco cresce após determinado valor de indução (RIES, 2007) (SALUSTIANO, 2012).

No fim do século XIX, Charles Proteus Steinmetz obteve uma fórmula empírica que permite calcular as perdas por histerese em função da indução máxima do material, para uma pequena faixa de variação da frequência. Esta fórmula é descrita pela equação (1.2), segundo (PRONTO, 2010) (RIES, 2007) (SALUSTIANO, 2012).

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^\alpha \quad (1.2)$$

Onde:

k_h = constante de perdas por histerese e depende das propriedades dos materiais;

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

B_m = indução magnética máxima (T);

α = coeficiente ou expoente de Steinmetz e pode variar de 0,5 a 2,3.

Materiais com ciclos de histerese estreitos, ou seja, com baixos valores de H_c , apresentam perdas magnéticas mais baixas e são mais fáceis de magnetizar e desmagnetizar, sendo conhecidos por materiais magnéticos macios (MMM), e são indicados para uso em núcleos de transformadores (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010)

1.2.2. Perdas a vazio: *Correntes de Foucault*

As perdas por corrente de Foucault, ou também chamadas de perdas por correntes parasitas, resultam da variação temporal do campo de indução magnética no material, a qual dá origem, segundo a lei geral de indução, a força eletromotriz induzida, e devido ao material ser também condutor, é induzida uma corrente chamada de *corrente de Foucault* ou *corrente parasita* (PRONTO, 2010) (SALUSTIANO, 2012). Assim como todo material condutor, o material do núcleo possui certa resistividade. Dessa forma, o material condutor do núcleo percorrido pela corrente parasita, gera perdas pelo efeito Joule (SALUSTIANO, 2012). As perdas por corrente de Foucault podem ser determinadas pela equação (1.3), segundo (RIES, 2007).

$$P_f = k_f \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot \frac{B_{ef}^2}{\rho} \quad (1.3)$$

Onde:

P_f = perdas por corrente de Foucault (W/kg);

k_f = coeficiente de perdas por Foucault, que depende das dimensões do núcleo;

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

t = espessura das chapas (m);

B_{ef} = valor eficaz da indução, ou seja, valor máximo dividido por $\sqrt{2}$ (T);

ρ = resistividade do material ($\Omega \cdot m$).

Analisando a equação (1.3) nota-se que a perda Foucault é proporcional à frequência de forma quadrática. Além disso, conclui-se que quanto maior for a resistividade do material do núcleo, menor serão as perdas Foucault. Outro fator importante e relevante é a espessura das chapas, uma vez que as perdas por corrente de Foucault reduzem com a diminuição da espessura das chapas do metal utilizado (IARONKA, 2014) (RIES, 2007) (SALUSTIANO, 2012).

Dessa forma, para atenuar as perdas por correntes parasitas, opera-se o núcleo a baixa densidade do fluxo e na sua fabricação, utiliza-se material de alta permeabilidade, com espessura das lâminas reduzidas. Assim, com a redução da espessura das lâminas aumenta-se a resistência do material e, por consequência, diminui a corrente que circula no núcleo, reduzindo assim, as perdas por corrente de Foucault (MONIZ, 2007).

Os materiais mais utilizados na construção de núcleos de transformadores de distribuição são o aço-silício e o metal amorfo, devido possuírem alta permeabilidade

magnética e alta resistividade elétrica, características que reduzem as perdas por correntes de Foucault. Além disso, o metal amorfo possui uma baixa espessura das lâminas utilizadas no núcleo de transformadores, reduzindo assim, as perdas por correntes parasitas (IARONKA, 2014).

1.2.3. Perdas a vazio: *Excedentes*

Medindo as perdas magnéticas totais no núcleo do transformador, quando este opera em regime dinâmico, e também medindo as respectivas perdas por histerese do núcleo, além disso, calculando as perdas por correntes de Foucault pela equação (1.3), observa-se que a soma das perdas por histerese e por correntes de Foucault é inferior as perdas totais. A essa diferença chama-se de perdas excedentes, que pode ser obtida a partir da equação (1.4) (PRONTO, 2010).

$$P_{exc} = P_t - P_h - P_f \quad (1.4)$$

Onde:

P_{exc} = perdas excedentes (W);

P_t = perdas totais (W);

P_h = perdas por histerese (W);

P_f = perdas por correntes de Foucault (W).

As perdas excedentes podem ocorrer em qualquer parte do transformador, sendo geralmente consequência de atrito mecânico, vibrações, ventilação, ruídos acústicos, entre outros. Além disso, estas perdas dependem de coeficientes de difícil mensuração prática, tais como tamanho de grão, condutividade elétrica, campo coercivo e coeficientes empíricos (IARONKA, 2014).

1.2.4. Perdas sob carga: *Ôhmicas*

As principais e mais significativas perdas que ocorrem nos condutores dos enrolamentos de um transformador são as perdas *ôhmicas*, ou também, denominadas perdas por efeito *Joule*. Estas perdas se devem a resistência ôhmica dos enrolamentos e estão relacionadas à corrente e ao material que compõe os condutores (IARONKA, 2014). Dessa forma, as perdas ôhmicas são causadas pela passagem da corrente elétrica de carga pelos condutores dos enrolamentos. Estas perdas são diretamente proporcionais ao quadrado da

corrente que percorre o enrolamento e diretamente proporcional a sua resistência (MONIZ, 2007), conforme a equação (1.5), descrita por (RIES, 2007).

$$W_0 = I^2 R_{CC} \quad (1.5)$$

Onde:

W_0 = perdas ôhmicas nos enrolamentos (W);

I = corrente de carga (A);

R_{CC} = resistência ôhmica (Ω).

As perdas ôhmicas podem ser obtidas também através da equação (1.6), derivada da equação (1.5) e descrita segundo (RIES, 2007).

$$W_0 = \frac{\rho}{\gamma} \cdot J^2 \cdot P_C \quad (1.6)$$

Onde:

ρ = resistividade do material ($\Omega \cdot m$);

γ = peso específico do material (kg/m^3);

J = densidade de corrente (A/m);

p_C = peso do condutor (kgf).

As perdas nos enrolamentos são sempre obtidas a uma temperatura de referência em função da classe de temperatura dos materiais isolantes empregados. A Tabela 1.1 apresenta as classes de temperatura dos materiais isolantes, bem como as temperaturas de referência das perdas nos transformadores (RIES, 2007).

Tabela 1.1 – Classe de isolamento dos materiais e temperatura de referência das perdas.

Classe	Classe de Temperatura (°C)	Temperatura de Referência (°C)
A	105	75
B	130	75
F	155	115
H	180	115

Fonte: (RIES, 2007).

Devido a resistividade variar com a temperatura nos condutores metálicos, esta deve ser dada para a temperatura de referência. Assim, conhecida a resistividade a essa temperatura, que normalmente é 20°C, pode-se determinar este parâmetro para qualquer temperatura, a partir da equação (1.7) (RIES, 2007).

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (1.7)$$

Onde:

ρ = resistividade do material ($\Omega.m$);

ρ_{20} = resistividade a 20°C ($\Omega.m$);

α_{20} = coeficiente de variação da resistividade a 20°C ($1/^\circ C$);

θ = temperatura de referencia da classe de isolamento do material utilizado ($^\circ C$).

A Tabela 1.2 mostra a resistividade a 20°C de alguns materiais e o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura, também a 20°C (RIES, 2007).

Tabela 1.2 – Resistividade de materiais condutores.

Material	ρ_{20} ($\mu\Omega m$)	α_{20} ($1/^\circ C$)
Alumínio	0,028	0,00403
Arame de aço	0,10 a 0,15	0,00400
Ouro	0,023	0,00450
Cobre	0,0172	0,00393
Prata	0,016	0,00410
Constantan	0,49 a 0,51	0,00003
Ni Cr.80 20	1,09	0,00010
Carvão	35	0,0005
Grafite p/eletrodo	7 a 8	0,00000

Fonte: (RIES, 2007).

Segundo (RIES, 2007), os materiais condutores normalmente utilizados na construção dos enrolamentos de transformadores, são o cobre e o alumínio, pois apresentam boas propriedades elétricas como condutores conjugadas com seus preços.

1.2.5. Perdas sob carga: *Parasitas*

Um campo eletromagnético é criado quando os enrolamentos de um transformador são percorridos por uma corrente elétrica alternada. Este campo eletromagnético, por sua vez, atravessa cada um dos condutores dos enrolamentos, cuja intensidade é diretamente proporcional a magnitude da corrente. Assim, cada condutor envolvido pelo fluxo magnético é submetido a uma tensão induzida responsável pelo fluxo de corrente parasita, e por consequência, pela perda por efeito desta corrente nos enrolamentos do transformador (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011). As perdas decorrentes das correntes parasitas podem ser calculadas de forma aproximada pela equação (1.8), segundo (SALUSTIANO, 2012).

$$P_{F_cond} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \gamma_{cond} \rho_{cond}} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2 \quad (1.8)$$

Onde:

P_{F_cond} = perdas de Foucault (parasitas) nos condutores (W);

ρ_{cond} = resistividade do material ($\Omega \cdot m$);

γ_{cond} = peso específico do material (kg/m^3);

B = indução magnética (T);

f = frequência (Hz);

t_{cond} = espessura do condutor (m).

Segundo (RIES, 2007), o cálculo das perdas parasitas é feito através de uma aproximação do fluxo de dispersão equivalente. A essa aproximação chama-se de fluxo disperso equivalente de Rogowski. O detalhamento da obtenção das perdas parasitas, através da aproximação de Rogowski é dado em (RIES, 2007).

Apesar das perdas parasitas nos condutores apresentarem pouca influência nas perdas totais dos transformadores, nota-se, a partir da equação (1.8), que as perdas parasitas são proporcionais ao quadrado da espessura do condutor. Dessa forma, o aumento demasiado da espessura dos condutores pode influenciar significativamente as perdas totais. Portanto, aconselha-se a utilização de condutores em paralelo, quando grandes seções forem necessárias (SALUSTIANO, 2012). A Figura 1.2 mostra a influência do uso de condutores em paralelo nas perdas parasitas.

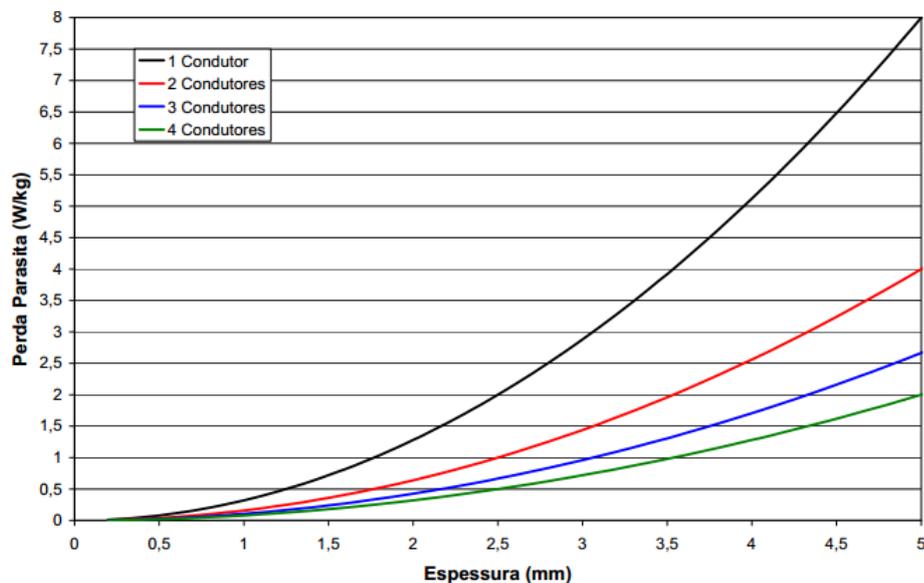


Figura 1.2 – Perdas parasitas em função do número de condutores em paralelo (SALUSTIANO, 2012).

1.3. Temperatura e Vida Útil do Transformador

A temperatura de operação de um transformador, dentre vários fatores, é o principal agente determinante da vida útil deste equipamento (IARONKA, 2014). A elevação da temperatura ocorre devido às perdas, oriundas da parte ativa do transformador, que afeta diretamente os componentes do equipamento. Os efeitos das altas temperaturas atingidas pelos transformadores podem alterar as características dos materiais que o constituem, principalmente os isolantes, comprometendo, dessa forma, o desempenho e a segurança do equipamento (BARBOSA, 2005).

O principal componente da isolamento sólida dos enrolamentos dos transformadores, a celulose, é afetada diretamente pela temperatura. Uma vez que a integridade dessa isolamento é o fator determinante da vida útil do transformador. O envelhecimento da isolamento do transformador pode provocar também oxidação, endurecimento da isolamento, e por consequência, perda de resistência mecânica e redução da rigidez dielétrica (BARBOSA, 2005) (IARONKA, 2014).

Segundo a (ABNT NBR 5356-1, 2007), os transformadores são classificados, de acordo com as características térmicas de operação, nas seguintes categorias:

- Classe 55 °C: são os transformadores cuja elevação de temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65 °C;
- Classe 65 °C: são os transformadores cuja elevação de temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 80 °C.

Duas características principais da isolamento devem ser consideradas, em conjunto, para se determinar o efeito das elevadas temperaturas, sobre a isolamento de um transformador: a rigidez dielétrica e a resistência mecânica. Estudos sobre a vida útil da isolamento sólida dos transformadores, e consequentemente, a vida útil do transformador, foram iniciados na década de 1920, quando Monstinger realizou ensaios de aquecimento do material usado na isolamento dos enrolamentos de transformadores (BARBOSA, 2005). Segundo a (IEEE C57.91-1995, 2012), o “fim de vida útil” do transformador é determinado quando os níveis de resistência mecânica dos condutores fica abaixo de valores 20% do valor inicial, uma vez que os equipamentos operam satisfatoriamente com estes valores de solicitação. Durante a operação

do transformador, existem três mecanismos que envelhecem o papel isolante: o aquecimento, a hidrólise e a oxidação. Dentre estes três, destaca-se o aquecimento no envelhecimento do papel isolante, uma vez que a hidrólise e a oxidação podem ser controladas por sistemas de preservação do óleo existentes nos transformadores (BARBOSA, 2005).

As características que mais influenciam no cálculo da perda de vida útil do transformador, por envelhecimento térmico, segundo a (ABNT NBR 5416, 1997), são:

- Elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento (sob carga nominal) sobre a temperatura do topo do óleo, que é obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento;
- Elevação da temperatura no topo do óleo sob carga nominal em relação a temperatura ambiente;
- Constante de tempo térmica do transformador;
- Constante de tempo térmica do ponto mais quente;
- Relação entre as perdas sob carga e a vazio;
- Expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo, o qual depende do método de resfriamento em funcionamento;
- Expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do método de resfriamento em funcionamento no transformador.

Recomenda-se, então, que a temperatura média do topo do óleo não deve ser usada como único parâmetro de análise, devido a inércia térmica na elevação de temperatura do óleo, uma vez que o transformador pode ser submetido a carregamentos danosos à sua vida útil em pequenos intervalos de tempo, sem que a temperatura limite do óleo seja excedida (BARBOSA, 2005).

1.4. Influência da Temperatura Ambiente nos Transformadores

As condições do local de instalação de um equipamento elétrico exercem influência sobre este. No caso dos transformadores, a temperatura ambiente é a principal condição ambiental que afeta a operação destes equipamentos, uma vez que a temperatura ambiente é somada à temperatura de elevação durante a operação do transformador, determinado, assim, o limite térmico do equipamento (IARONKA, 2014).

Segundo as normas (IEEE C57.91-1995, 2012) (IEEE C57.92-1981, 1996), o cálculo do carregamento máximo do transformador deve ser feito utilizando a temperatura ambiente

real no período em que se deseja calcular a capacidade de carga do transformador. No entanto, os cálculos podem ser feitos através do valor de temperatura média, obtido a partir de valores históricos de temperatura, fornecidos pelo serviço de meteorologia (BARBOSA, 2005).

Segundo a (IEEE C57.91-1995, 2012), norma que aborda o efeito da temperatura ambiente, há uma relação entre temperatura ambiente e carregamento do transformador, conforme é apresentada na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Alteração do carregamento com relação a temperatura ambiente.

Tipo de Resfriamento	% da Potência Nominal do Transformador	
	Decréscimo de carga para cada 1°C de elevação da temperatura ambiente	Acréscimo de carga para cada 1°C de queda da temperatura ambiente
Ventilação normal – OA	1,5	1,0
Resfriamento utilizando água – OW	1,5	1,0
Ventilação forçada – AO/FA, AO/FA/FA	1,0	0,75
Óleo e ar forçado e resfriamento utilizando água – FOA, FOW e OA/FOA/FOA	1,0	0,75

Fonte: (IEEE C57.91-1995, 2012).

Dessa forma, pode-se concluir que a temperatura ambiente é um fator que deve ser levado em consideração ao se efetuar um cálculo de carregamento admissível em transformadores (BARBOSA, 2005).

1.5. Aspectos Térmicos do Transformador

Durante a sua operação, o transformador gera perdas. As perdas, por sua vez, causam aquecimento nas partes correspondentes do equipamento, sendo que este calor gerado deve ser transferido das partes ativas do transformador para o óleo, e do óleo para o ambiente externo, através de radiadores ou trocadores de calor (TAMURA, 2009).

O processo de resfriamento em transformadores consiste de um ciclo térmico, conforme ilustrado na Figura 1.3. A transferência do calor gerado na parte ativa do transformador para o ambiente externo, sendo que o responsável pela condução do calor internamente é o óleo isolante, consiste basicamente de duas etapas. A primeira etapa de dissipação do calor ocorre entre os pontos A e B, que representa a transferência do calor

gerado na parte ativa para o óleo isolante. A segunda etapa consiste na dissipação do calor contido no óleo para o ambiente externo, através do sistema de trocadores de calor, neste caso, aletas do tanque, sendo que este processo ocorre entre os pontos C e D (IARONKA, 2014).

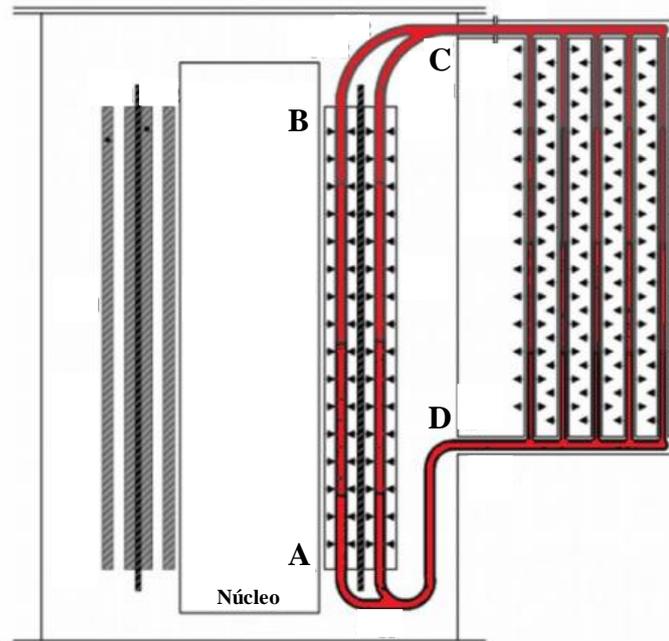


Figura 1.3 – Processo de resfriamento de um transformador a óleo (Adaptado de: (SALUSTIANO, 2012))

Dessa forma, o ciclo de transferência de calor se completa e a temperatura do transformador se estabiliza em uma faixa de valores aceitável pela norma (IARONKA, 2014).

1.6. Conclusão

Este capítulo apresentou os conceitos básicos sobre perdas em transformadores e a geração de calor nestes equipamentos provenientes dessas perdas. Além disso, apresentou uma contextualização da influência da temperatura nestes dispositivos.

Com relação às perdas nos transformadores, as quais podem ser resumidas em duas parcelas: perdas a vazio e perdas sob carga, foi visto que estas ocorrem principalmente na parte ativa destes equipamentos, ou seja, nos enrolamentos e no núcleo, e são dependentes das condições de construção, operação e manutenção dos transformadores, tais como, tipo do material magnético do núcleo, indução magnética de operação, resistividade do material do núcleo, frequência de operação, laminação do núcleo e material dos condutores utilizados nos enrolamentos.

A temperatura de operação de um transformador, dentre vários fatores, é o principal agente determinante da vida útil deste equipamento, uma vez que as altas temperaturas atingidas podem alterar as características dos materiais que o constituem, comprometendo assim, o desempenho e a segurança do dispositivo.

O processo básico de resfriamento de um transformador consiste na troca do calor gerado para o óleo, e do óleo para o ambiente externo, através de radiadores ou trocadores de calor.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E GEOMETRIAS DE RADIADORES PARA SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

2.1. Introdução

Diversos tipos de problemas físicos que são encontrados nas ciências e nas engenharias são descritos matematicamente na forma de equações diferenciais parciais ordinárias. A solução exata usualmente é fruto de um método de solução analítica encontrada através de métodos algébricos e diferenciais aplicados a geometrias e condições de contorno particulares. A aplicação generalizada dos métodos analíticos para diferentes geometrias e condições de contorno torna impraticável ou até mesmo impossível a obtenção de soluções analíticas exatas. Com o intuito de solucionar os problemas físicos que podem ser descritos em equações diferenciais surgiu o Método de Elementos Finitos. Esse método é bastante genérico, e pode ser aplicado em praticamente todas as áreas de engenharia, como na análise de tensões e deformações, transferência de calor, mecânica dos fluidos e gases, eletromagnetismo, entre outros, inclusive recebendo designações específicas como na mecânica dos fluidos computacionais (CFD) e no eletromagnetismo computacional (CEM) (IARONKA, 2014). Dessa forma, este capítulo tem como objetivo fazer a contextualização do Método de Elementos Finitos, que é utilizado nas simulações térmicas de configurações de sistema de refrigeração para transformadores de distribuição.

Além disso, geometrias de radiadores para sistemas de refrigeração de transformadores, com o propósito de analisar a eficiência de refrigeração destes sistemas, são propostas neste capítulo.

2.2. Método de Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas

propriedades do meio original (LOTTI, MACHADO, *et al.*, 2006) (ALVES, 2007). Esses elementos são descritos por equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno, e possivelmente condições iniciais (IARONKA, 2014) (SOUZA, 2003).

O MEF originou-se no final do século XVII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos. Devido à limitação existente no processamento de equações algébricas, o desenvolvimento de teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, feito durante séculos, pouco evoluiu. A elaboração e resolução de sistemas de equações complexas se deram por volta de 1950, com o advento da computação (LOTTI, MACHADO, *et al.*, 2006). Em 1956, M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin e L. J. Topp, trabalhando em um projeto de aeronaves para Boeing, propuseram um método de análise estrutural aplicando o Método de Elementos Finitos (IARONKA, 2014) (LOTTI, MACHADO, *et al.*, 2006).

No ano de 1960, as primeiras versões de programas de computador de cálculo utilizando o MEF começaram a serem distribuídas. Não demorou para que grandes investimentos começassem a surgir na área, principalmente quando a NASA, Agência Espacial Norte Americana, financiou um projeto para desenvolver um programa de cálculo pelo MEF de uso geral, que ficou conhecido como NASTRAN. Esse programa incluía uma grande manipulação de dados e permitia análise de tensão e deformação, cálculo de vigas, de problemas de cascas e placas, análise de estruturas complexas como asas de aviões e análise de vibrações em duas e três dimensões. Paralelamente ao desenvolvimento do NASTRAN, por volta de 1969, com o intuito de análise de reatores nucleares surgiu um novo conceito de programa de MEF, o ANSYS. Esse método tinha capacidade de análise de problemas lineares e não-lineares e essas características tornariam o software ANSYS um dos programas de elementos finitos comerciais mais utilizados atualmente (IARONKA, 2014, p. 53).

Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio original do problema são conectados entre si por pontos denominados de nós ou pontos nodais. O conjunto dos nós e os elementos finitos chamam-se, usualmente, de malha de elementos finitos (SOUZA, 2003), conforme ilustrado na Figura 2.1.

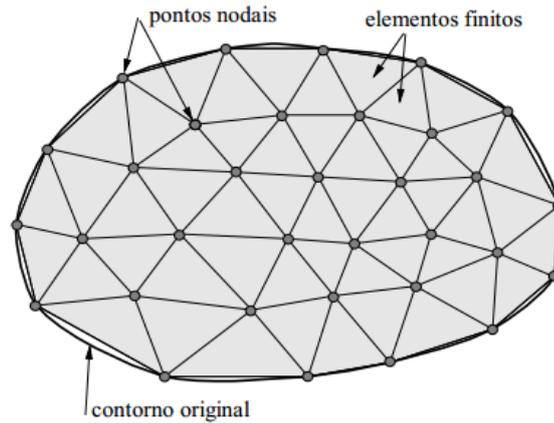


Figura 2.1 – Malha de elemento finitos (SOUZA, 2003).

Os diversos tipos de elementos finitos já desenvolvidos apresentam diversas formas geométricas (triangular, quadrilateral, cúbico, etc) em função da dimensão e do tipo do problema (bi ou tridimensional). A Figura 2.2 apresenta a geometria de vários tipos de elementos finitos (IARONKA, 2014) (SOUZA, 2003).

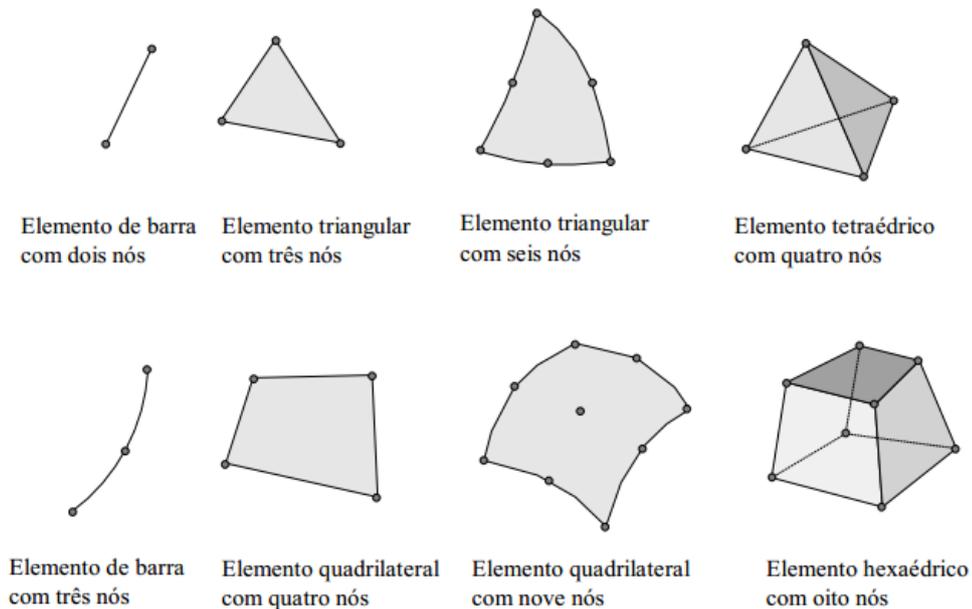


Figura 2.2 – Diferentes tipos de elementos finitos (IARONKA, 2014).

A quantidade de nós e elementos, o tipo e tamanho dos elementos finitos presentes na malha são fatores determinantes na precisão do método, uma vez que a convergência é um dos aspectos mais importantes do MEF. Dessa forma, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero e, conseqüentemente, o número de nós tende ao infinito, a solução encontrada converge para a solução exata do problema, ou seja, mais preciso são os resultados (SOUZA, 2003).

2.2.1. Qualidade de Malha

Ao se falar de simulações em elementos finitos, a etapa de geração e criação de malhas para os domínios a serem simulados é de extrema importância, visto que uma malha de boa qualidade garante resultados confiáveis ao final da simulação, da mesma maneira que uma malha com baixa qualidade pode gerar resultados não confiáveis. Sendo assim, existem alguns métodos e critérios que informam se a malha que foi ou está sendo gerada é de boa qualidade ou não.

Entre os critérios disponíveis estão os seguintes: *Orthogonal Quality*, *Skewness*, *Aspect Ratio* e *Maximum Corner Angle*. Cada tipo de simulação possui seus critérios mais importantes para serem analisados. Nas simulações que seguem, são avaliados os critérios *Orthogonal Quality* e *Skewness*, que informam a qualidade da superfície e do volume do elemento criado.

O *Orthogonal Quality* informa valores obtidos a partir de cálculos com os vetores normais e os que partem do centro da célula. Para esse critério, conforme ilustra a Figura 2.3, quanto menor for o valor obtido para o elemento (mais próximo de zero), pior é a sua qualidade, e quanto maior for o valor obtido (mais próximo de um), melhor sua qualidade (ANSYS, 2014).

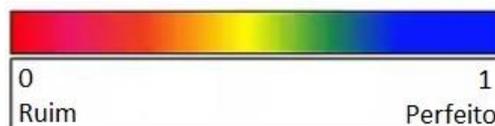


Figura 2.3 – Critério *Orthogonal Quality* (ANSYS, 2014).

Já o *Skewness* baseia seus valores em cálculos a partir dos ângulos dos elementos gerados pela malha. A análise desse critério é o contrário do anteriormente citado, ou seja, quanto mais próximo de zero o valor obtido para o elemento, melhor a sua qualidade, e quanto mais próximo de um, pior sua qualidade, conforme mostra a Figura 2.4.

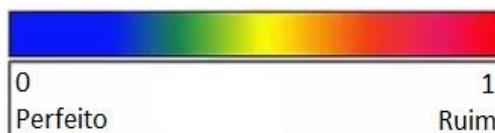


Figura 2.4 – Critério *Skewness* (ANSYS, 2014).

Como cada simulação realizada possui características diferentes, cada critério possui um espectro geral mostrando a qualidade da malha para cada valor. A Figura 2.5 apresenta a qualidade de cada espectro para os critérios *Orthogonal Quality* e *Skewness*.

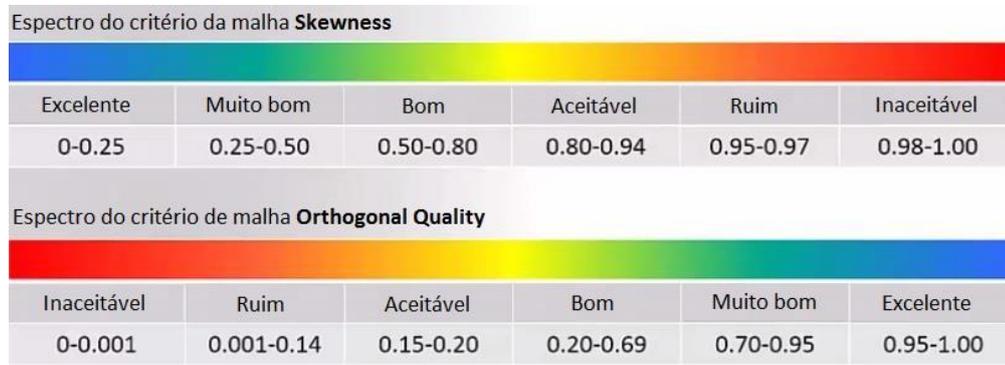


Figura 2.5 – Qualidade dos espectros (ANSYS, 2014).

A fim de comprovar a qualidade dos resultados das validações das simulações em elementos finitos, descritas no Apêndice A, é apresentado a seguir os valores obtidos para a simulação do transformador composto por um sistema de refrigeração do tipo harpa, também descrito no Apêndice A. A Figura 2.6 apresenta o resultado da simulação para o critério *Orthogonal Quality*.

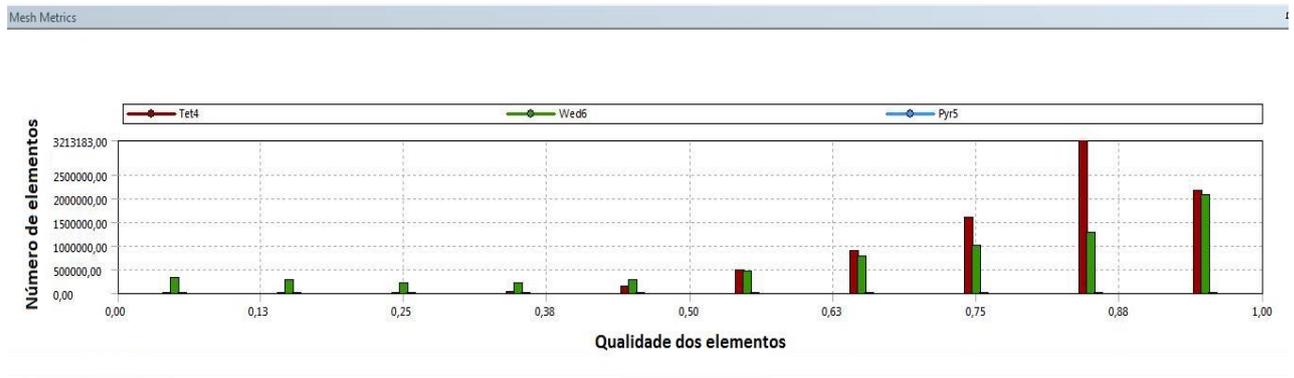


Figura 2.6 – Resultado da simulação para o critério *Orthogonal Quality*.

Da mesma forma, a Figura 2.7 mostra o resultado da simulação para o critério *Skewness*.

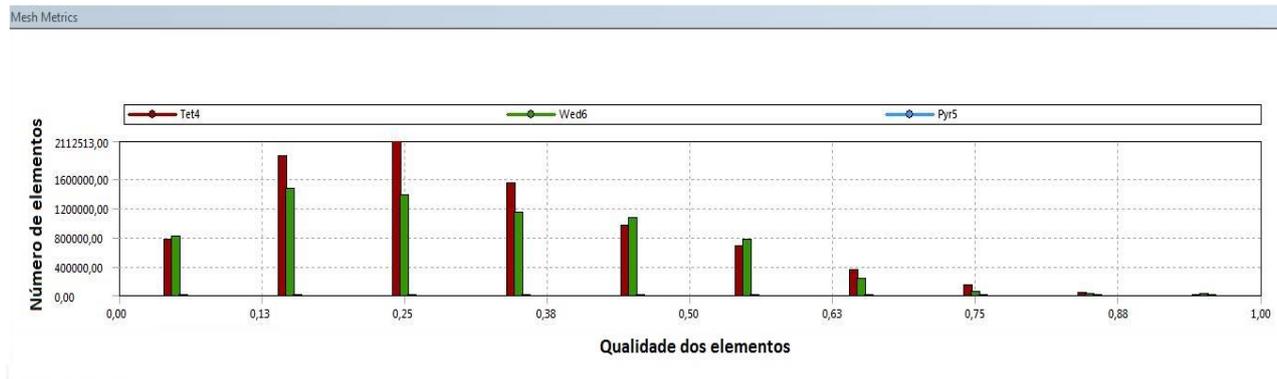


Figura 2.7 – Resultado da simulação para o critério *Skewness*.

Observando a Figura 2.6 e a Figura 2.7, nota-se que os dois critérios apresentam elementos com valores na faixa de “inaceitável” dos seus espectros, contudo, é praticamente impossível gerar tantos elementos sem nenhuma falha. O que garante a confiabilidade dessa malha gerada é o fato da grande maioria dos elementos estarem nas faixas entre “bom” e “excelente” dos espectros apresentados.

Dessa forma, mantém-se um padrão de malha, com boa qualidade, para todas as outras simulações, tanto para as outras validações quanto para as variações feitas para o estudo térmico do sistema de refrigeração.

2.3. Etapas para a Análise com MEF

Segundo (IARONKA, 2014) e (SÁNCHEZ, 2001) a simulação em elementos finitos consiste basicamente em três etapas pré-definidas ou consideradas padrão: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Na etapa de *pré-processamento*, a geometria do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno (perdas, temperatura, velocidade) são descritas através de uma estrutura que define estes parâmetros. Nesta etapa, a malha de elementos finitos pode ser criada e visualizada, sendo que quanto menor cada elemento da análise, mais preciso e confiável é o resultado da simulação (IARONKA, 2014).

A etapa de *processamento* consiste em solucionar eficientemente uma equação diferencial com todas as restrições impostas ao modelo na etapa de pré-processamento, através de um algoritmo numérico (SÁNCHEZ, 2001).

Por fim, a etapa de *pós-processamento* é a etapa de apresentação dos resultados da simulação. O usuário pode inspecionar a solução pontualmente, plotar resultados de interesse

na forma de gráficos e calcular equações para obter valores dos resultados das simulações (IARONKA, 2014).

2.4. Validação de Simulações Térmicas Utilizando o Método de Elementos Finitos

As simulações em elementos finitos se inicia com a escolha do modelo do transformador a ser simulado e analisado. A Figura 2.8 apresenta o modelo de um transformador de distribuição trifásico com potência de 45 kVA e sistema de refrigeração formado por aletas no formato elíptico.

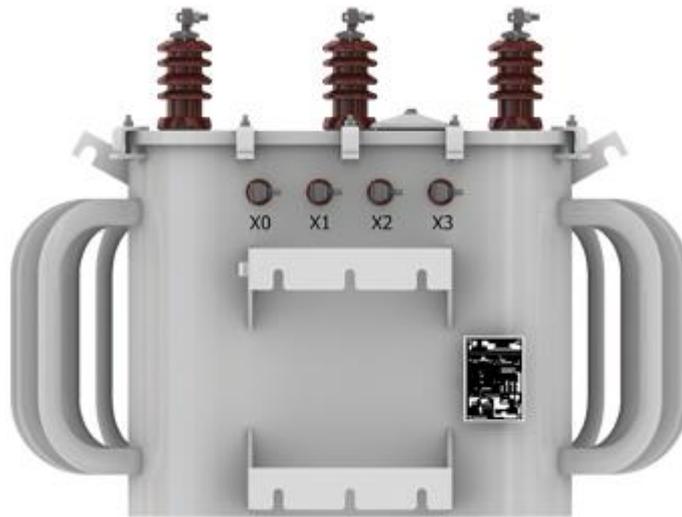


Figura 2.8 – Transformador de distribuição trifásico (ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A, 2014).

Com as informações de projeto, como cotas e tamanhos de cada parte do transformador, fornecidas pela fábrica, e valores de perdas do transformador, obtidos através dos ensaios padrões em chão de fábrica, é possível simular o comportamento térmico da configuração do sistema de refrigeração do equipamento. Para tanto, inicialmente, os dados construtivos são reproduzidos em um software de desenho 3D, conforme é apresentado na Figura 2.9.

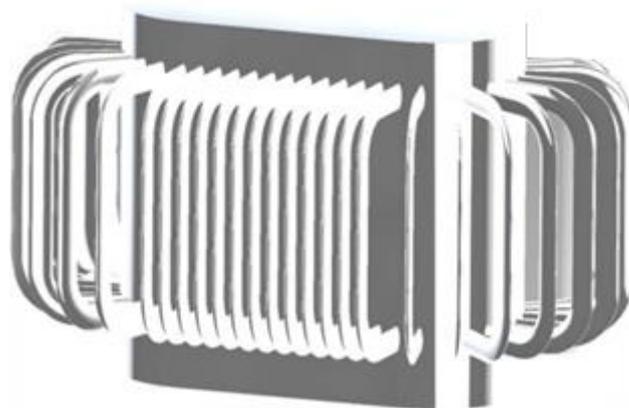


Figura 2.9 – Reprodução em 3D do transformador em análise.

Após isso, as perdas, obtidas em chão de fábrica, são aplicadas na parte ativa do transformador (núcleo e enrolamentos), conforme mostra a Figura 2.10.

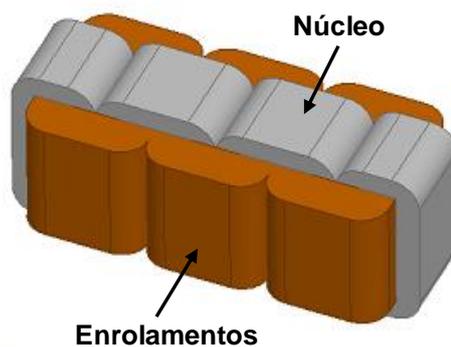


Figura 2.10 – Parte ativa do transformador.

O próximo passo da análise é a definição e aplicação da malha de simulação, conforme é ilustrado na Figura 2.11.

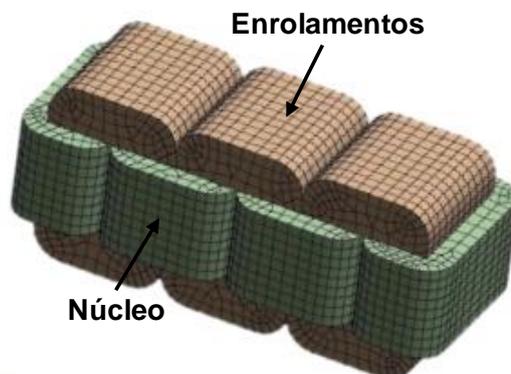
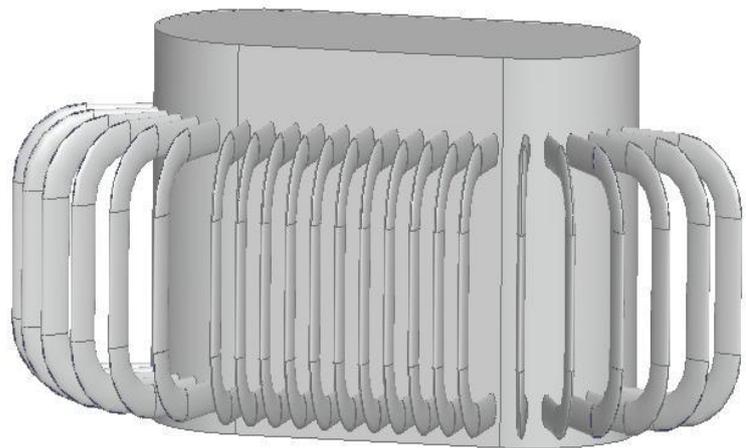


Figura 2.11 – Malha da parte ativa do transformador.

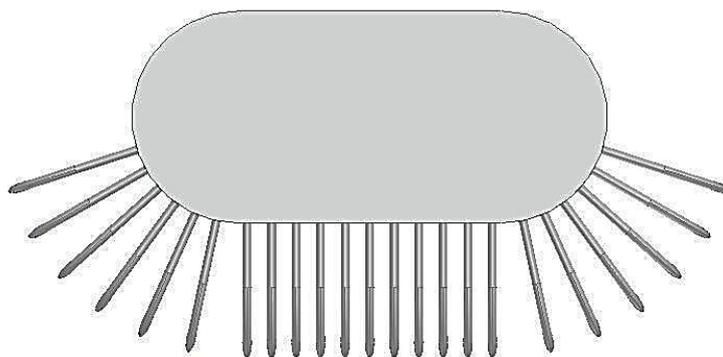
A partir dessas premissas são descritos e simulados quatro modelos de transformadores de distribuição para a validação do método de elementos finitos em simulações térmicas no software Ansys CFX, conforme segue abaixo. É importante ressaltar que todos os modelos simulados e analisados a seguir são projetados e fabricados pela Romagnole Produtos Elétricos S.A.

2.4.1. Transformador Modelo 1

O modelo 1 consiste em um transformador trifásico com potência de 45 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de aço-silício do tipo envolvente, óleo mineral isolante, enrolamentos de alumínio e sistema de refrigeração formado por aletas no formato elíptico, conforme mostra a Figura 2.12.



(a)



(b)

Figura 2.12 – Reprodução em 3D do transformador Modelo1. (a) Visão frontal. (b) Visão superior

Com o modelo do sistema de refrigeração definido, a malha é definida e aplicada à geometria. A malha do óleo necessita uma atenção maior, pois o movimento de entrada desse fluido na aleta é determinante no desempenho da refrigeração. A malha aplicada neste modelo para realização da simulação é apresentada na Figura 2.13, com detalhamento na entrada da aleta no tanque.

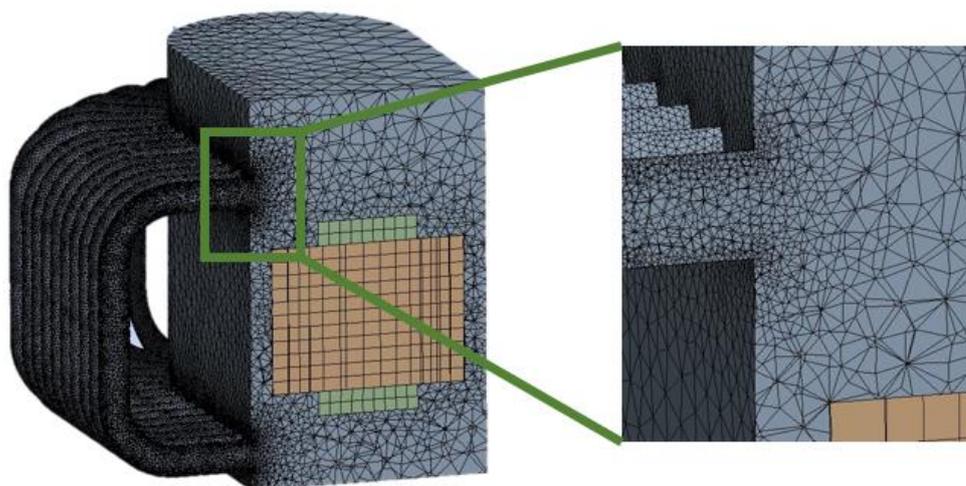


Figura 2.13 – Malha interna do transformador Modelo 1.

Este transformador possui o sistema de refrigeração composto por aletas no formato elíptico, igualmente espaçadas no tanque. A temperatura absoluta da parte externa do transformador para esta configuração do sistema de refrigeração é apresentada na Figura 2.14.

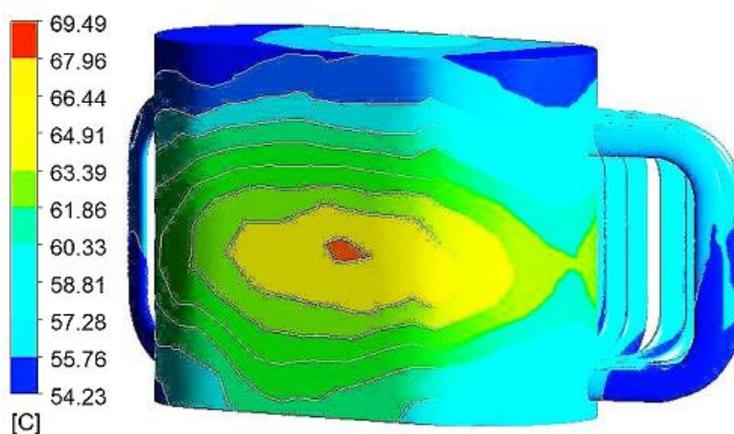


Figura 2.14 – Temperatura externa do transformador Modelo 1.

Uma das regiões de maior interesse de monitoramento da temperatura no transformador é o óleo, pois é o principal responsável pelo envelhecimento do material isolante, o qual é responsável pela vida útil do equipamento. No óleo, a região de maior

temperatura e conseqüentemente maior preocupação é a região do topo de óleo. Logo, uma das variáveis controladas pela (ABNT NBR 5440, 2014) é a temperatura de topo de óleo. Na Figura 2.15 é mostrada a temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo.

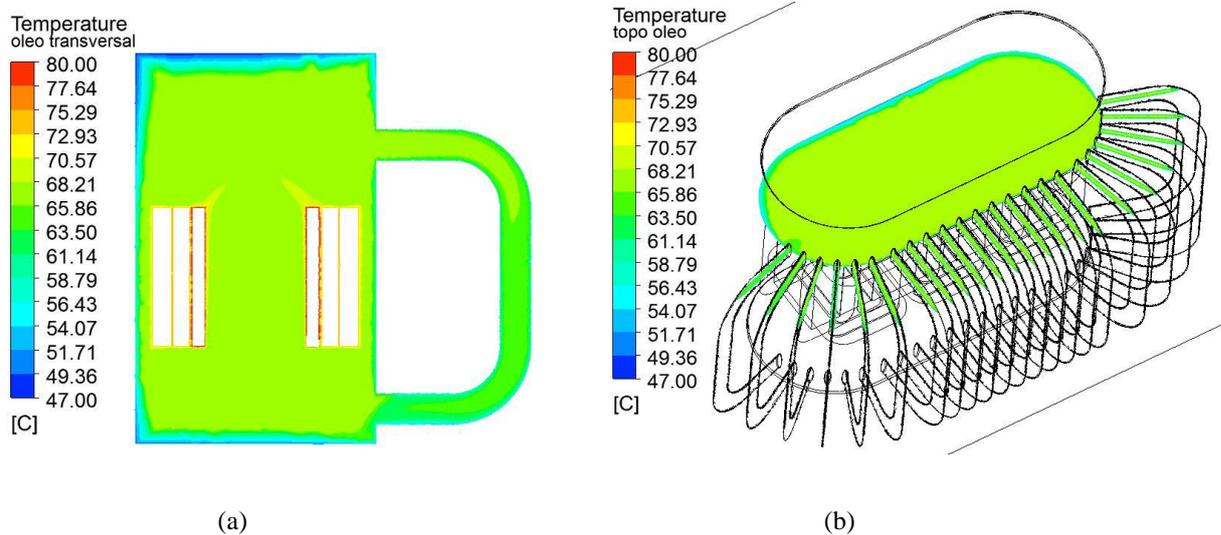
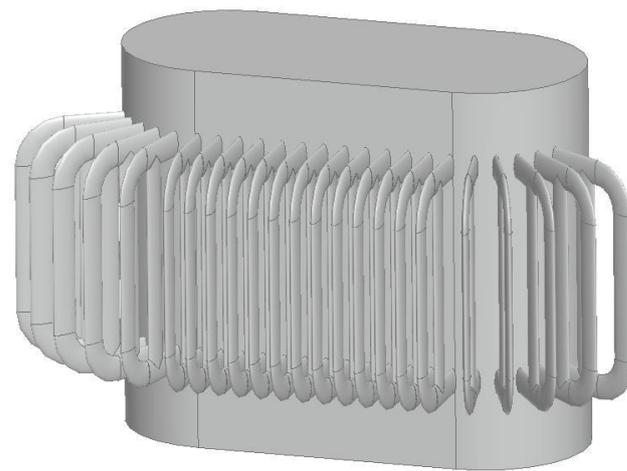


Figura 2.15 – Temperatura do óleo do Modelo 1. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo

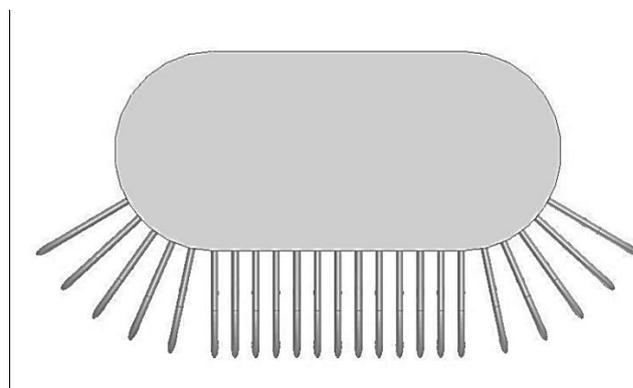
Esse modelo atingiu uma temperatura média geral do óleo e uma temperatura média do topo de óleo igual a $63,52^{\circ}\text{C}$ e $64,29^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A temperatura média do topo de óleo atingida por esse modelo de transformador através de testes práticos é de $63,27^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, o erro obtido foi de apenas 1,61%, o que é muito pequeno e configura uma simulação correta, visto que, em análises em CFD (*Computational Fluid Dynamics*), trabalha-se com erros de até 10%.

2.4.2. Transformador Modelo 2

Este modelo consiste em um transformador trifásico com potência de 75 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de aço-silício do tipo envolvente, óleo mineral isolante, enrolamentos de alumínio e sistema de refrigeração formado por aletas no formato elíptico, conforme mostra a Figura 2.16.



(a)



(b)

Figura 2.16 – Reprodução em 3D do transformador Modelo 2. (a) Visão frontal. (b) Visão superior

A Figura 2.17 apresenta a malha aplicada neste modelo para realização da simulação.

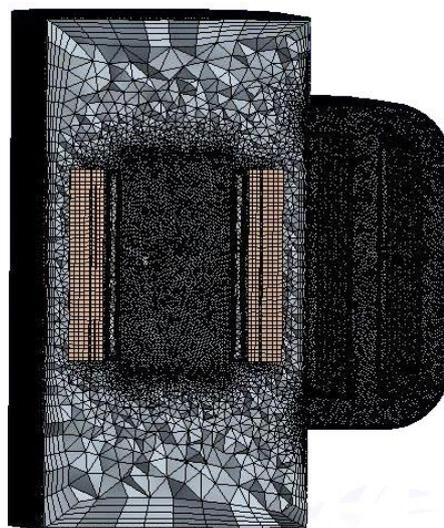


Figura 2.17 – Malha interna do transformador Modelo 2.

Este transformador possui o sistema de refrigeração composto por aletas no formato elíptico, igualmente espaçadas no tanque. A Figura 2.18 mostra a temperatura absoluta da parte externa do transformador para esta configuração do sistema de refrigeração.

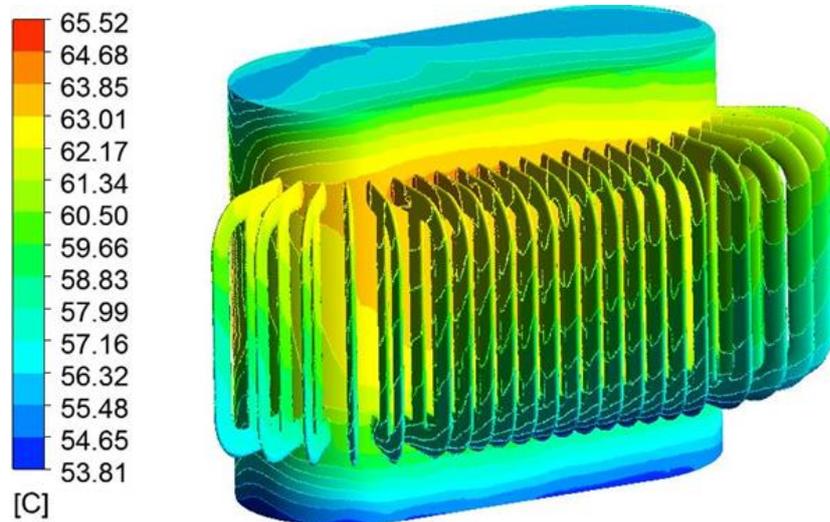


Figura 2.18 – Temperatura externa do transformador Modelo 2.

A temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo são mostradas na Figura 2.19.

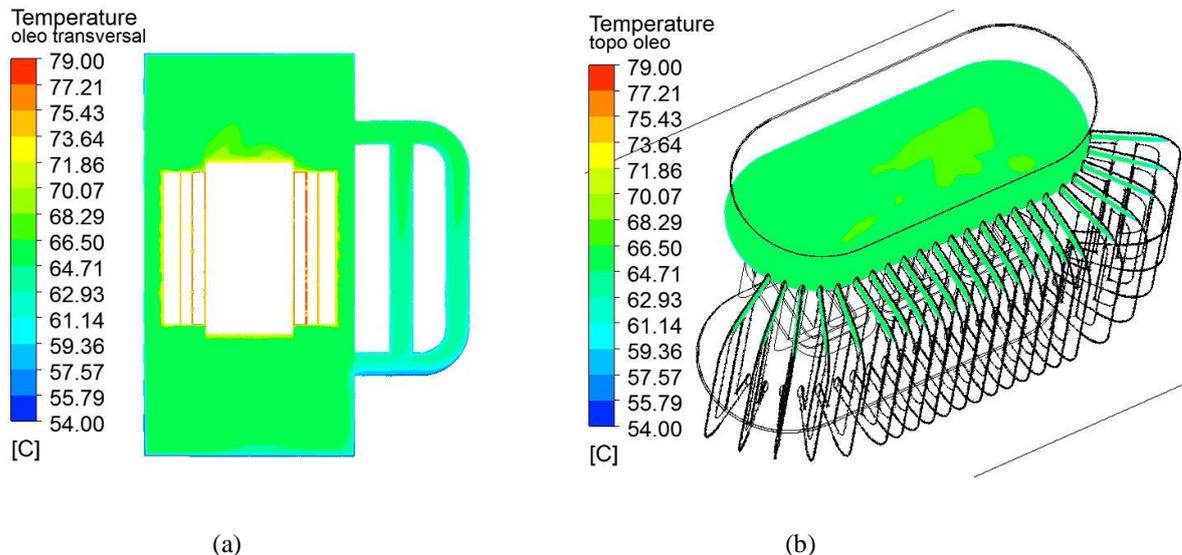


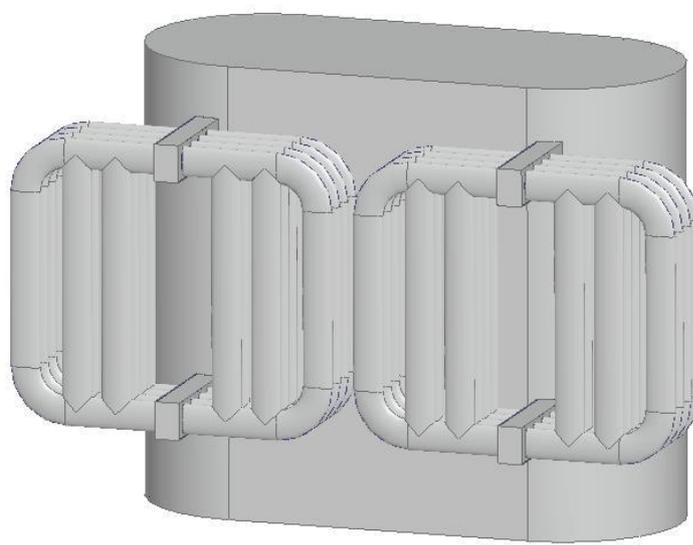
Figura 2.19 – Temperatura do óleo do Modelo 2. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo

A temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo atingida por este modelo é de 63,10° C e 64,63° C, respectivamente. A temperatura média do topo de óleo atingida por esse modelo de transformador através de testes práticos é de 65,82° C. Dessa

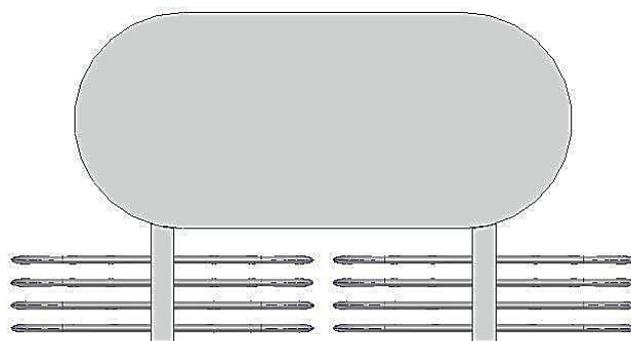
forma, o erro obtido foi de aproximadamente 1,80%, configurando, assim, a simulação correta.

2.4.3. Transformador Modelo 3

Da mesma forma que o Modelo 2, este modelo consiste em um transformador trifásico com potência de 75 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de aço-silício do tipo envolvente, óleo mineral isolante, enrolamentos de alumínio e sistema de refrigeração do tipo harpa, conforme mostra a Figura 2.20.



(a)



(b)

Figura 2.20 – Reprodução em 3D do transformador Modelo 3. (a) Visão frontal. (b) Visão superior

A malha aplicada neste modelo para a execução da simulação é apresentada na Figura 2.21.

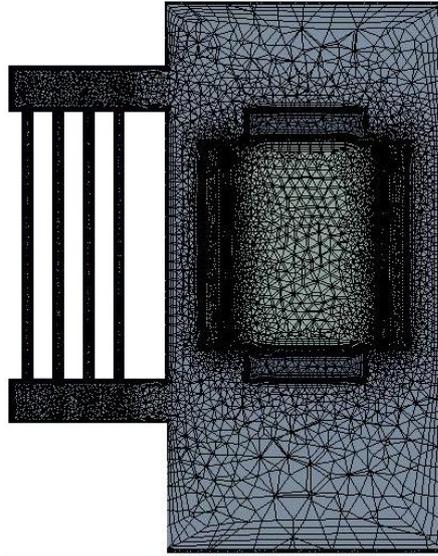


Figura 2.21 – Malha interna do transformador Modelo 3.

A temperatura absoluta da parte externa do transformador para esta configuração do sistema de refrigeração é mostrada na Figura 2.22.

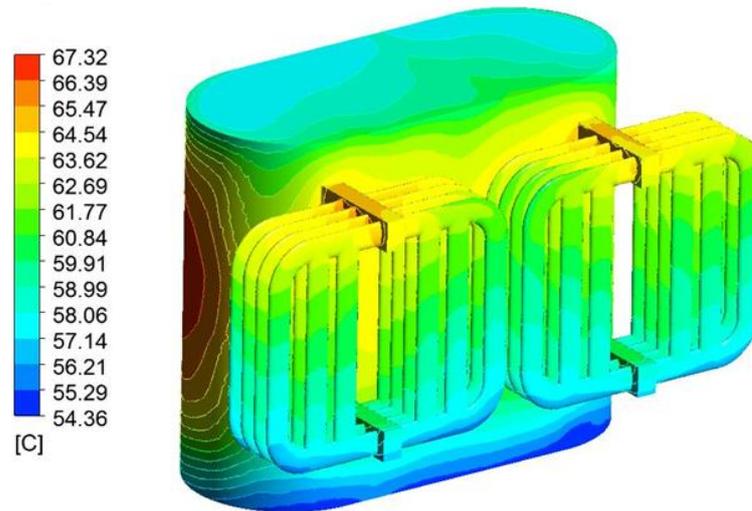


Figura 2.22 – Temperatura externa do transformador Modelo 3.

A Figura 2.23 ilustra a temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo.

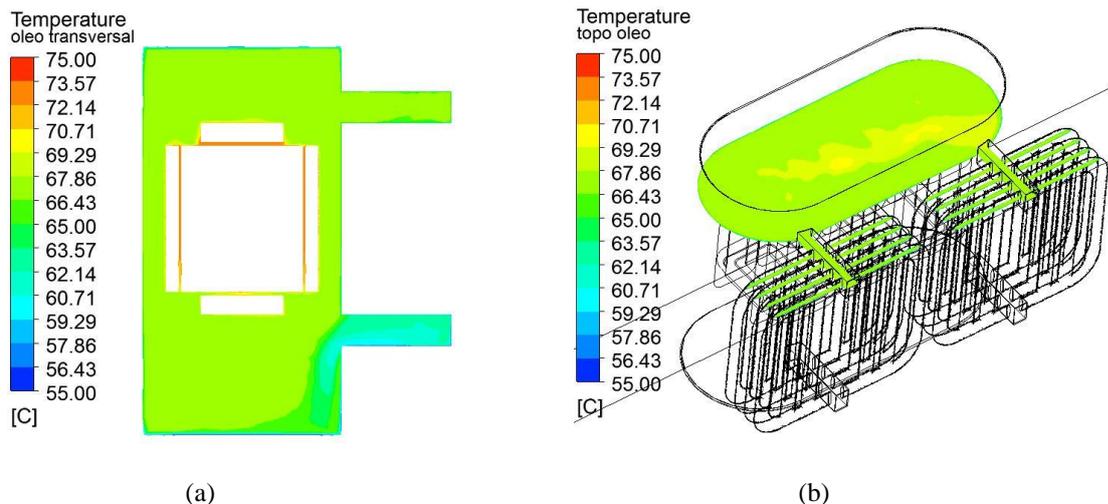
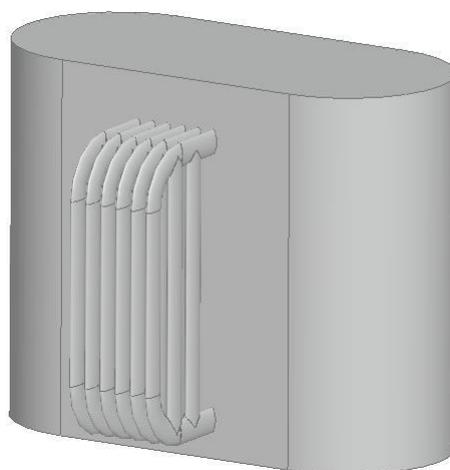


Figura 2.23 – Temperatura do óleo do Modelo 3. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo

Esse modelo atingiu uma temperatura média geral do óleo e uma temperatura média do topo de óleo igual a $66,52^{\circ}\text{C}$ e $68,69^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A temperatura média do topo de óleo atingida por esse modelo de transformador através de testes práticos é de $67,21^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, o erro obtido foi de aproximadamente 1%, configurando, assim, a simulação correta.

2.4.4. Transformador Modelo 4

Este modelo consiste em um transformador trifásico com potência de 75 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de metal amorfo do tipo envolvente, óleo vegetal isolante, enrolamentos de alumínio e sistema de refrigeração formado por aletas no formato elíptico, conforme mostra a Figura 2.24.



(a)

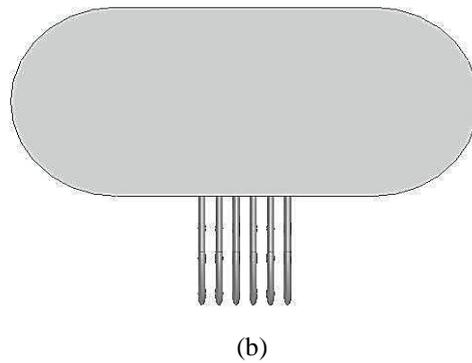


Figura 2.24 – Reprodução em 3D do transformador Modelo 4. (a) Visão frontal. (b) Visão superior

A Figura 2.25 mostra a malha aplicada neste modelo para a execução da simulação.

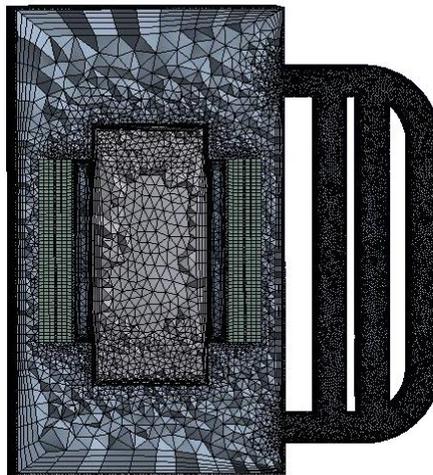


Figura 2.25 – Malha interna do transformador Modelo 4.

A Figura 2.26 apresenta a temperatura absoluta da parte externa do transformador para esta configuração do sistema de refrigeração.

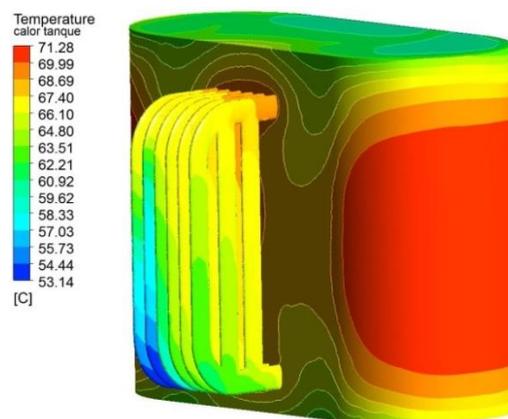


Figura 2.26 – Temperatura externa do transformador Modelo 4.

A temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo são apresentadas na Figura 2.27.

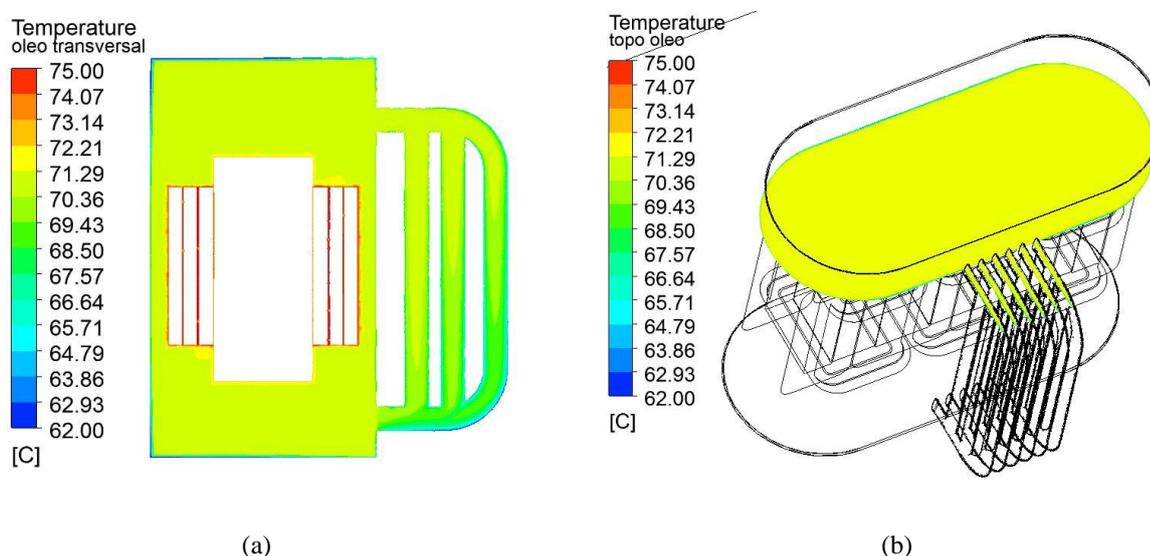


Figura 2.27 – Temperatura do óleo do Modelo 4. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo

A temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo atingida por este modelo é de $68,82^{\circ}\text{C}$ e $69,67^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A temperatura média do topo de óleo atingida por esse modelo de transformador através de testes práticos é de $64,32^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, a simulação apresentou um erro de aproximadamente 8,30% em relação aos ensaios práticos, para a temperatura média de topo de óleo. Apesar de apresentar um alto valor de erro, este se encontra dentro dos 10% admitidos para as simulações em elementos finitos.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo das características de cada um dos modelos de transformadores listados anteriormente, para a validação do método de elementos finitos em simulações térmicas no software Ansys CFX.

Tabela 2.1 – Características dos modelos de transformadores para validação do MEF.

Referência	Tipo de Núcleo	Condutividade Térm. Óleo (W/m.K)	Volume Tanque (m ³)	Temp. Topo Óleo (°C)
Modelo 1	Aço-Silício	0,140	0,1355	64,29
Modelo 2	Aço-Silício	0,140	0,2116	64,63
Modelo 3	Aço-Silício	0,140	0,2116	68,69
Modelo 4	Metal Amorfo	0,167	0,2385	69,67

2.5. Geometrias de Radiadores para Sistema de Refrigeração

O desempenho térmico de um equipamento é fundamental para sua vida útil, não sendo diferente para transformadores de distribuição. Nestes equipamentos, a manutenção da temperatura nos níveis estipulados pelas normas é fundamental para que o processo de envelhecimento, principalmente da isolação, não seja acelerado, fator que diminui a vida útil do transformador (IARONKA, 2014).

Um dos objetivos deste trabalho é analisar a eficiência de refrigeração do sistema de resfriamento de transformadores de distribuição, através de simulações utilizando o método de elementos finitos no software Ansys CFX, e dessa forma, melhorar o desempenho térmico para que estes equipamentos operem com temperaturas com níveis menores e assim permita um possível aumento de carga ou potência, e/ou a diminuição do volume dos mesmos. A melhoria nessa relação peso/potência do transformador significa um melhor aproveitamento dos materiais utilizados aumentando a potência de operação e ou diminuição dos custos de materiais de fabricação para uma mesma potência de operação.

Dessa forma, com o propósito de desenvolver um modelo de sistema de refrigeração para transformadores de distribuição com elevada eficiência térmica, são propostas diferentes geometrias de radiadores com o propósito de determinar a melhor configuração de sistema de refrigeração para que a temperatura de operação seja mantida em níveis dentro dos limites estipulados por norma. O transformador utilizado como modelo base para comparação dos resultados das análises para as demais geometrias que são propostas, consiste em um transformador trifásico com potência de 45 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de aço-silício do tipo envolvente, óleo mineral isolante e enrolamentos de alumínio, o qual é projetado e fabricado pela Romagnole Produtos Elétricos S.A.

A partir destas premissas, são descritos o modelo base e as demais configurações de sistema de refrigeração com suas respectivas características, conforme apresentado a seguir.

2.5.1. Configuração 1: Transformador Base

Para a análise do comportamento térmico, primeiramente é realizada a análise da geometria do sistema de refrigeração do transformador de 45 kVA, modelo adotado como base para as simulações e comparações de desempenho térmico. Esse transformador apresenta um sistema de refrigeração composto por aletas no formato elíptico, com entrada no tanque

acima da parte ativa e retorno abaixo da mesma. A Figura 2.12 apresenta a geometria, em 3D, do tanque e do sistema de refrigeração desta configuração.

O sistema de refrigeração é composto por 23 aletas no formato elíptico, com espessura de 1,5 mm, e área de dissipação de cada aleta igual a 0,07409 m², totalizando uma área de dissipação térmica de 1,7042 m². O formato das aletas com suas respectivas dimensões é ilustrado na Figura 2.28.

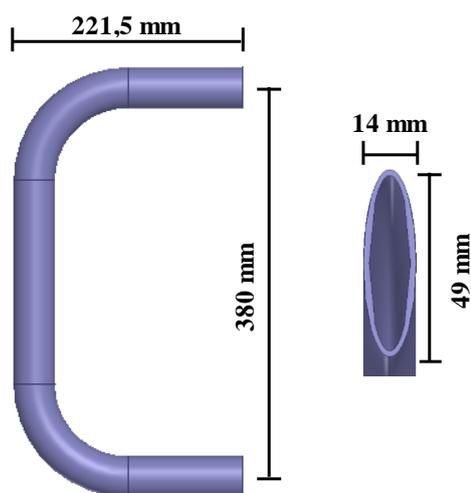
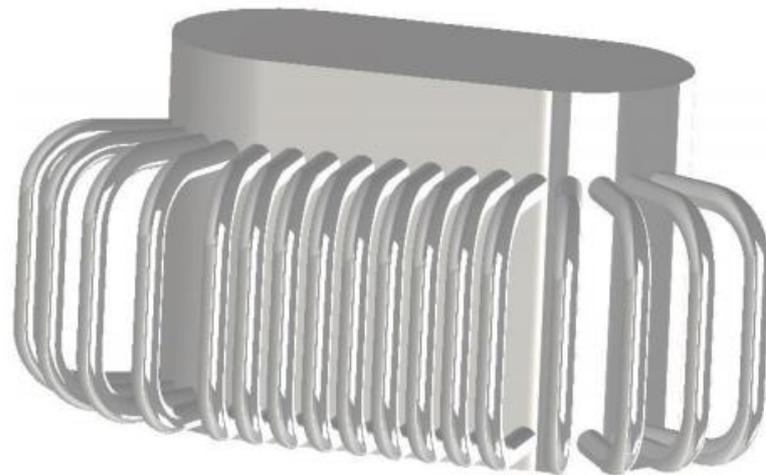


Figura 2.28 – Detalhe da aleta do sistema de refrigeração da Configuração 1.

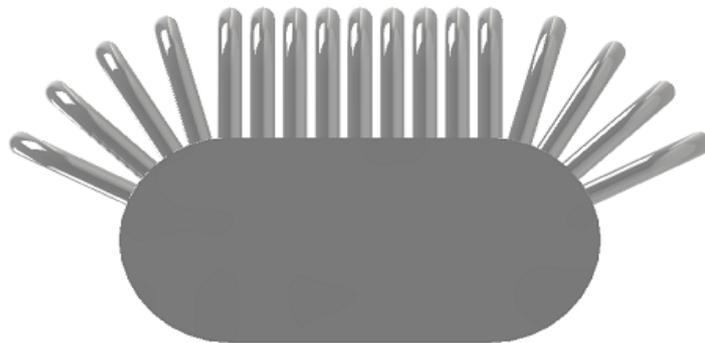
A partir dos resultados dessa análise inicial, são fundamentadas as demais variações de geometria, comparando os resultados obtidos com os resultados do transformador base, a fim de analisar a eficiência do sistema de refrigeração diante estas variações.

2.5.2. Configuração 2: Aleta Tubular

Esta configuração apresenta como principal variação, em relação à Configuração 1, o formato da aleta utilizada. Nessa configuração é utilizado aletas no formato tubular ao invés de aletas no formato elíptico. A aleta tubular apresenta uma seção maior e conseqüentemente uma maior capacidade de circulação de óleo. A geometria, em 3D, do tanque e do sistema de refrigeração deste modelo é mostrada na Figura 2.29.



(a)



(b)

Figura 2.29 – Visão geral da geometria da Configuração 2. (a) Visão frontal. (b) Visão superior.

Devido as aletas possuírem uma maior seção, o número total de aletas empregadas nessa configuração é de apenas 17 aletas, ou seja, há uma redução de 6 aletas em comparação com a Configuração 1. As aletas deste modelo possuem uma espessura de 3 mm, com uma área de dissipação térmica de $0,08841 \text{ m}^2$, para cada aleta, totalizando uma área de dissipação, para todo o sistema de refrigeração, igual a $1,5030 \text{ m}^2$. Analisando estes valores de áreas, percebe-se que houve uma redução de aproximadamente 11,80% na área total de dissipação térmica, em comparação com a configuração do transformador base. Apesar de se ter um aumento na espessura das aletas em relação à Configuração 1, a influência dessa variação não é significativa, uma vez que é muito pequena, podendo ser considerada irrelevante na prática. A Figura 2.30 ilustra o formato das aletas com suas respectivas dimensões.

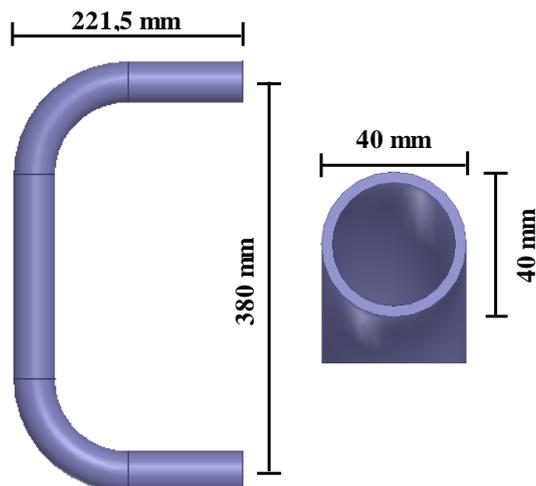
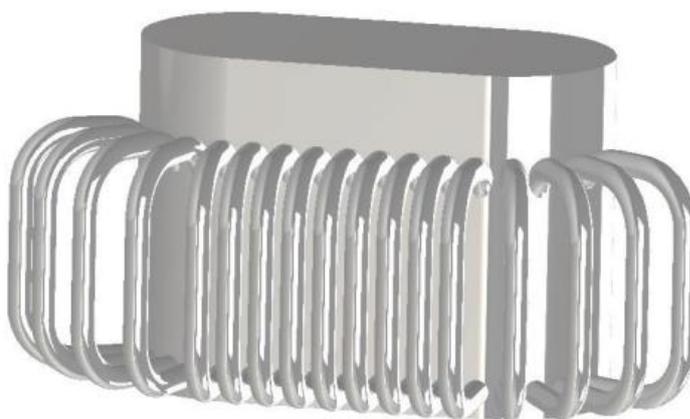


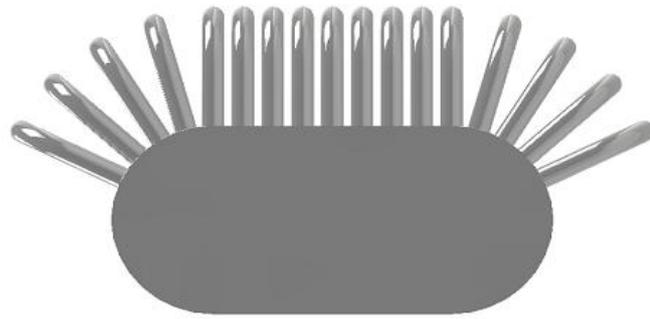
Figura 2.30 – Detalhe da aleta do sistema de refrigeração da Configuração 2.

2.5.3. Configuração 3: Aleta Tubular com Entrada em Curva

A principal variação desta configuração com relação à configuração do modelo base é o formato da aleta na entrada do tanque. A Configuração 3 é concebida observando o movimento natural do fluido isolante no interior do transformador. Dessa forma, para que o óleo aquecido não encontre dificuldades para adentrar na aleta para ser resfriado, é proposta a configuração exposta na Figura 2.31, que consiste de aletas tubulares com entrada em curva.



(a)



(b)

Figura 2.31 – Visão geral da geometria da Configuração 3. (a) Visão frontal. (b) Visão superior.

Conforme se pode observar na Figura 2.31, o número total de aletas utilizadas nesta configuração é de 17 aletas. A área de cada aleta é igual a $0,08914 \text{ m}^2$, totalizando uma área de dissipação de $1,5154 \text{ m}^2$. Dessa forma, tem-se uma redução de aproximadamente 11,07% na área total de dissipação com relação à Configuração 1. O formato da aleta com suas respectivas dimensões é apresentado na Figura 2.32.

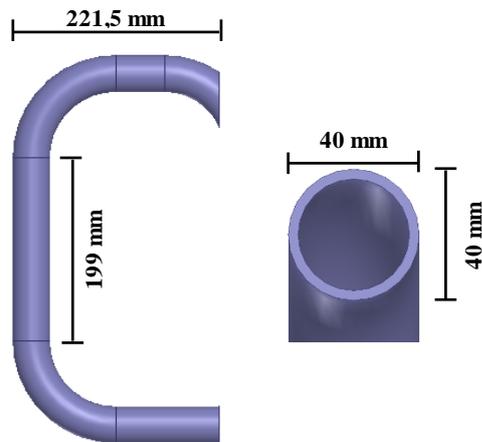
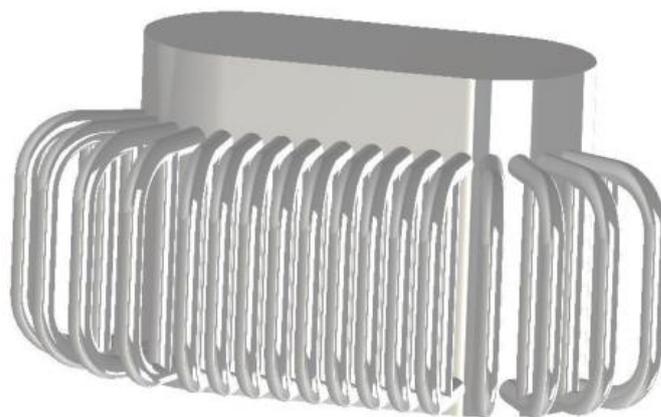


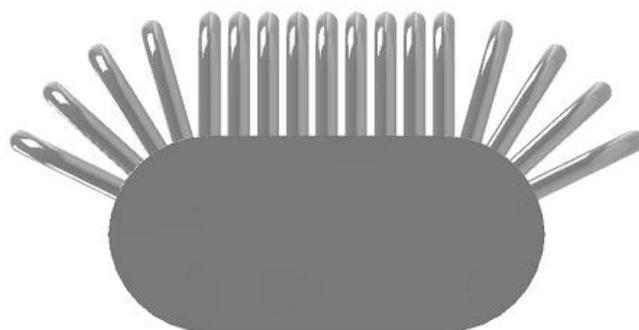
Figura 2.32 – Detalhe da aleta do sistema de refrigeração da Configuração 3.

2.5.4. Configuração 4: Aleta Tubular com Ramo Extra

Esta configuração proposta é uma variação da Configuração 2, onde se mantém o formato tubular das aletas e é acrescentado um ramo perpendicular no centro de cada uma, a fim de aumentar a área de contato do transformador com o ambiente, ou seja, aumentar a área de dissipação térmica. A visão geral desta configuração proposta é apresentada na Figura 2.33.



(a)



(b)

Figura 2.33 – Visão geral da geometria da Configuração 4. (a) Visão frontal. (b) Visão superior.

O número total de aletas utilizadas nesta configuração, igualmente a Configuração 2, é de 17 aletas, com uma área total de dissipação térmica igual a $2,2426 \text{ m}^2$, ou seja, um aumento de área de dissipação de aproximadamente 31,6% em comparação com a configuração do transformador base. A Figura 2.34 ilustra o formato das aletas e suas respectivas dimensões.

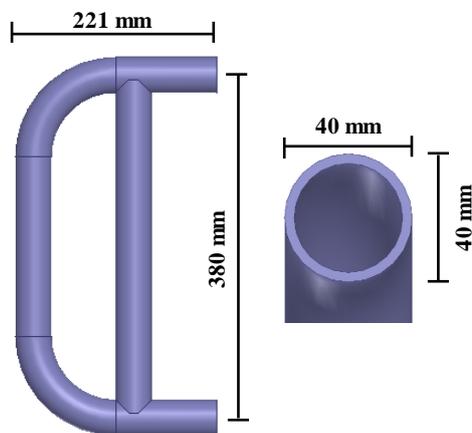
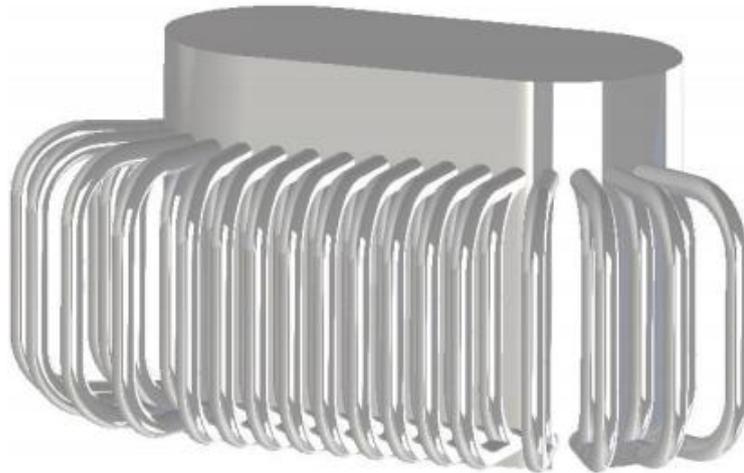


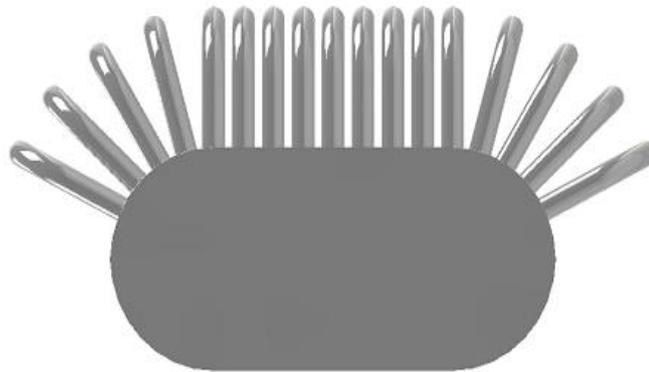
Figura 2.34 – Detalhe da aleta do sistema de refrigeração da Configuração 4.

2.5.5. Configuração 5: Aleta Tubular com Ramo Extra com Entrada em Curva

A Configuração 5 é concebida a fim de facilitar o movimento natural do fluido isolante no interior do transformador. Esta configuração é uma variação da Configuração 4, onde, tanto a aleta externa quanto a aleta central extra, são conectadas ao tanque do transformador em uma forma curva, conforme é apresentado na Figura 2.35.



(a)



(b)

Figura 2.35 – Visão geral da geometria da Configuração 5. (a) Visão frontal. (b) Visão superior.

A área total de dissipação térmica desta configuração é de aproximadamente 2,3040 m², com um total de 17 aletas no formato tubular, sendo que cada aleta possui uma área de aproximadamente 0,1355 m². Um melhor detalhamento do modelo da aleta utilizada é mostrado na Figura 2.36.

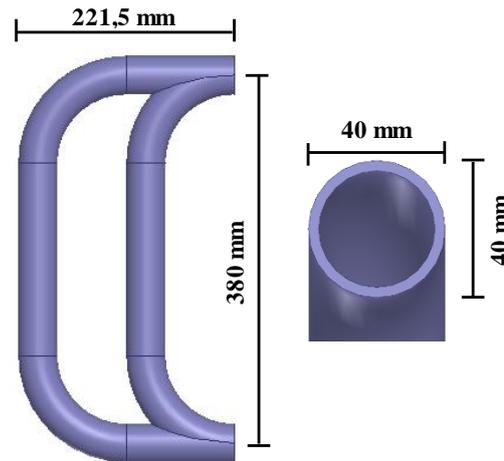
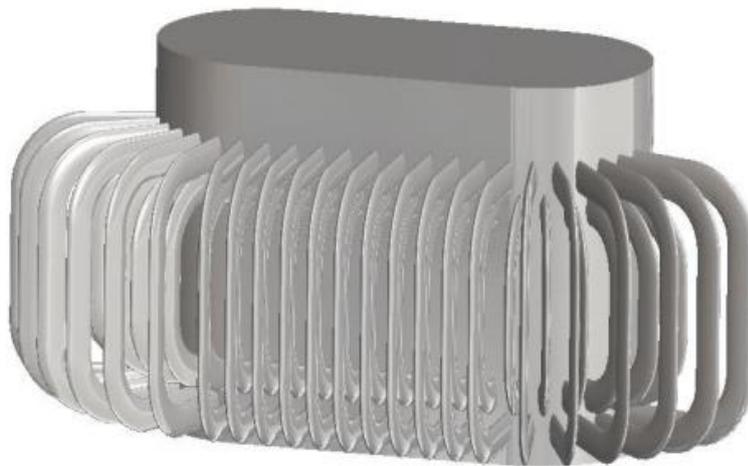


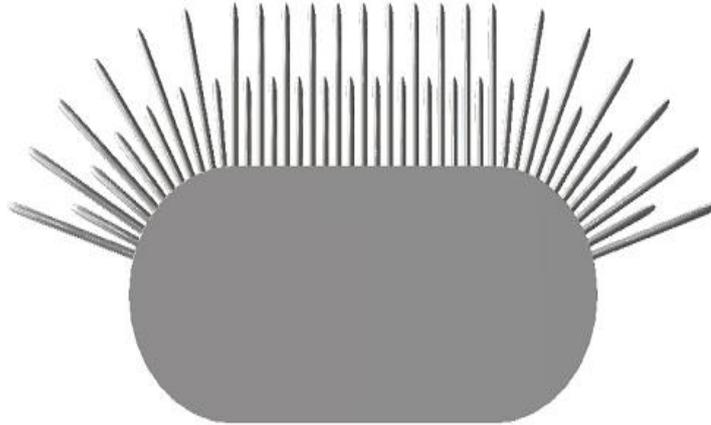
Figura 2.36 – Detalhe da aleta do sistema de refrigeração da Configuração 5.

2.5.6. Configuração 6: Aleta Elíptica Extra

A aleta utilizada como sistema de refrigeração em transformadores é manufaturada de modo contínuo e em grande comprimento, sendo cortada e moldada conforme cada necessidade do sistema de refrigeração. Dessa forma, para otimizar o sistema de refrigeração sem aumentar a complexidade de construção do transformador, é proposto a Configuração 6. Esta configuração é uma variação da configuração do transformador base, onde se tem um aumento no número de aletas no formato elíptico, em tamanho menor, localizadas entre cada aleta já existente, conforme é ilustrado na Figura 2.37.



(a)



(b)

Figura 2.37 – Visão geral da geometria da Configuração 6. (a) Visão frontal. (b) Visão superior.

Com um número total de 45 aletas, esta configuração de sistema de refrigeração possui uma área total de dissipação térmica igual a $3,0005 \text{ m}^2$, ou seja, um acréscimo de 76% na área total em comparação com a configuração do transformador base. O detalhe da aleta com suas dimensões é mostrado na Figura 2.38.

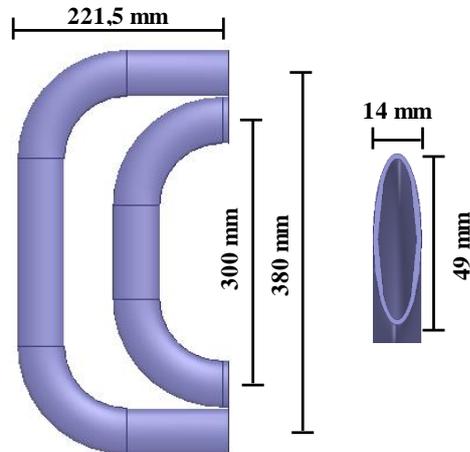


Figura 2.38 – Detalhe da aleta do sistema de refrigeração da Configuração 6.

A Tabela 2.2 apresenta uma síntese das características das configurações de sistema de refrigeração propostas.

Tabela 2.2 – Características das configurações propostas para sistema de refrigeração.

Referência	Tipo de Aleta	Nº de Aletas	Área Dissipação(m ²)	Peso Total Aletas (Kg)
Configuração 1	Elíptica	23	1,7042	17,34
Configuração 2	Tubular	17	1,5030	32,26
Configuração 3	Tubular	17	1,5154	32,54
Configuração 4	Tubular	17	2,2426	47,57
Configuração 5	Tubular	17	2,3040	48,41
Configuração 6	Elíptica	45	3,0005	26,80

2.5.7. Variação da Distância entre Aletas e Tanque do Transformador

Além das configurações de sistema de refrigeração propostas e apresentadas anteriormente, a fim de se conhecer a distância mais eficiente das aletas em relação ao tanque, e com isso melhorar a dissipação do calor gerado pela parte ativa do transformador, é realizada uma variação das distâncias entre as aletas e o tanque. Para estas simulações, a configuração do sistema de refrigeração utilizada é a do transformador base, formado por aletas no formato elíptico. Esta variação pode ser visualizada na Figura 2.39. Cabe ressaltar que para a realização destas variações, são mantidos o mesmo tipo de aleta e a área total de dissipação do sistema de refrigeração. Porém, para se manter uma mesma área total com aletas variando em tamanho, é necessário variar o número delas ao longo das variações.

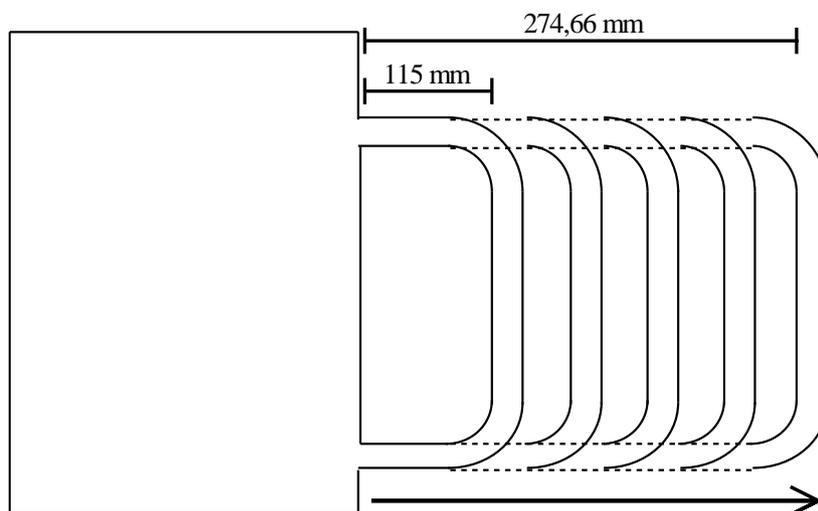


Figura 2.39 – Variações da distância do tanque.

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese das características das variações de distância entre as aletas e o tanque.

Tabela 2.3 – Características das variações de distância em relação ao tanque.

Distância do tanque (mm)	Tipo de Aleta	Número de Aletas	Área Dissipação (m ²)
115	Elíptica	26	1,328
168,25	Elíptica	21	1,311
221,5	Elíptica	18	1,333
256,94	Elíptica	16	1,301
274,66	Elíptica	15	1,281

2.5.8. Variação da Distância entre os Pontos de Entrada e Saída das Aletas do Tanque

De maneira análoga e complementar ao caso anterior, é feita uma variação da distância entre os pontos de entrada e saída das aletas do tanque, conforme mostra a Figura 2.40. A partir de onde se encontra o ponto inferior, diminui-se a distância até o ponto superior, uma vez que este está fixado na altura do nível do óleo. Assim como para o caso anterior, é importante ressaltar que para a realização destas variações, são mantidos o mesmo tipo de aleta e a área total de dissipação do sistema de refrigeração. Porém, para se manter uma mesma área total com aletas variando em tamanho, é necessário alterar o número delas ao longo das variações.

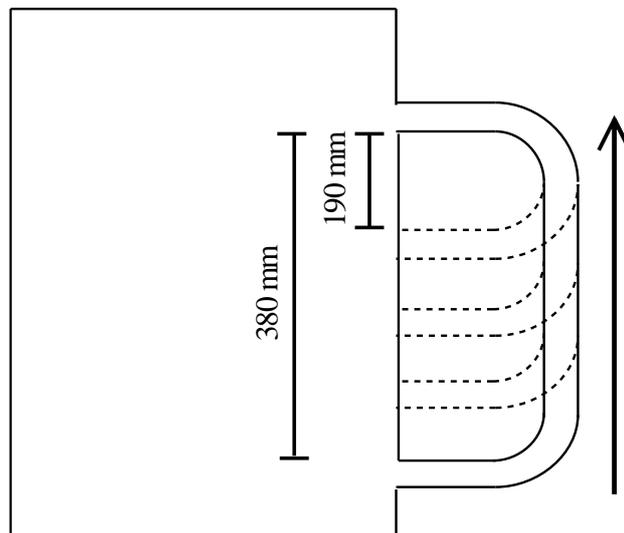


Figura 2.40 – Variações do ponto de entrada/saída.

A Tabela 2.4 apresenta uma síntese das características das variações de distância entre os pontos de entrada e saída das aletas do tanque.

Tabela 2.4 – Características das variações de distância entre entra/saída.

Distância Entra/Saída (mm)	Tipo de Aleta	Número de Aletas	Área Dissipação (m ²)
380	Elíptica	18	1,333
342	Elíptica	19	1,330
304	Elíptica	20	1,319
266	Elíptica	21	1,300
228	Elíptica	23	1,331
190	Elíptica	24	1,291

2.6. Conclusão

Neste capítulo, faz-se a contextualização do Método de Elementos Finitos, utilizado nas simulações térmicas de configurações de sistema de refrigeração para transformadores de distribuição. Além disso, foram descritos e simulados quatro modelos de transformadores de distribuição, projetados e fabricados pela Romagnole Produtos Elétricos S.A, para a validação do método de elementos finitos em simulações térmicas no software Ansys CFX.

Geometrias de radiadores para emprego em sistemas de refrigeração de transformadores, com o propósito de analisar a eficiência de refrigeração destes sistemas, foram propostas neste capítulo.

Adicionalmente, com o propósito de se conhecer a distância mais eficiente das aletas em relação ao tanque, e com isso melhorar a dissipação do calor gerado pela parte ativa do transformador, foi proposta a variação das distâncias entre as aletas e o tanque do transformador, bem como a variação da distância entre os pontos de entrada e saída das aletas do tanque.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES TÉRMICAS PARA AS GEOMETRIAS DE RADIADORES

3.1. Introdução

Simulações no software ANSYS CFX, utilizando o Método de Elementos Finitos, são realizadas, neste capítulo, para todas as configurações e variações de distâncias apresentadas capítulo 2. Para tanto, são utilizadas as mesmas condições de contorno e características dos materiais para todas as simulações das configurações do sistema de refrigeração. Os resultados térmicos das simulações são apresentados a seguir.

3.2. Configuração 1: Transformador Base

Este transformador possui o sistema de refrigeração composto por aletas no formato elíptico, igualmente espaçadas no tanque. A temperatura absoluta da parte externa do transformador para esta configuração do sistema de refrigeração é apresentada na Figura 3.1.

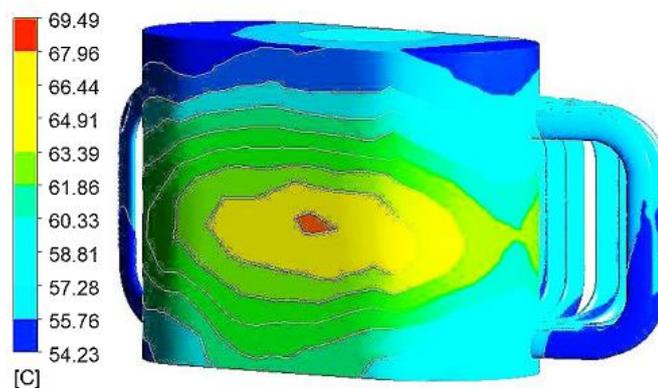


Figura 3.1 – Temperatura externa do transformador base.

Uma das regiões de maior interesse de monitoramento da temperatura no transformador é o óleo, pois é o principal fator determinante pelo envelhecimento do material

isolante, o qual é responsável pela vida útil do equipamento. No óleo, a região de maior temperatura e conseqüentemente maior preocupação é a região do topo de óleo. Logo, uma das variáveis controladas pela (ABNT NBR 5440, 2014) é a temperatura de topo de óleo. Na Figura 3.2 são mostradas as temperaturas média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo.

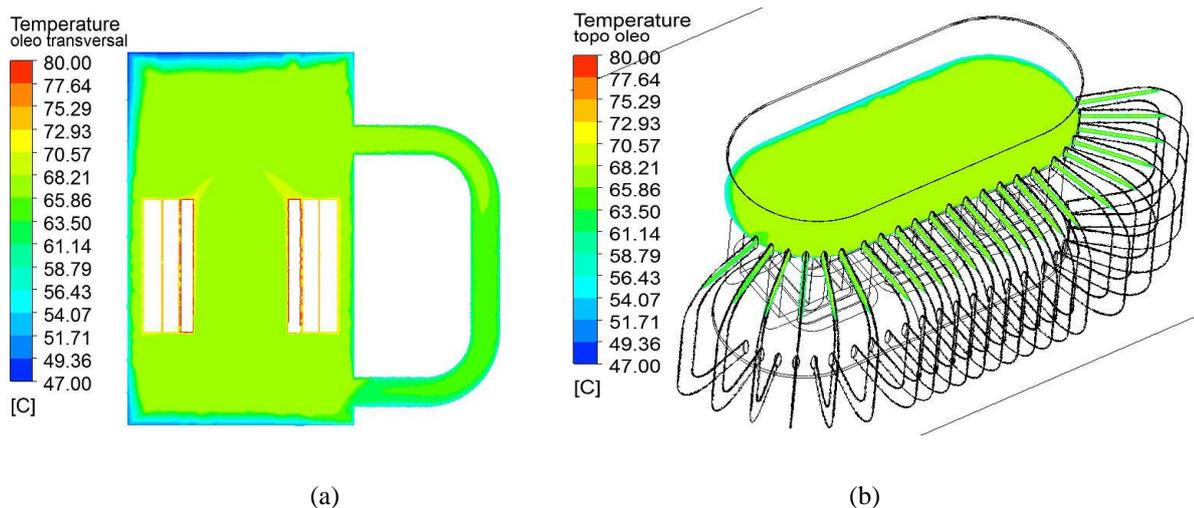


Figura 3.2 – Temperatura do óleo da Configuração 1. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

Essa configuração atingiu uma temperatura média geral do óleo e uma temperatura média do topo de óleo igual a 63,52° C e 64,29° C, respectivamente.

3.3. Configuração 2: Aleta Tubular

A principal variação da Configuração 2 em relação à configuração do transformador base, é o formato da aleta. Nesta configuração é utilizado aletas no formato tubular, ao invés de aletas no formato elíptico. A Figura 3.3 apresenta a temperatura externa do tanque do transformador em análise.

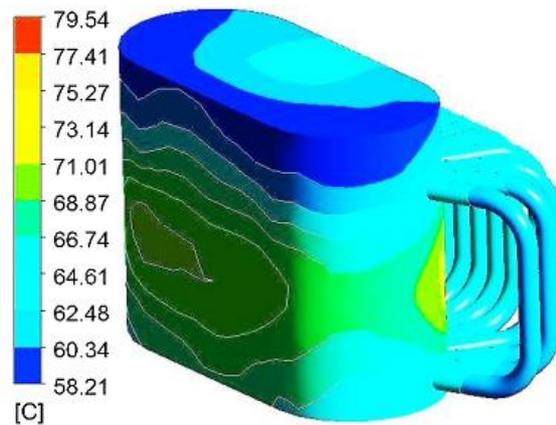


Figura 3.3 – Temperatura externa do transformador - Configuração 2.

A temperatura média geral do óleo atingida por esta configuração é de aproximadamente $73,38^{\circ}\text{C}$. Já a temperatura média do topo de óleo é de $73,59^{\circ}\text{C}$. Estas duas variáveis são apresentadas na Figura 3.4.

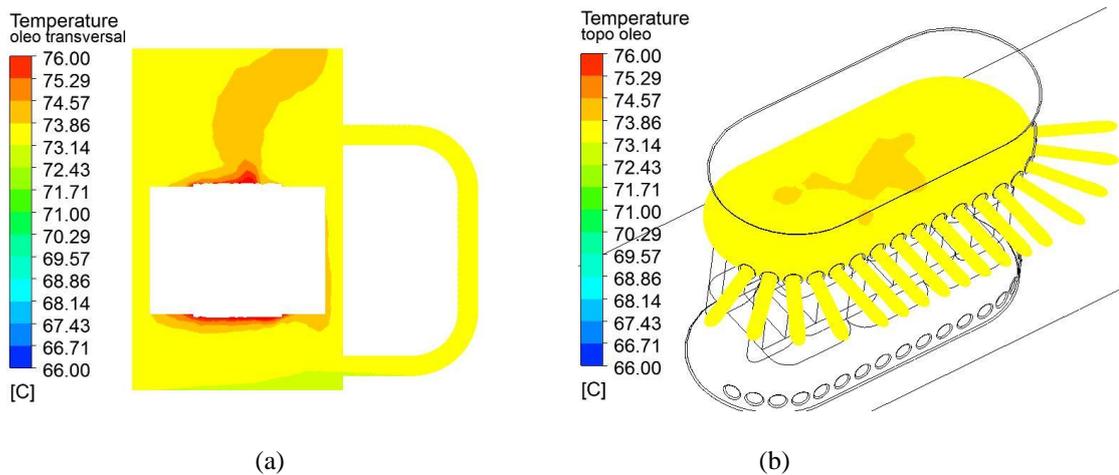


Figura 3.4 – Temperatura do óleo da Configuração 2. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

3.4. Configuração 3: Aleta Tubular com Entrada em Curva

Esta configuração foi desenvolvida analisando o movimento natural do fluido isolante no interior do transformador. Com a finalidade de facilitar a entrada do óleo na aleta, esta foi projetada para sua conexão ao tanque ser em ângulo. A temperatura geral externa do tanque é apresentada na Figura 3.5.

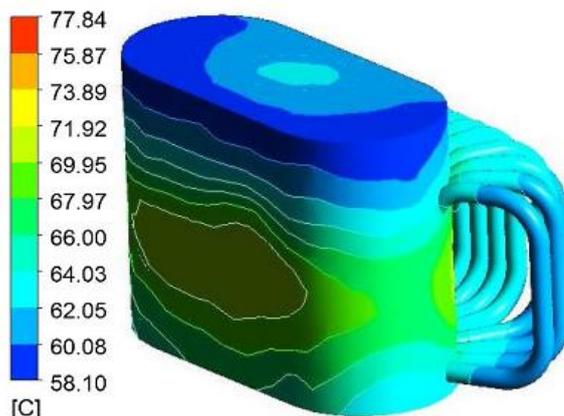


Figura 3.5 – Temperatura externa do transformador - Configuração 3.

A temperatura média do topo de óleo, bem como a temperatura média geral da configuração em análise é mostrada na Figura 3.6.

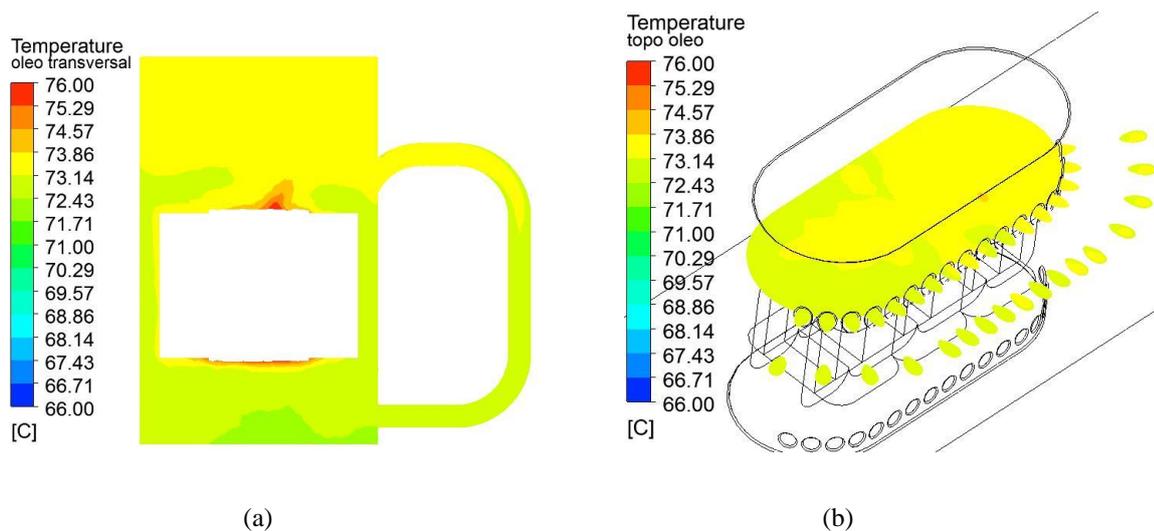


Figura 3.6 – Temperatura do óleo da Configuração 3. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

Dessa forma, esta configuração atingiu uma temperatura média geral de $72,8^{\circ}\text{C}$, e uma temperatura média do topo de óleo de aproximadamente $73,07^{\circ}\text{C}$.

3.5. Configuração 4: Aleta Tubular com Ramo Extra

A configuração formada por aletas no formato tubular e ramo extra foi desenvolvida com o objetivo inicial de aumentar a área de dissipação térmica e com isso melhorar a dissipação de calor. A Figura 3.7 mostra a temperatura externa do tanque do transformador para esta configuração.

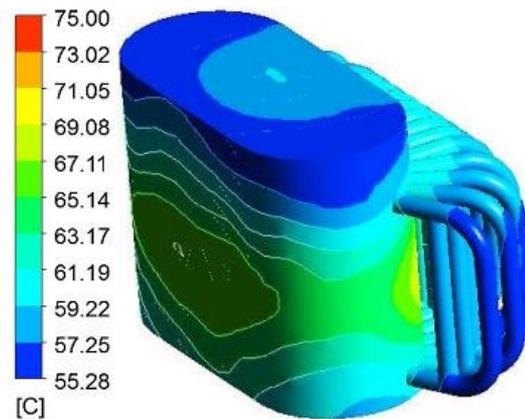


Figura 3.7 – Temperatura externa do transformador - Configuração 4.

A temperatura média geral e a temperatura média do topo de óleo com esta configuração são de aproximadamente $66,5^{\circ}\text{C}$ e $66,76^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A Figura 3.8 apresenta estas temperaturas atingidas pelo óleo.

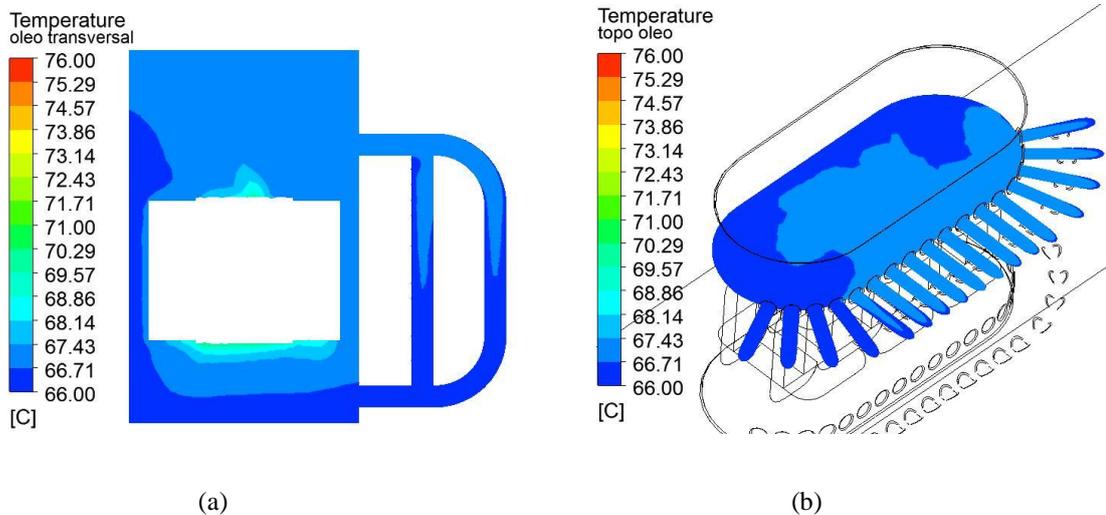


Figura 3.8 – Temperatura do óleo da Configuração 4. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

3.6. Configuração 5: Aleta Tubular com Ramo Extra com Entrada em Curva

A Configuração 5 é uma combinação entre as Configurações 3 e 4, com o objetivo inicial de aumentar a área de dissipação térmica e facilitar o movimento do óleo isolante. A temperatura geral externa do tanque é apresentada na Figura 3.9.

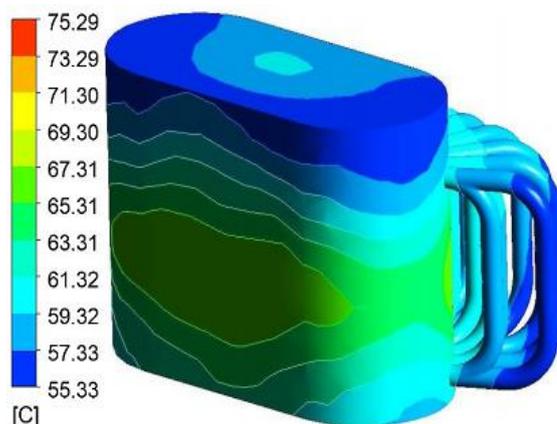


Figura 3.9 – Temperatura externa do transformador - Configuração 5.

A temperatura média geral, assim como a temperatura média do topo de óleo é mostrada na Figura 3.10.

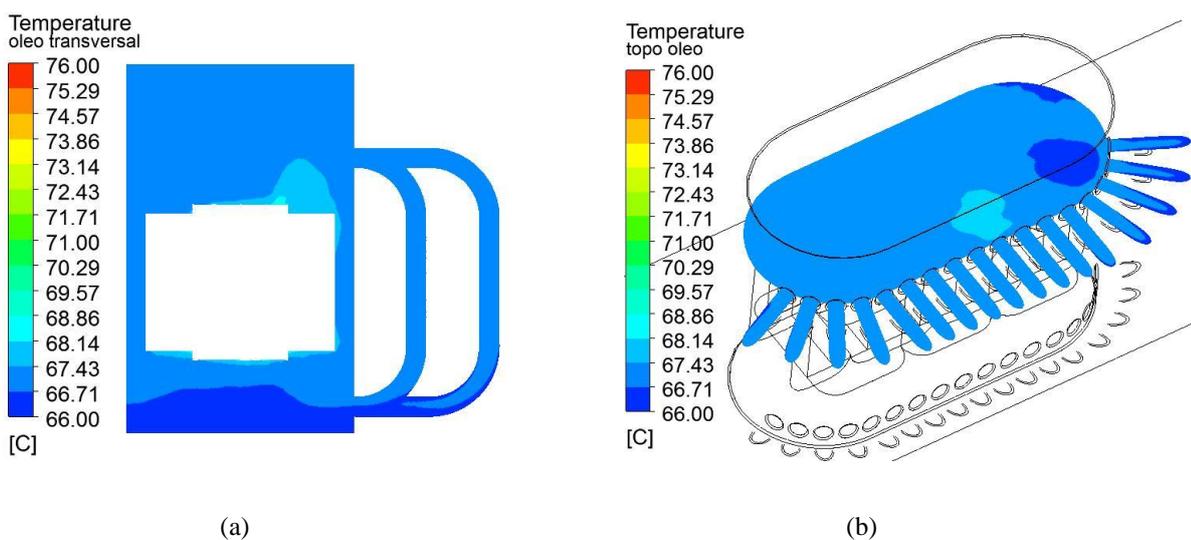


Figura 3.10 – Temperatura do óleo da Configuração 5. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

Esta configuração atingiu uma temperatura média geral do óleo de aproximadamente $66,71^{\circ}\text{C}$, e uma temperatura média do topo de óleo de aproximadamente $66,99^{\circ}\text{C}$.

3.7. Configuração 6: Aleta Elíptica Extra

Esta configuração de sistema de refrigeração é desenvolvida com a finalidade de otimizar o espaço disponível no tanque do transformador para alocação das aletas. A temperatura geral do tanque do transformador é mostrada na Figura 3.11.

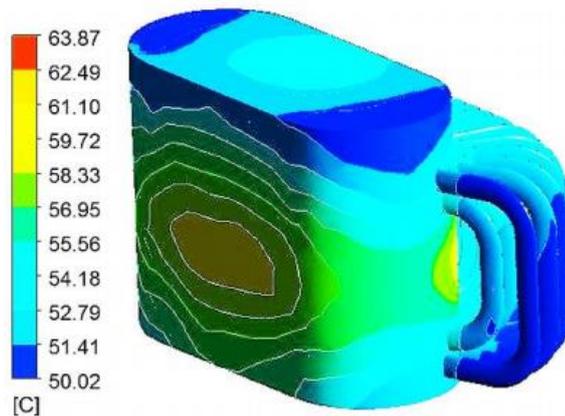


Figura 3.11 – Temperatura externa do transformador - Configuração 6.

A Figura 3.12 apresenta a temperatura média geral do óleo e a temperatura média do topo de óleo. Os valores dessas temperaturas atingidas por essa configuração são de $57,4^{\circ}\text{C}$ para a temperatura média do óleo e $57,72^{\circ}\text{C}$ para a temperatura média do topo de óleo.

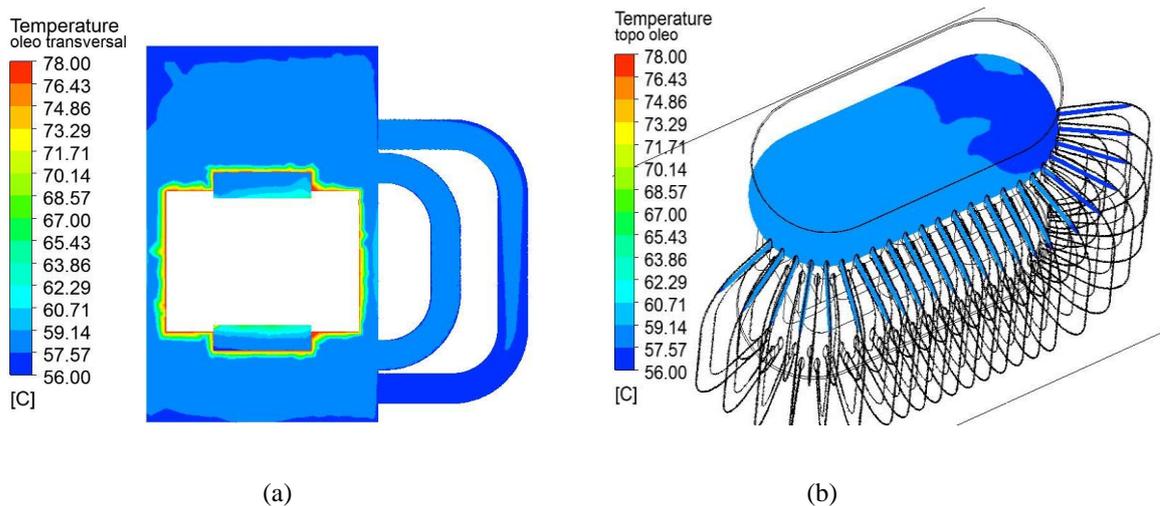


Figura 3.12 – Temperatura do óleo da Configuração 6. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

Uma síntese dos resultados obtidos a partir das simulações térmicas das configurações de sistema de refrigeração é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados térmicos das configurações propostas para sistema de refrigeração.

Referência	Tipo de Aleta	Nº de Aletas	Área Dissipação (m ²)	Temp. Méd. Topo Óleo (°C)	Comp. Total das Aletas (m)	Peso Total das Aletas (Kg)
Configuração 1	Elíptica	23	1,7042	64,29	15,94	17,34
Configuração 2	Tubular	17	1,5030	73,59	11,96	32,26
Configuração 3	Tubular	17	1,5154	73,07	12,06	32,54
Configuração 4	Tubular	17	2,2426	66,76	17,85	47,57
Configuração 5	Tubular	17	2,3040	66,99	18,33	48,41
Configuração 6	Elíptica	45	3,0005	57,72	24,61	26,80

Analisando os dados presentes na Tabela 3.1, nota-se que o desempenho térmico, das geometrias de radiadores com aletas no formato elíptico, é superior que as geometrias com aletas no formato tubular. Isso se deve ao fato da possibilidade de instalação de um número maior de aletas no formato elíptico do que no formato tubular. Outra vantagem da utilização da aleta elíptica é seu coeficiente de penetração térmica, ou seja, a espessura da camada de óleo que realmente transfere calor para a superfície da aleta. Conforme se observa na Figura 3.13, a aleta no formato tubular possui uma maior quantidade de óleo que não efetua troca de calor com o meio externo, retornando, dessa forma, aquecido para o interior do tanque do transformador. Além disso, observa-se o comportamento inversamente proporcional da temperatura do topo de óleo diante a variação do comprimento total das aletas, e por consequência o peso total das mesmas, ou seja, o aumento do comprimento das aletas acarreta a diminuição da temperatura do topo de óleo. A partir disso, é possível estudar novas combinações entre potência e material utilizado para reduzir custos e aumentar a vida útil do equipamento.

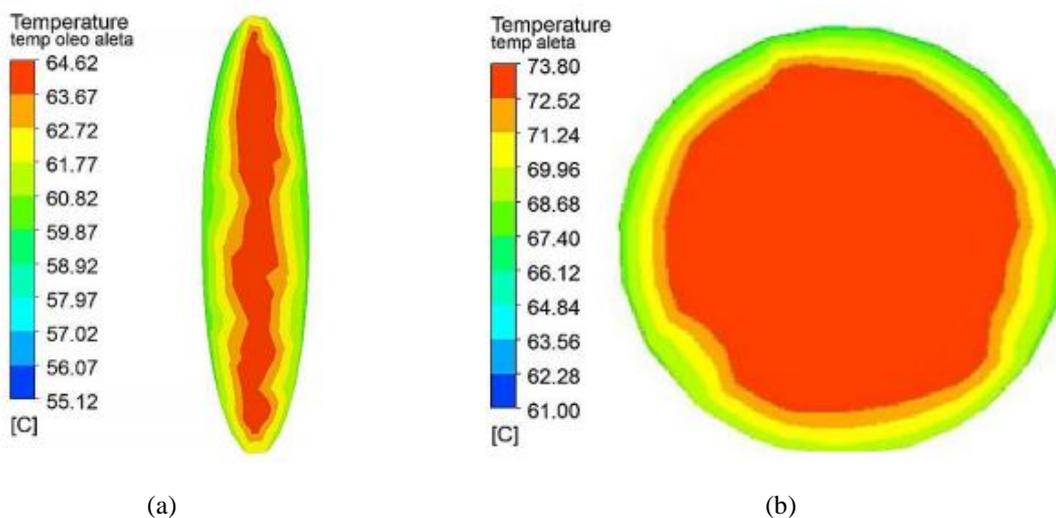


Figura 3.13 – Coeficiente de penetração térmica. (a) Aleta elíptica. (b) Aleta tubular.

3.8. Variação da Distância entre Aletas e Tanque do Transformador

A variação da distância entre as aletas e o tanque do transformador tem como objetivo conhecer a distância mais eficiente das aletas em relação ao tanque, e com isso melhorar a dissipação do calor gerado pela sua parte ativa. A Figura 3.14 apresenta a temperatura média geral e a temperatura média do topo de óleo para o ponto inicial destas variações, ou seja, uma distância entre aletas e tanque de 115 mm.

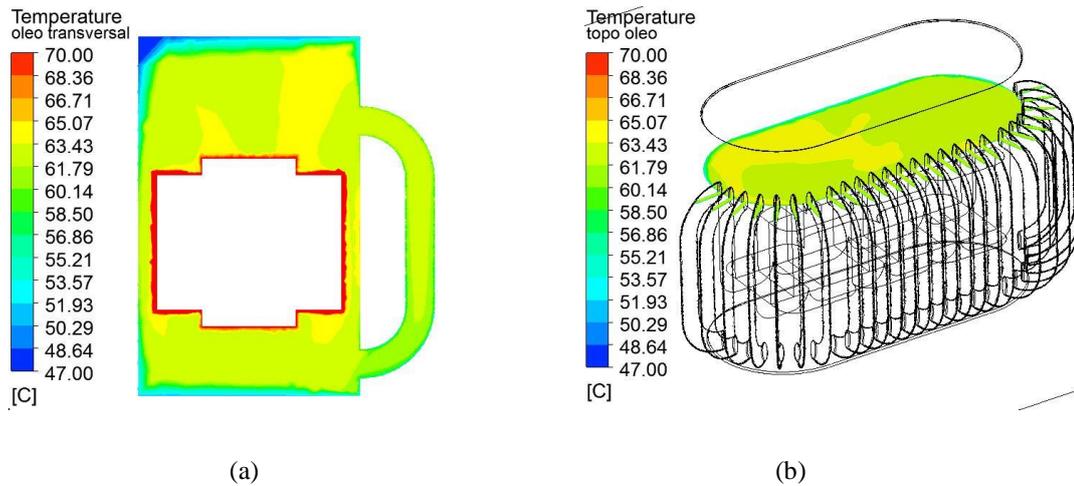


Figura 3.14 – Temperatura do óleo para distância de 115 mm. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

Da mesma forma, a Figura 3.15 apresenta a temperatura média geral e a temperatura média do topo de óleo para o ponto final destas variações, ou seja, uma distância entre aletas e tanque de 274,66 mm.

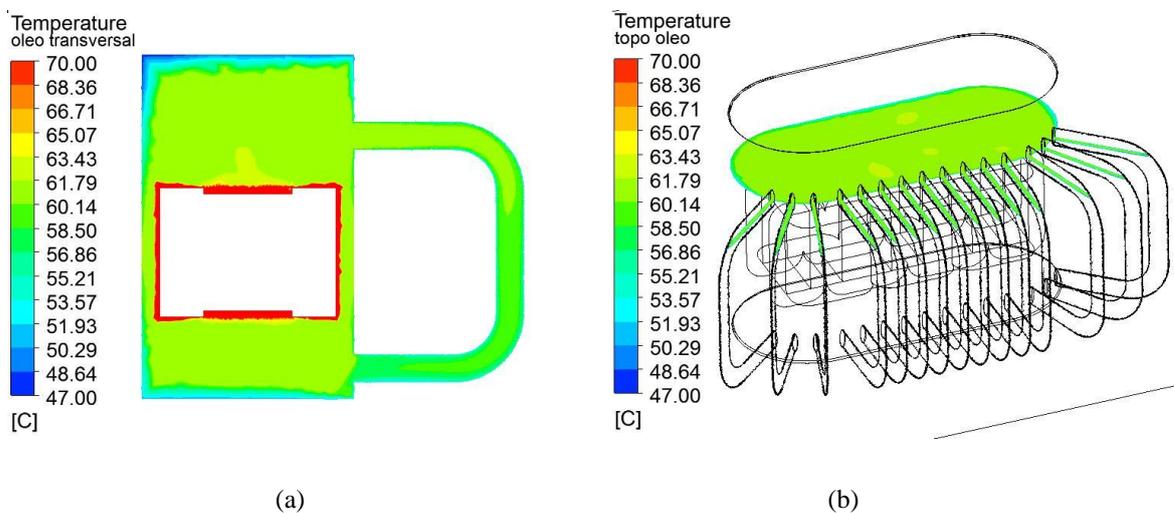


Figura 3.15 – Temperatura do óleo para distância de 274,66 mm. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

A Tabela 3.2 apresenta uma síntese dos resultados obtidos a partir das simulações térmicas das variações de distância entre as aletas e o tanque.

Tabela 3.2 – Resultados térmicos das variações de distância entre as aletas e o tanque.

Distância do tanque (mm)	Tipo de Aleta	Nº de Aletas	Temp. Méd. Topo Óleo (°C)	Área Dissipação (m ²)
115	Elíptica	26	63,12	1,3285
168,25	Elíptica	21	63,05	1,3117
221,5	Elíptica	18	61,58	1,3335
256,94	Elíptica	16	61,34	1,3014
274,66	Elíptica	15	61,12	1,2813

Observa-se, a partir dos valores da Tabela 3.2, que ao aumentar a distância entre as aletas e o tanque, a temperatura média do topo de óleo apresenta um comportamento inversamente proporcional a esta variação, ou seja, há uma redução na temperatura do óleo. Também é possível observar uma redução de 2° C na temperatura do topo de óleo, ou seja, uma redução de aproximadamente 3,17%, entre a menor e a maior distância das aletas em relação ao tanque. Dessa forma, esta variação de temperatura é muito pequena, podendo ser considerada irrelevante na prática.

3.9. Variação da Distância entre os Pontos de Entrada e Saída das Aletas do Tanque

Esta variação busca conhecer as distâncias mais eficientes entre os pontos de entrada e saída do óleo nas aletas do sistema de refrigeração. A Figura 3.16 apresenta a temperatura média geral e a temperatura média do topo de óleo para o ponto inicial destas variações, ou seja, uma distância entre o ponto de entrada e o ponto de saída das aletas do tanque de 380 mm.

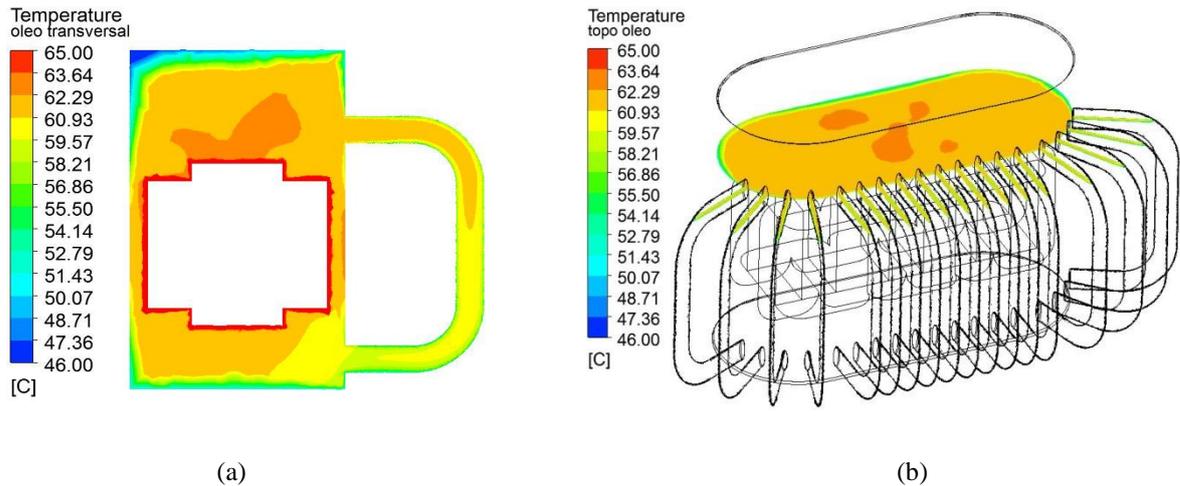


Figura 3.16 – Temperatura do óleo para distância de 380 mm. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo.

Da mesma forma, a Figura 3.17 apresenta a temperatura média geral e a temperatura média do topo de óleo para o ponto final destas variações, ou seja, uma distância entre o ponto de entrada e o ponto de saída das aletas do tanque de 190 mm.

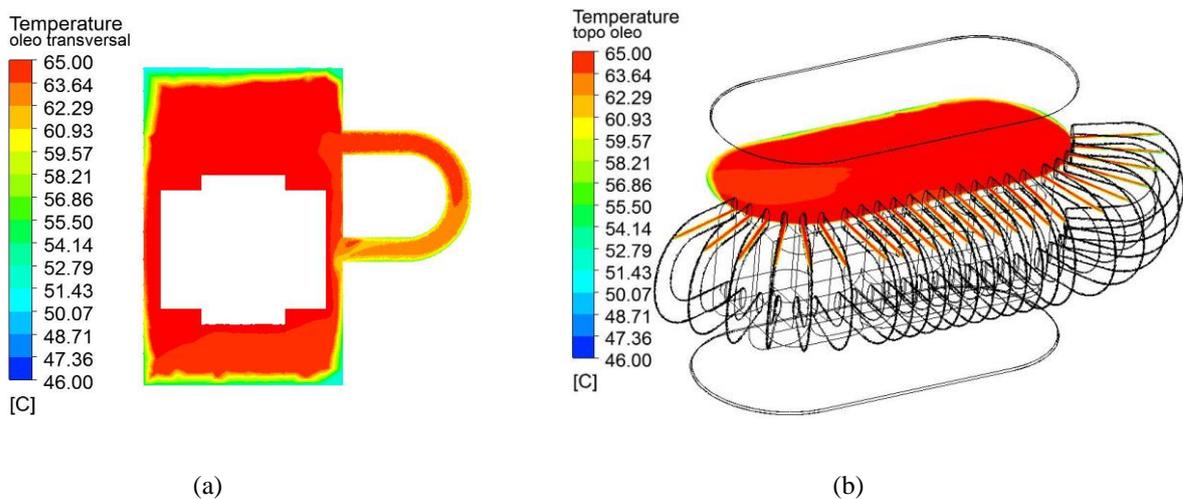


Figura 3.17 – Temperatura do óleo para distância de 190 mm. (a) Temperatura média geral. (b) Temperatura do topo de óleo

A Tabela 3.3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos a partir das simulações térmicas das variações de distância entre o ponto de entrada e o ponto de saída das aletas no tanque.

Tabela 3.3 – Resultados térmicos das variações de distância entre entrada/saída das aletas no tanque

Distância Entrada/Saída (mm)	Tipo de Aleta	Nº de Aletas	Temp. Méd. Topo Óleo (°C)	Área Dissipação (m²)
380	Elíptica	18	61,58	1,3335
342	Elíptica	19	62,90	1,3306
304	Elíptica	20	63,73	1,3195
266	Elíptica	21	64,25	1,3004
228	Elíptica	23	64,61	1,3311
190	Elíptica	24	64,85	1,2917

A partir dos valores da Tabela 3.3, nota-se que o comportamento da temperatura média do topo de óleo é inversamente proporcional à variação da distância entre o ponto de entrada e o ponto de saída das aletas do tanque, ou seja, ao diminuir a distância entre os pontos de entrada e saída, a temperatura média do topo de óleo apresenta um comportamento crescente. É possível também se observar uma redução de aproximadamente 3,27° C, ou seja, uma redução de cerca de 5% na temperatura do topo de óleo, entre a menor e a maior distância entre o ponto de entrada e o ponto de saída das aletas no tanque.

Analisando os dados presentes na Tabela 3.2 e Tabela 3.3, observa-se que a variação da distância entre os pontos de entrada e saída das aletas do tanque, apresenta um efeito mais acentuado na temperatura média de topo de óleo, em comparação à variação da distância entre as aletas e o tanque do transformador.

3.10. Conclusão

Neste capítulo, realizaram-se simulações térmicas, em elementos finitos, das geometrias de radiadores para sistemas de refrigeração de transformadores, apresentadas no capítulo 2, com o propósito de analisar a eficiência de refrigeração destes sistemas.

Em um primeiro momento, foram realizadas simulações de diferentes geometrias de radiadores com o propósito de determinar a melhor configuração de sistema de refrigeração para que a temperatura de operação seja mantida em níveis dentro dos limites estipulados por norma. Após, apresentou-se uma análise, por meio de simulações, da variação das distâncias entre as aletas e o tanque do transformador. Adicionalmente, foi realizada uma variação da distância entre os pontos de entrada e saída das aletas do tanque. Estas duas últimas análises foram realizadas com o propósito de se conhecer a distância mais eficiente das aletas em relação ao tanque, e com isso melhorar a dissipação do calor gerado pela parte ativa do transformador.

Analisando os resultados das simulações, observa-se que o desempenho térmico com a aleta no formato elíptico é superior ao tubular. Isso se deve ao fato da possibilidade de instalação de um número maior de aletas no formato elíptico do que no formato tubular, assim, trazendo melhores resultados térmicos, mesmo que a área de dissipação térmica para aletas no formato tubular seja maior que para aletas no formato elíptico. Quanto à variação do ponto de entrada e saída das aletas no tanque, concluiu-se que quanto mais abaixo estiver localizado o ponto inferior da aleta, melhor é a dissipação do calor pelo sistema de refrigeração, ou seja, menor é a temperatura de topo de óleo. Analisando os resultados da variação da distância das aletas em relação ao tanque, observa-se que aumentando a distância, existe um ganho na dissipação, pois se percebe o papel da circulação do ar por entre as aletas.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE TEÓRICA DE PROJETO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

4.1. Introdução

A operação de um transformador é acompanhada por diversas perdas que acarretam custos na operação das redes de distribuição e, conseqüentemente, aos consumidores. Visando a eficientização do sistema elétrico, os projetistas procuram melhorar o desempenho do transformador tendo em vista a redução de suas perdas. Alternativas para aumento da eficiência destes equipamentos normalmente resultam em elevação do seu custo de manufatura, em contrapartida, reduz-se o custo operacional do sistema. O custo de manufatura é elevado, devido a utilização de materiais com maior nível de qualidade, ou em maior quantidade. Assim, o projetista tem a missão de propor projetos que apresentem uma boa relação custo/benefício, isto é, sejam economicamente viáveis para as empresas interessadas (NUNES, 2011).

Este capítulo apresenta uma metodologia de cálculo de projeto de transformadores de distribuição, baseada em equações presentes na literatura, bem como equações utilizadas pela empresa de produtos elétricos Romagnole em projetos de transformadores de distribuição, destinadas à determinação de parâmetros elétricos e mecânicos destes equipamentos.

Uma metodologia para melhoria do desempenho de transformadores de distribuição também é apresentada neste capítulo. Esta metodologia consiste na análise do comportamento das perdas em vazio e sob carga diante a variação de parâmetros básicos de projeto destes dispositivos elétricos. Além disso, simulações de perdas em elementos finitos no software Maxwell, para a comprovação de resultados, são realizadas.

Maxwell é um software interativo de alto desempenho que usa análises em elementos finitos para resolver problemas elétricos, magnetostáticos, correntes parasitas, e transitórios (ANSYS, 2010).

Adicionalmente, é apresentada uma análise de perdas e simulações térmicas para um transformador de distribuição com núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante, com o propósito de analisar a influência nas perdas a vazio e perdas totais em transformadores de distribuição, devido a utilização de metal amorfo no núcleo destes equipamentos.

4.2. Metodologia de Cálculo de Projeto de Transformadores de Distribuição

A metodologia de cálculo para o projeto de transformadores de distribuição utilizada neste trabalho baseia-se na utilização de equações clássicas presentes na literatura, bem como equações de projeto utilizadas pela Romagnole, para a obtenção das características elétricas e mecânicas destes equipamentos. Além disso, normas da ABNT são utilizadas para o estabelecimento dos valores admissíveis para estes parâmetros. Para tanto, é utilizado como modelo base um transformador de distribuição trifásico, com potência de 75 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de aço-silício do tipo envolvente, óleo mineral isolante e enrolamentos de alumínio, como projetado e fabricado pela Romagnole Produtos Elétricos S.A.

A metodologia de cálculo utilizada é apresentada, de forma sucinta, no fluxograma da Figura 4.1.

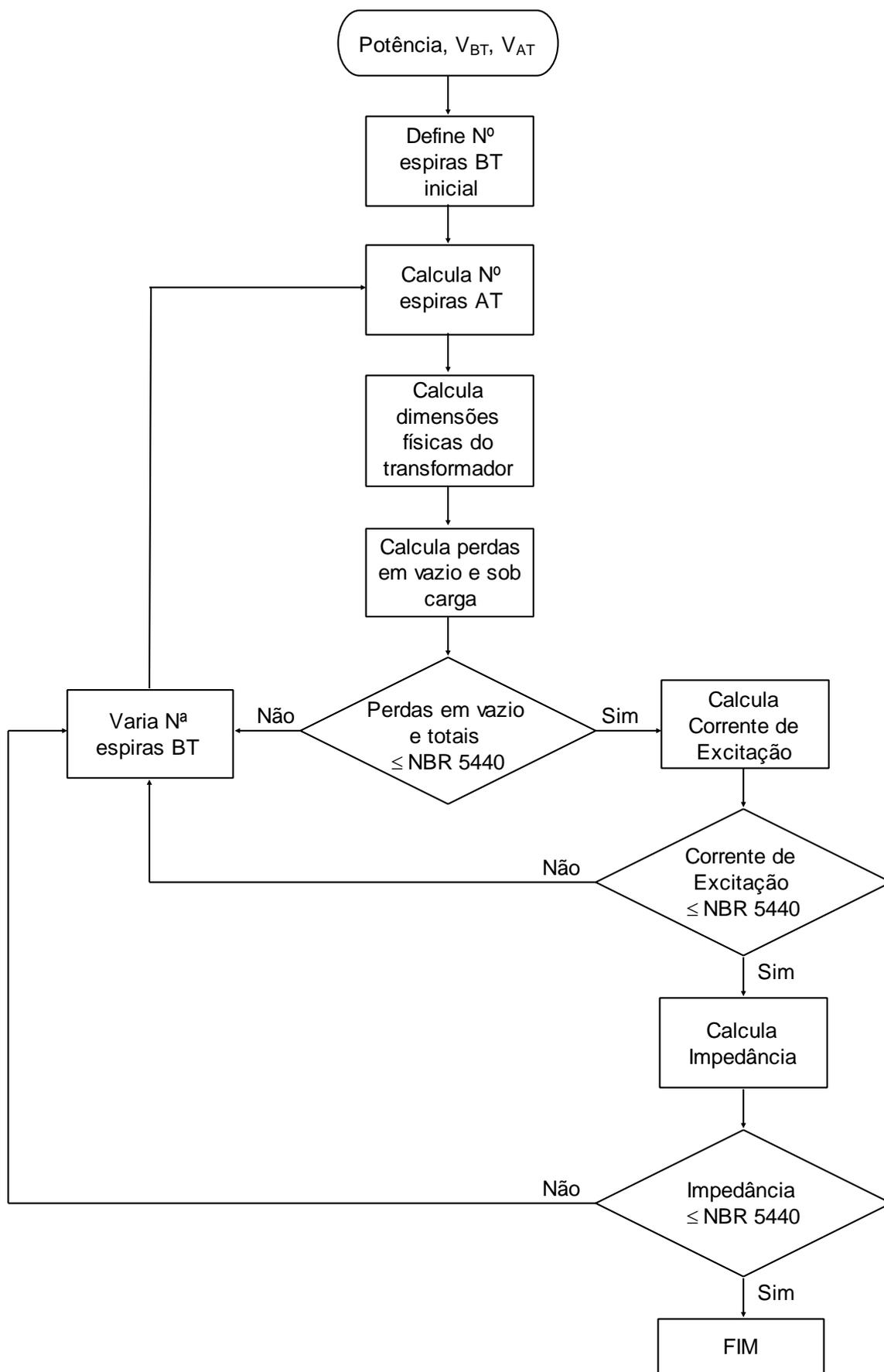


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de cálculo para projeto do transformador em análise.

Conforme se observa no fluxograma da Figura 4.1, a primeira etapa na obtenção dos parâmetros do transformador em análise é a escolha do valor da potência do transformador e a tensão de operação nos terminais de alta e baixa tensão. O segundo passo, é a escolha, de forma arbitrária, do número de espiras dos enrolamentos de baixa tensão. Após isso, é determinado, através da relação de transformação, o número de espiras nos enrolamentos de alta tensão. O cálculo das dimensões físicas, tanto do núcleo como dos enrolamentos, do transformador é a etapa que se segue após a determinação do número de espiras dos enrolamentos de AT. A etapa seguinte é a determinação, através de equações clássicas, das perdas em vazio e em carga do equipamento, seguida de uma comparação com os valores de perdas em vazio e perdas totais estipulados pela NBR 5440. Caso as perdas em vazio e as perdas totais do transformador estiverem abaixo dos limites estipulados pela norma, segue-se para o cálculo da corrente de excitação, caso contrário, adota-se outro valor para o número de espiras nos enrolamentos de BT, e se determina, novamente, as dimensões físicas do transformador, bem como as perdas em vazio e perdas em carga. Após o cálculo da corrente de excitação, é feita uma comparação com os valores admissíveis, para este parâmetro, estipulados pela NBR 5440. Se o valor deste parâmetro estiver abaixo dos limites estipulados pela norma, a próxima etapa é a determinação da impedância do transformador, caso contrário, adota-se outro valor para o número de espiras nos enrolamentos de BT, e se determina novamente todos os parâmetros já descritos anteriormente. Após o cálculo da impedância, é feita uma comparação com os valores admissíveis, para este parâmetro, estipulados pela NBR 5440. Caso a impedância não estiver abaixo dos limites estipulados pela norma, adota-se outro valor para o número de espiras nos enrolamentos de BT, e se determina novamente os parâmetros já descritos.

A seguir são detalhadas algumas equações utilizadas na determinação dos parâmetros descritos no fluxograma da Figura 4.1.

4.2.1. Número de Espiras nos Enrolamentos de Alta Tensão

O número de espiras nos enrolamentos de alta tensão é determinado através da relação de transformação de um transformador, conforme a equação (4.1).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.1)$$

Onde:

V_1 = tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento primário (V)

V_2 = tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento secundário (V)

N_1 = número de espiras do enrolamento primário

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário

No entanto, deve-se tomar cuidado com os tipos de ligações dos enrolamentos nos terminais de alta e baixa tensão, necessitando, dessa forma, a adequação da equação (4.1) para a determinação do número de espiras.

4.2.2. Dimensões Físicas do Transformador

As dimensões físicas do transformador são determinadas a partir das dimensões dos condutores utilizados nos enrolamentos de BT e AT, o valor de indução utilizado para o projeto, bem como o tipo de chapa utilizada no núcleo, entre outros parâmetros de projeto de transformadores. Devido a sigilo de projeto da empresa Romagnole, as equações utilizadas para o dimensionamento físico do transformador não são apresentadas.

4.2.3. Perdas em Vazio e Perdas em Carga

As perdas em vazio estão sempre presente e constante durante a operação normal do transformador. Estas perdas são determinadas a partir das dimensões físicas do núcleo do transformador, ou seja, a partir do peso total do núcleo do equipamento, e do valor de perdas no núcleo em função da indução adotado para o projeto. Dessa forma, as perdas em vazio podem ser determinadas a partir da equação (4.2).

$$Perdas_{vazio} = Peso_{Núcleo} \times W / kg \quad (4.2)$$

Onde:

$Peso_{Núcleo}$ = peso total do núcleo (kg)

W/kg = perdas no núcleo por quilograma (W/kg)

As perdas sob carga são as perdas incorridas durante as operações de carga do transformador e são dependentes do carregamento do equipamento. Estas perdas são dependentes das dimensões físicas do núcleo e dos enrolamentos de AT e BT, bem como do material utilizado como condutor nos enrolamentos, além de serem dependentes da densidade de corrente e o número de espiras dos enrolamentos de AT e BT. As perdas sob carga são

divididas basicamente em perdas ôhmicas e perdas parasitas. Dessa forma, as perdas ôhmicas podem ser determinadas a partir da equação (4.3), e as perdas parasitas pela equação (4.4).

$$Perdas_{\text{ôhmicas}} = \frac{\rho}{\gamma} \times Peso_{\text{Cond.}} \times Dens.Corr.^2 \quad (4.3)$$

Onde:

ρ = resistividade do material ($\Omega.m$)

γ = peso específico do material (kg/m^3)

$Peso_{\text{Cond.}}$ = peso do condutor (kg)

$Dens.Corr$ = densidade de corrente (A/m)

$$Perdas_{\text{parasitas}} = K_p \times Perdas_{\text{ôhmicas}} \quad (4.4)$$

Onde:

K_p = coeficiente de Rogowski

Logo, conforme a equação (4.5), as perdas sob carga em um transformador é a soma das perdas ôhmicas e perdas parasitas.

$$Perdas_{\text{Carga}} = Perdas_{\text{ôhmicas}} + Perdas_{\text{Parasitas}} \quad (4.5)$$

4.2.4. Corrente de Excitação

Conforme o projeto de transformador da empresa Romagnole, a corrente de excitação em percentual pode ser calcula conforme a equação (4.6).

$$I_{0\%} = 100 \times \frac{VA/kg \times Peso_{\text{Núcleo}}}{Pot.} \quad (4.6)$$

Onde:

$I_{0\%}$ = corrente de excitação (%)

VA/kg = potência aparente por quilograma (VA/kg)

$Pot.$ = potência do transformador (VA)

4.2.5. Impedância

Conforme as equações presentes na literatura, bem como no projeto de transformador da empresa Romagnole, a impedância em percentual é calculada conforme a equação (4.7).

$$\text{Im pedância } \% = \sqrt{\text{Re sistência } \% ^2 + \text{Re atância } \% ^2} \quad (4.7)$$

4.3. Projeto de Redução de Perdas

A metodologia de redução de perdas do transformador em estudo, descrito no início deste capítulo como *transformador base*, consiste na análise do comportamento das perdas em vazio e sob carga diante da variação de três parâmetros básicos de projeto de transformadores de distribuição: indução, volt/espira e densidade de corrente. Esta análise tem como objetivo proporcionar aos projetistas de transformadores de distribuição uma visão de possíveis melhorias no desempenho destes equipamentos, por meio da redução de suas perdas.

Inicialmente, para a validação da variação dos parâmetros para redução de perdas, tendo como base o projeto do transformador fabricado pela Romagnole, é feito a variação do valor do volt/espira utilizado no projeto deste transformador. A Figura 4.2 apresenta o comportamento das perdas em vazio e sob carga diante a variação deste parâmetro.

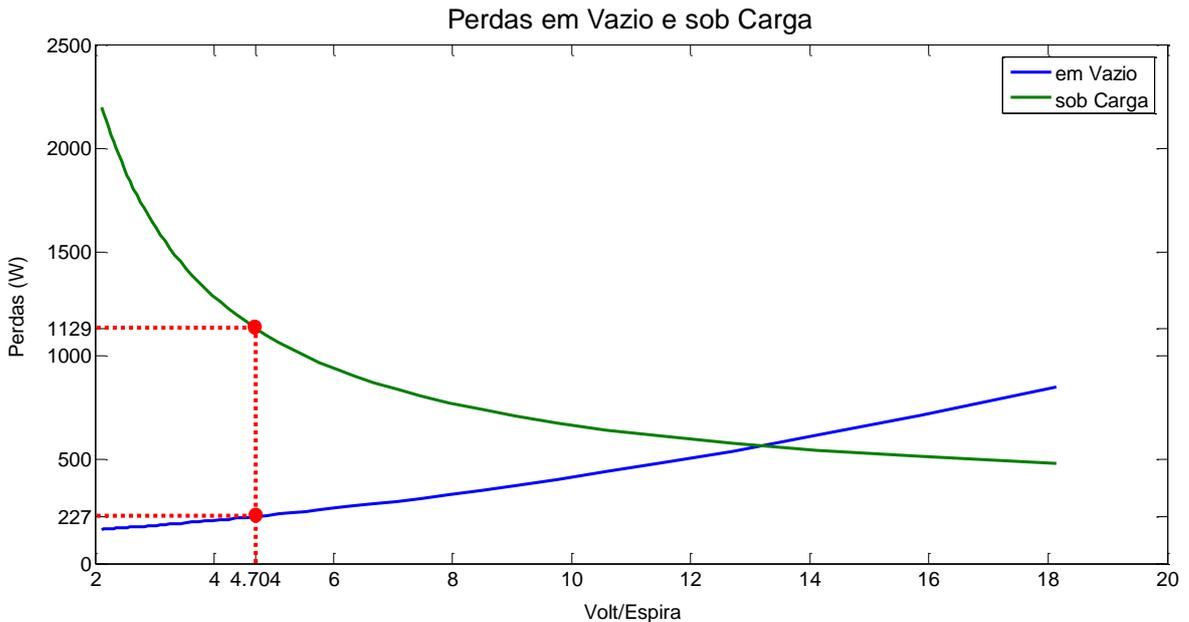


Figura 4.2 – Variação das perdas em função do volt/espira.

A partir da Figura 4.2 é possível observar que, para um valor de projeto do volt/espira igual a 4,704, as perdas a vazio e sob carga obtiveram valores correspondentes aos valores de projeto, configurando essa metodologia para redução das perdas, válida e condizente com os resultados esperados, segundo projeto. Apesar de o ponto ótimo de projeto e operação, para os valores de perdas, ser para um valor do volt/espira de aproximadamente 13,2, não é o ponto mais economicamente viável, não sendo, desta forma, adotado como ponto de projeto pela Romagnole. Além disso, conforme a Figura 4.2, pode-se observar também o comportamento das perdas diante a variação da variável volt/espira, uma vez que as perdas a vazio apresentam um comportamento diretamente proporcional à variação deste parâmetro, enquanto que as perdas sob carga apresentam um comportamento inversamente proporcional a esta variação.

Com o propósito de comprovação do valor de perdas a vazio deste transformador, são realizadas simulações, em elementos finitos através do software Maxwell. Esta simulação é uma simulação magnética do tipo transiente. Para este tipo de simulação é necessário informar alguns parâmetros como: frequência de operação, valor inicial da corrente nos enrolamentos, valor da tensão de pico nas bobinas, definir o tipo de material do núcleo, informar a curva B-H, densidade, condutividade e espessura das chapas do núcleo, bem como, definir o número de elementos utilizados para a realização da simulação. A Figura 4.3 apresenta a curva de perdas a vazio do transformador base, obtido por meio de simulação.

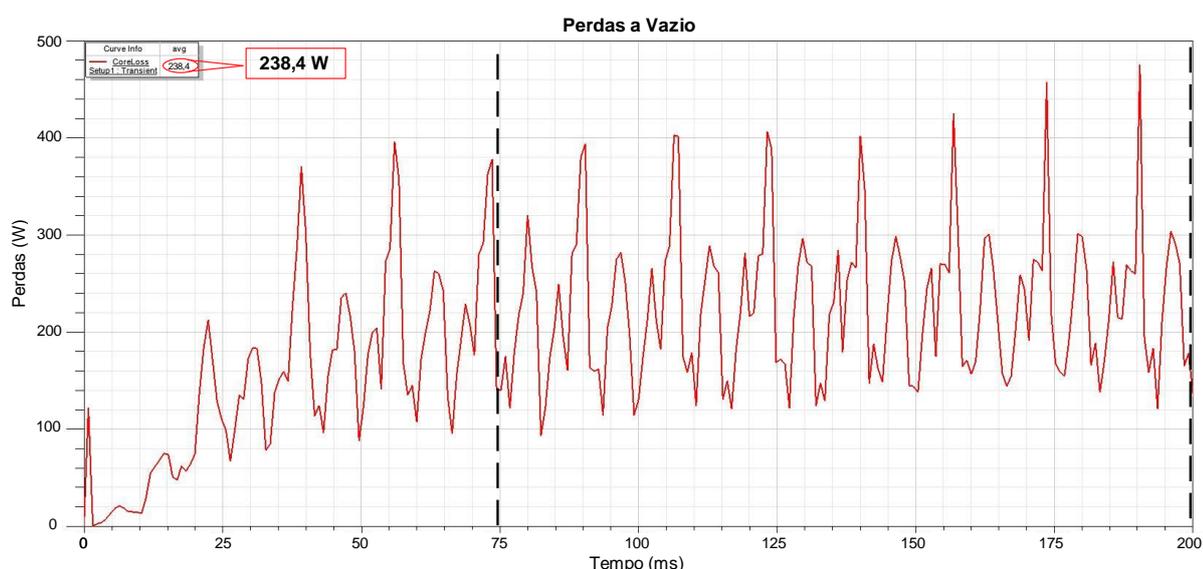


Figura 4.3 – Perdas a vazio obtidas em simulação.

O valor de perdas calculadas analiticamente, conforme projeto, apresenta um valor de 227W. Observa-se, na Figura 4.3, que o valor médio de perdas obtido através da simulação,

entre o intervalo mostrado na figura, é de aproximadamente 238W. Dessa forma, a simulação apresenta um erro de aproximadamente 4,85% em relação às perdas a vazio segundo projeto.

A Figura 4.4 ilustra as formas de onda da tensão nos enrolamentos de alta tensão, obtidas por meio de simulação.

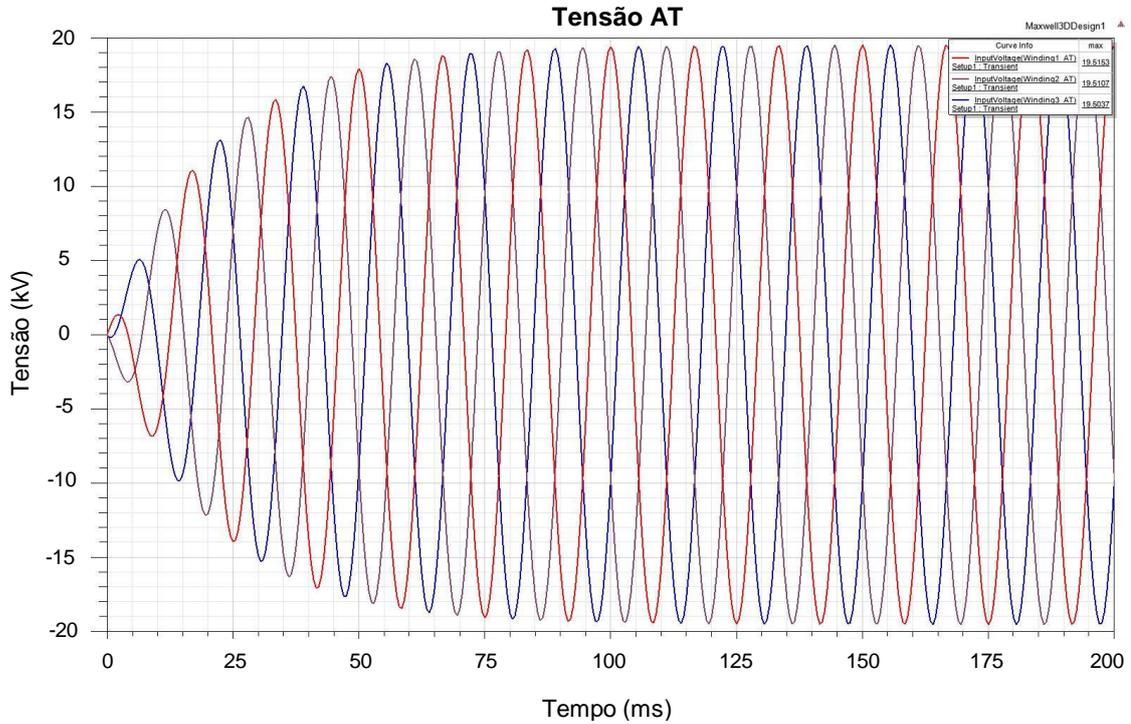


Figura 4.4 – Curva de tensão nos enrolamentos de AT obtida em simulação.

Variações nos valores de volt/espira, indução e densidade de corrente são realizadas, com o intuito de verificar e analisar a influência destas variáveis nas perdas a vazio e sob carga do transformador. A primeira variação realizada é a do valor da indução e do volt/espira. O comportamento das perdas a vazio e sob carga, diante esta variação, é mostrado nas curvas da Figura 4.5 e Figura 4.8, respectivamente.

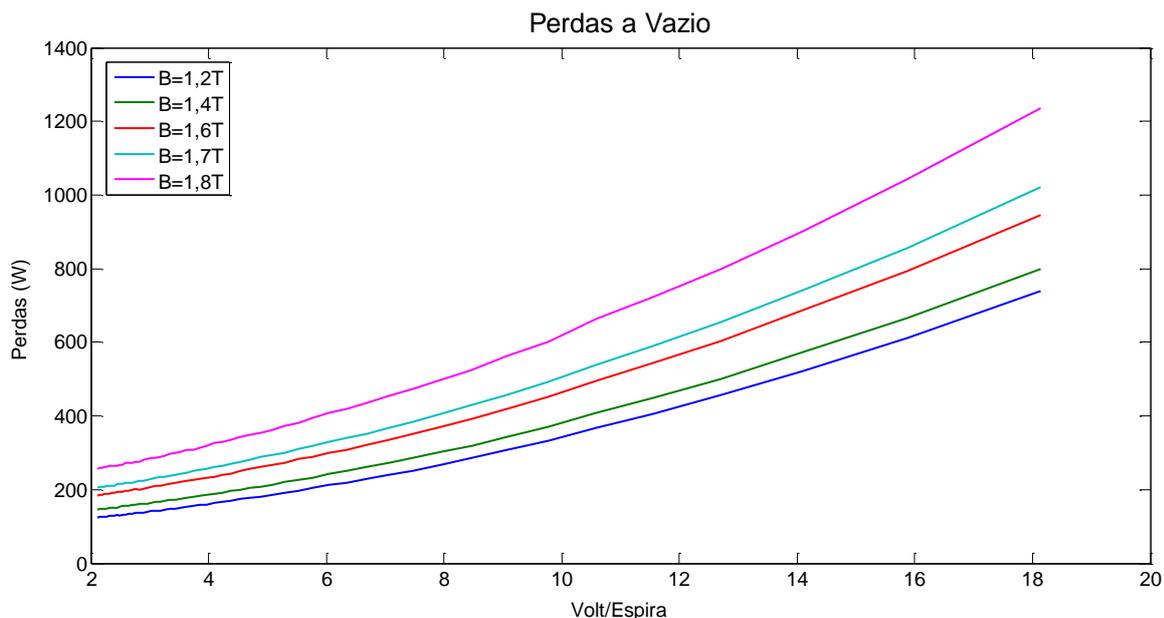


Figura 4.5 – Perdas a vazio variando a indução e o volt/espira.

Observando a Figura 4.5 nota-se que as perdas a vazio apresentam um comportamento diretamente proporcional à variação da indução e do volt/espira, ou seja, conforme se aumenta o valor destes parâmetros, as perdas também aumentam. Analisando esta variação, para um valor do volt/espira de aproximadamente 3,25 e indução de 1,2 T e 1,8 T, tem-se uma redução de aproximadamente 49% nas perdas a vazio, conforme se observa na Figura 4.6. Já considerando um valor de indução de 1,6 T e volt/espira de aproximadamente 2,11 e 5,66, obtêm-se uma redução nas perdas de aproximadamente 40%, conforme Figura 4.7.

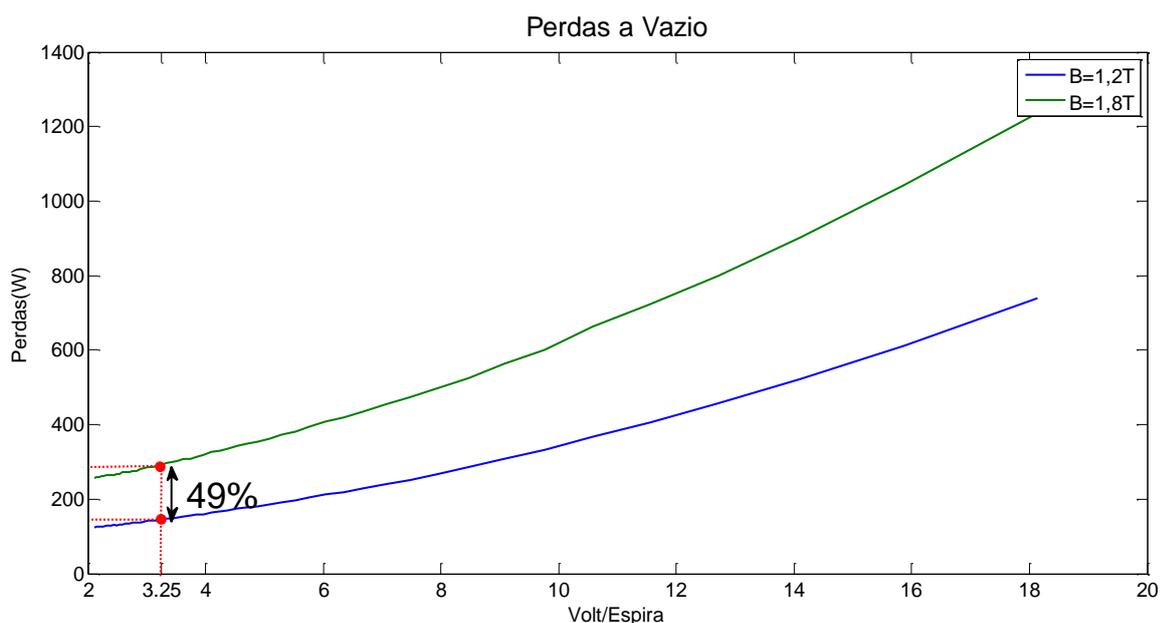


Figura 4.6 – Redução de perdas a vazio variando a indução e o volt/espira.

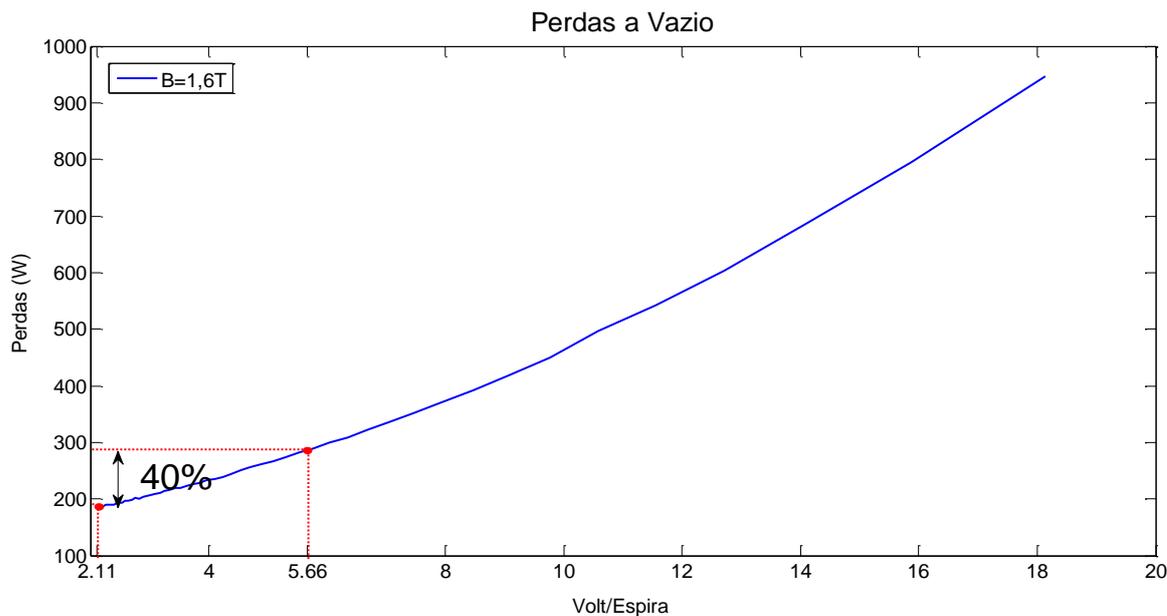


Figura 4.7 – Redução de perdas a vazio variando o volt/espira.

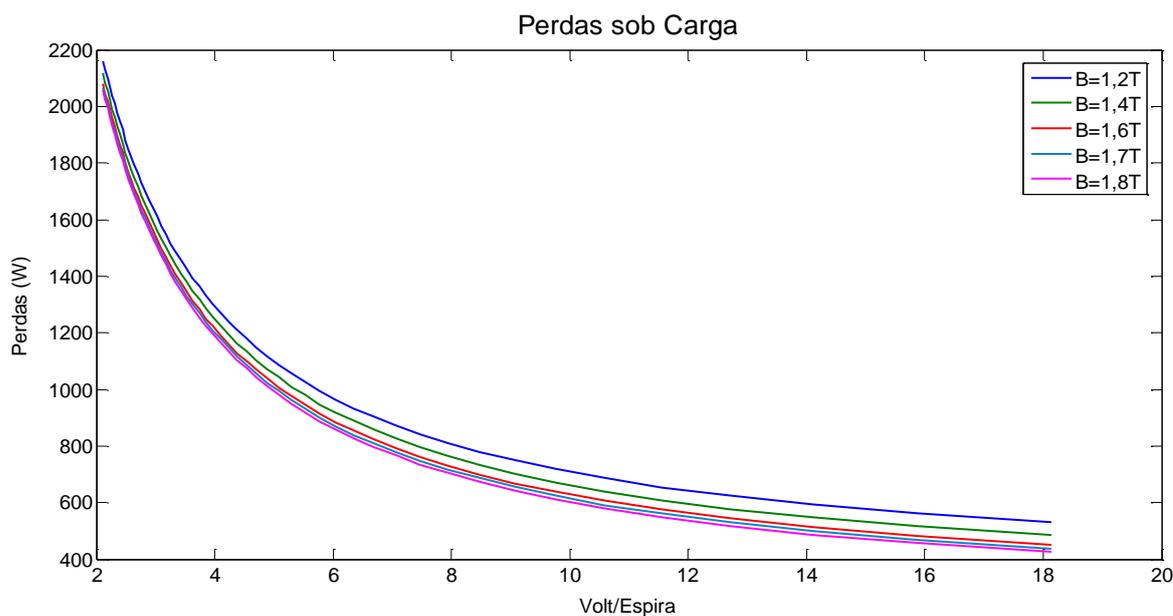


Figura 4.8 – Perdas sob carga variando a indução e o volt/espira.

Já as perdas sob carga, conforme se observa na Figura 4.8, apresentam comportamento inversamente proporcional à variação destes parâmetros de projeto, ou seja, conforme se aumentam estas variáveis, as perdas diminuem. Observa-se também que a variação da indução não apresenta muita influência sob as perdas sob carga, como acontece nas perdas a vazio. No entanto, admitindo uma indução de 1,8 T e volt/espira de aproximadamente 4,38 e 18,14, obtêm-se uma redução de cerca de 61% nas perdas sob carga, conforme se observa na Figura 4.9.

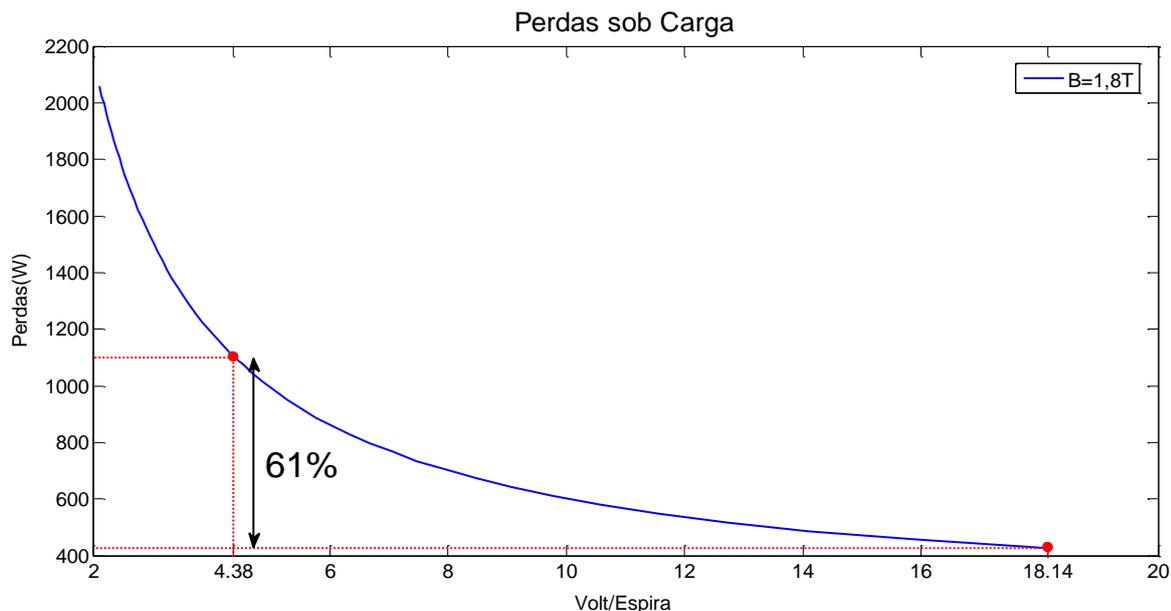


Figura 4.9 – Redução de perdas sob carga variando o volt/espira.

Outra variação efetuada é a variação do valor da densidade de corrente e do volt/espira. O comportamento das perdas a vazio, diante esta variação, é mostrado na Figura 4.10, enquanto o comportamento das perdas sob carga é apresentado nas curvas da Figura 4.12.

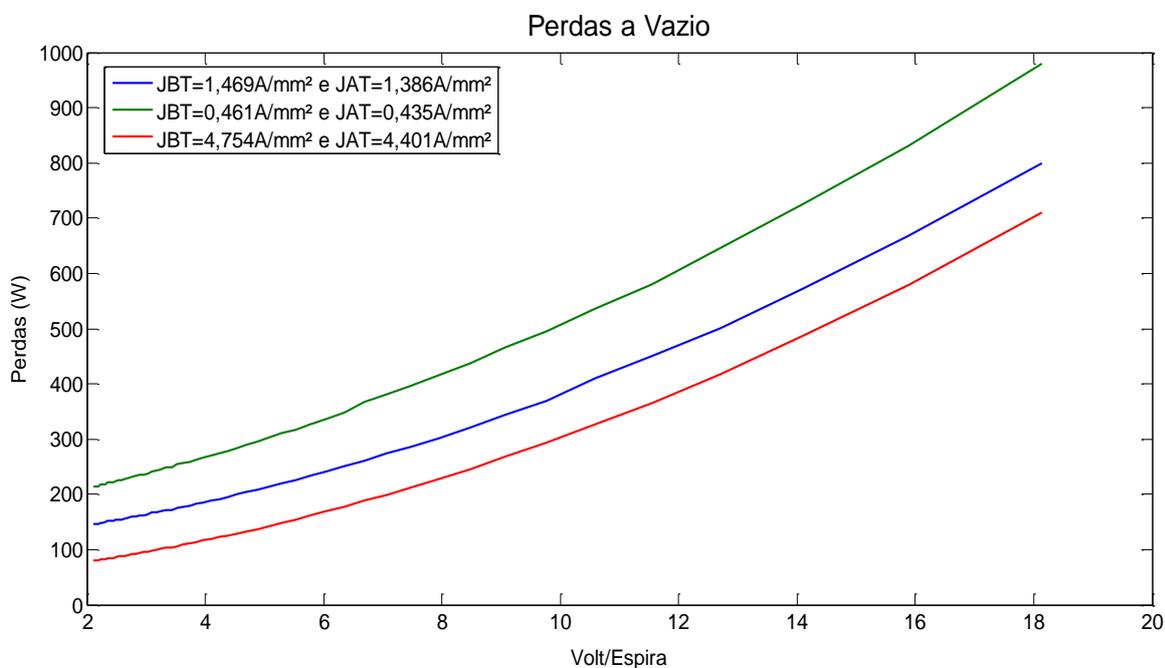


Figura 4.10 – Perdas a vazio variando a densidade de corrente e o volt/espira.

Conforme se observa na Figura 4.10, as perdas a vazio apresentam um comportamento inversamente proporcional à variação da densidade de corrente, ou seja, conforme se aumenta este parâmetro, as perdas diminuem. Para o valor do volt/espira igual a 4,88, a redução de perdas a vazio, diante a variação da densidade de corrente, é de aproximadamente 30%, conforme se observa na Figura 4.11.

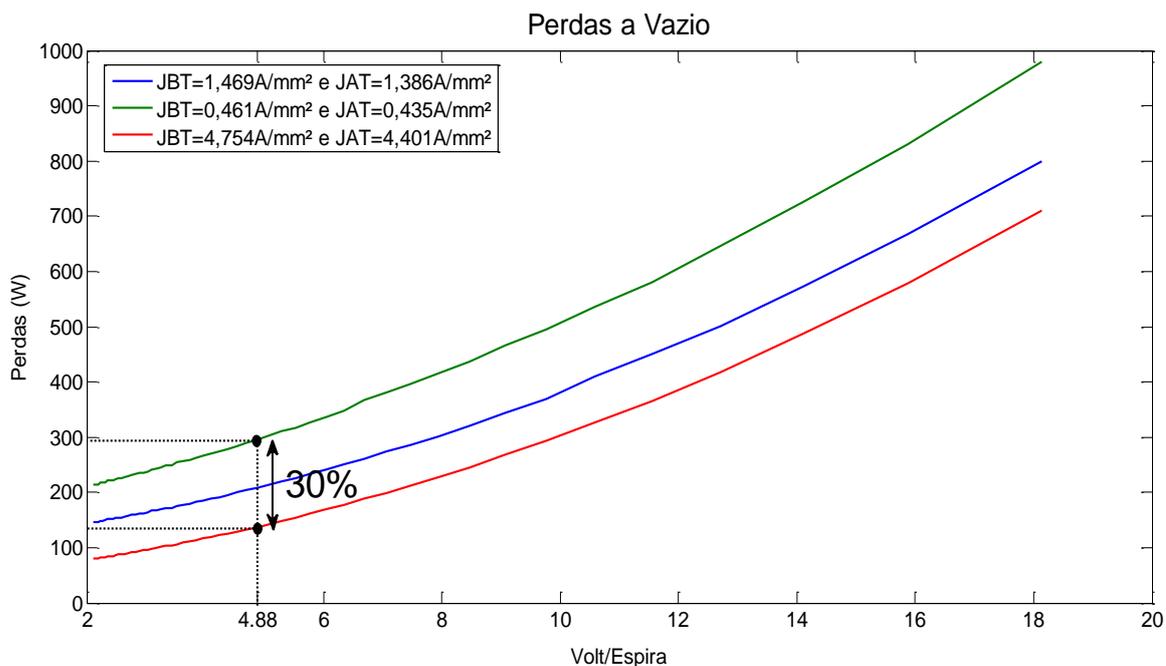


Figura 4.11 – Redução de perdas a vazio variando a densidade de corrente.

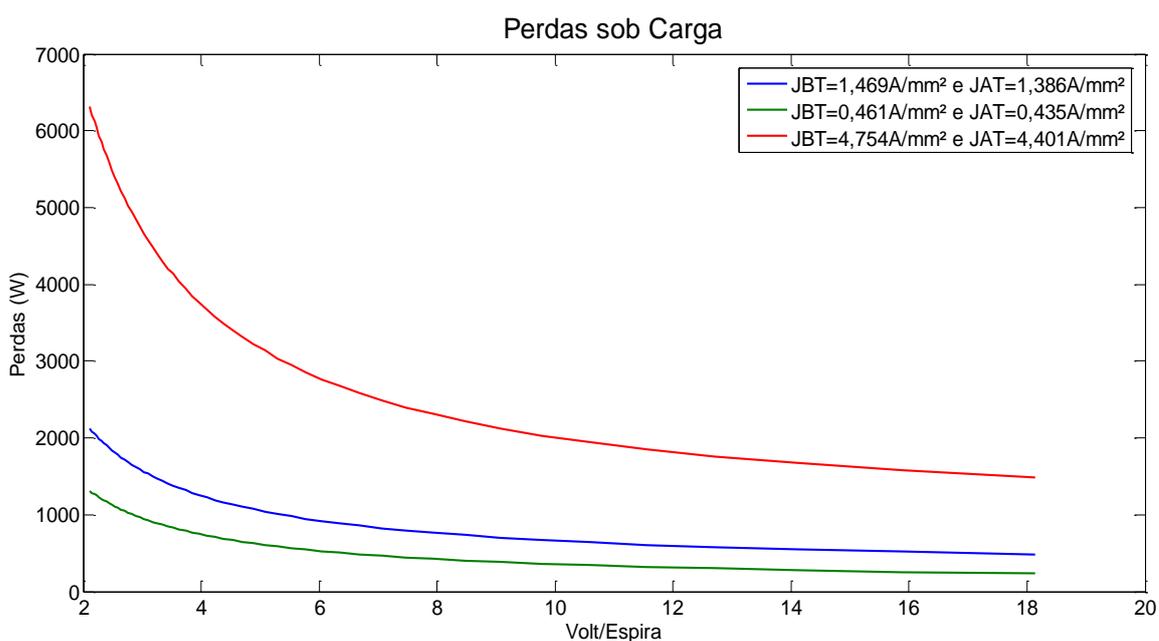


Figura 4.12 – Perdas sob carga variando a densidade de corrente e o volt/espira.

A partir da Figura 4.12 pode-se observar que as perdas sob carga apresentam um comportamento diretamente proporcional à variação da densidade de corrente, ou seja, conforme se aumenta esta variável, as perdas também aumentam. Admitindo um valor do volt/espira igual a 15,87, as perdas sob carga sofreram uma redução de aproximadamente 84%, diante a variação da densidade de corrente de um valor maior para um valor menor, conforme apresenta a Figura 4.13.

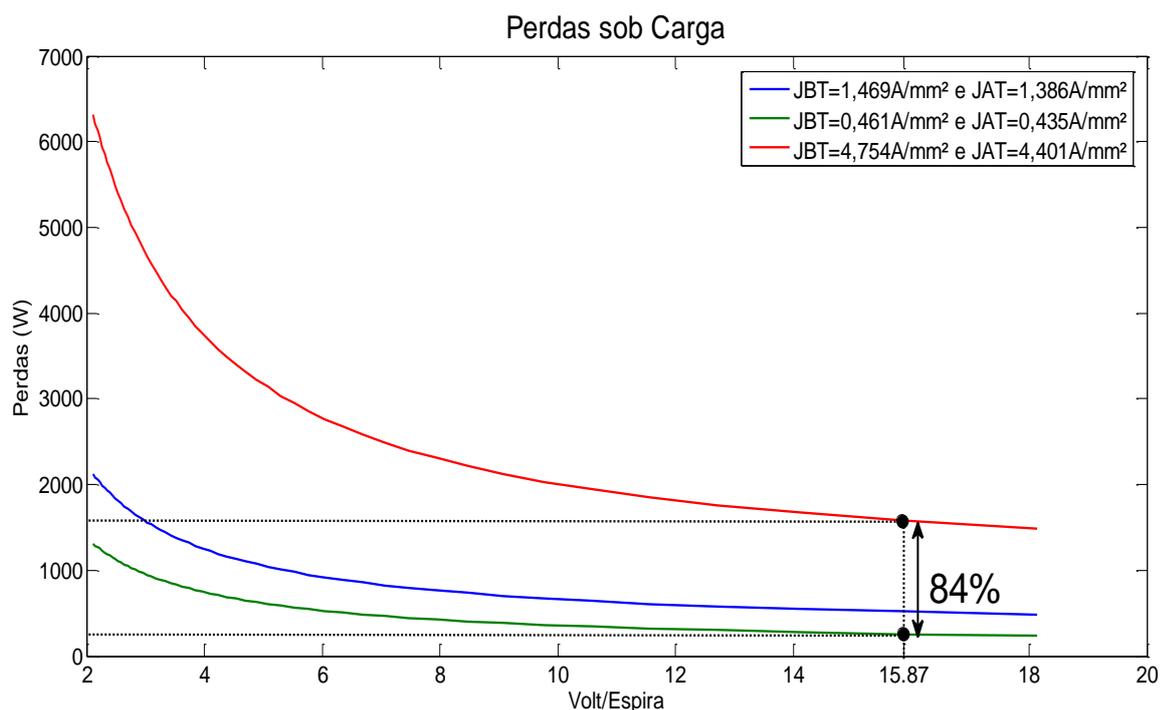


Figura 4.13 – Redução de perdas sob carga variando a densidade de corrente.

A Figura 4.14 apresenta o comportamento das perdas totais, perante a variação do volt/espira e da indução.

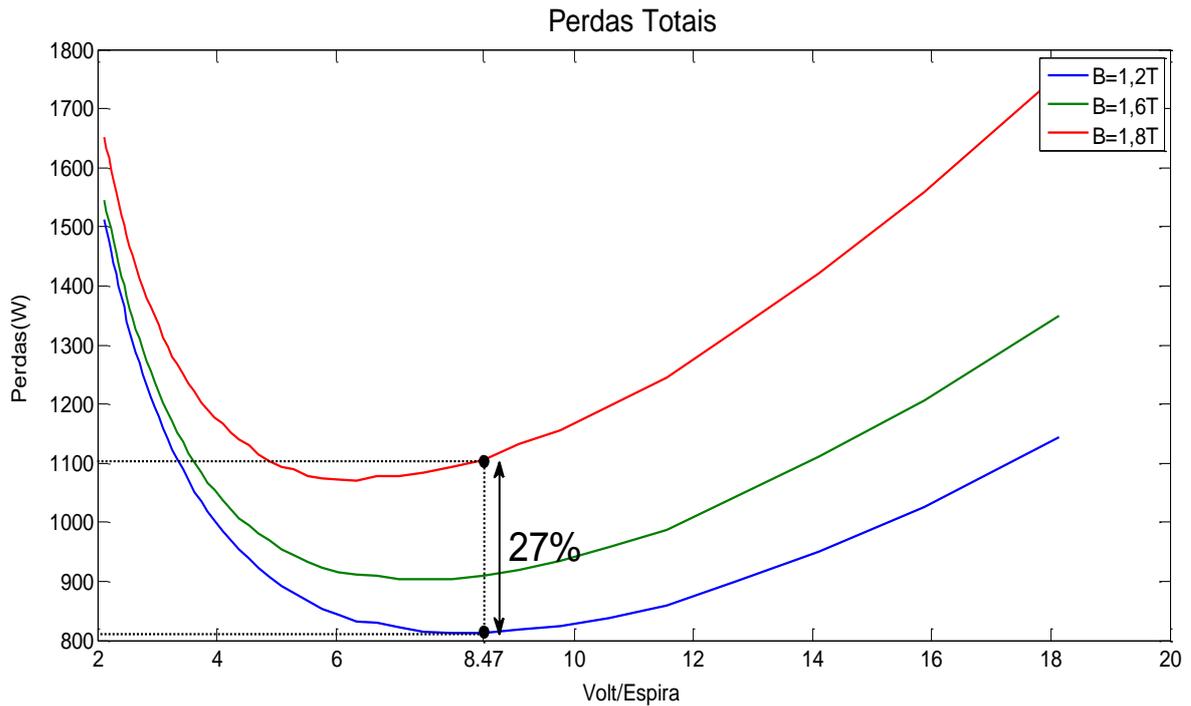


Figura 4.14 – Perdas totais variando a indução e o volt/espira.

Observando a Figura 4.14, nota-se que as perdas totais do transformador apresentam um comportamento semelhante a uma função quadrática, ou seja, as perdas decrescem até determinado valor (ponto onde as perdas são mínimas), para a variação do volt/espira, voltando a crescer com o aumento do valor desta variável. Além disso, admitindo um valor do volt/espira igual a 8,47 e indução de 1,2 T e 1,8 T, tem-se uma redução de cerca de 27% nas perdas totais diante a variação destes parâmetros.

A partir do levantamento do comportamento das perdas a vazio, sob carga e perdas totais, mediante a variação dos parâmetros de projetos descritos, pode-se fazer a escolha do melhor ponto de projeto e operação do transformador, conforme mostra a Figura 4.15. Para tanto é necessário considerar, além dos valores de perdas do equipamento, o custo de manufatura do mesmo, analisando o custo benefício do ponto de projeto adotado. Pois, ao se diminuir as perdas com a diminuição da indução e da densidade de corrente, tem-se um aumento no peso total do transformador, que por consequência, acarreta a um aumento de custo.

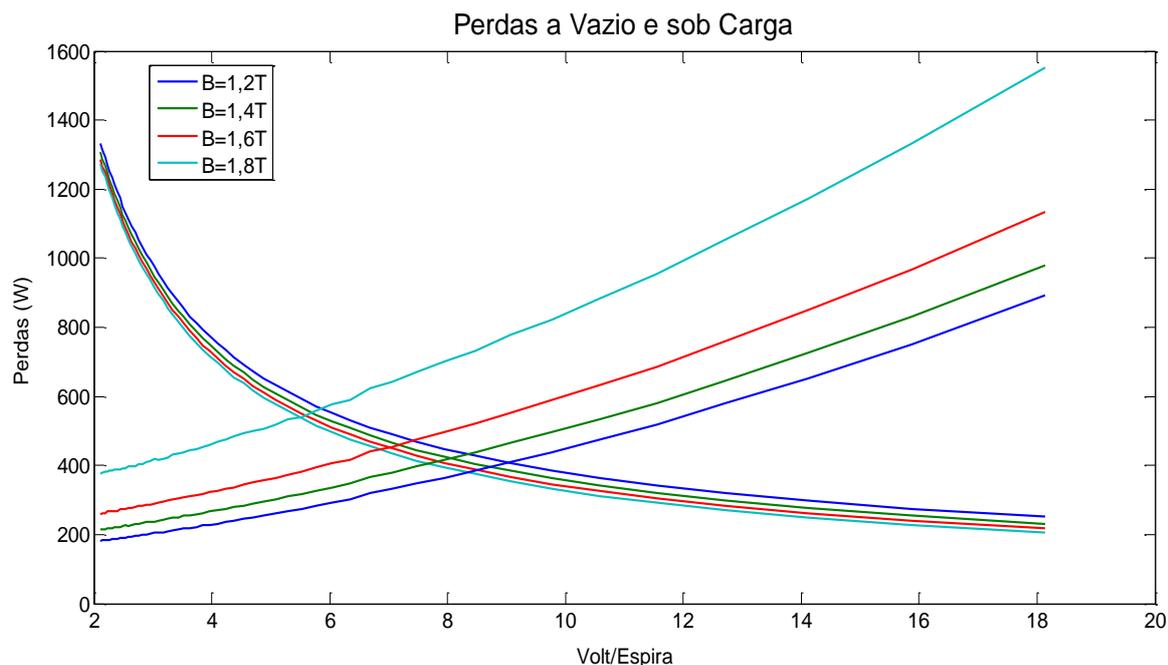


Figura 4.15 – Perdas a vazio e sob carga variando a indução e o volt/espira.

Admitindo um valor do volt/espira de aproximadamente 8,5, as perdas totais, para as induções de 1,2 T e 1,8 T, são aproximadamente 812 W e 1106 W, respectivamente. A partir destes valores, nota-se uma diferença percentual de aproximadamente 27% no valor total de perdas, através da variação da indução utilizada no projeto e manufatura do transformador. Dessa forma, uma correta e atenciosa análise e estudo das variáveis a serem adotadas para o projeto deste equipamento é de fundamental importância.

4.4. Análise de Perdas Utilizando Núcleo de Metal Amorfo e Óleo Vegetal Isolante

Com o propósito de analisar a influência nas perdas a vazio e perdas totais em transformadores de distribuição, devido a utilização de metal amorfo no núcleo destes equipamentos, é realizada uma análise de perdas e simulações térmicas para um transformador de distribuição com núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante. A metodologia de cálculo utilizada para o projeto de transformadores de distribuição com núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante é a mesma utilizada para núcleo de aço-silício e óleo mineral isolante, conforme apresentada no fluxograma da Figura 4.1, diferindo somente no material utilizado no núcleo destes equipamentos.

Para a análise das perdas quando do emprego de metal amorfo no núcleo de transformadores de distribuição e comparação com as perdas quando do uso de aço-silício no núcleo dos mesmos, é utilizado como modelo base um transformador de distribuição trifásico,

com potência de 75 kVA, classe de tensão 15 kV, núcleo de metal amorfo do tipo envolvente, óleo vegetal isolante e enrolamentos de alumínio. A determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos deste transformador em análise se baseia nas equações de projeto utilizadas pela Romagnole.

A Figura 4.16 apresenta o comportamento das perdas em vazio diante a variação da indução e do volt/espira. Da mesma forma, a Figura 4.17 mostra o comportamento das perdas sob carga diante a mesma variação.

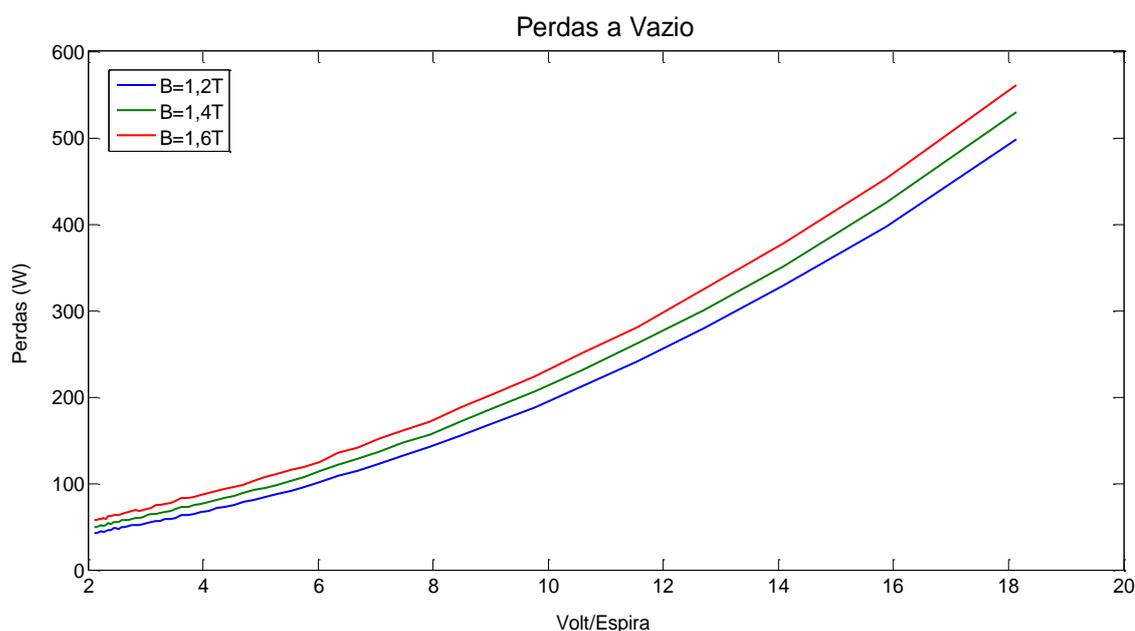


Figura 4.16 – Perdas a vazio variando a indução e o volt/espira para núcleo amorfo.

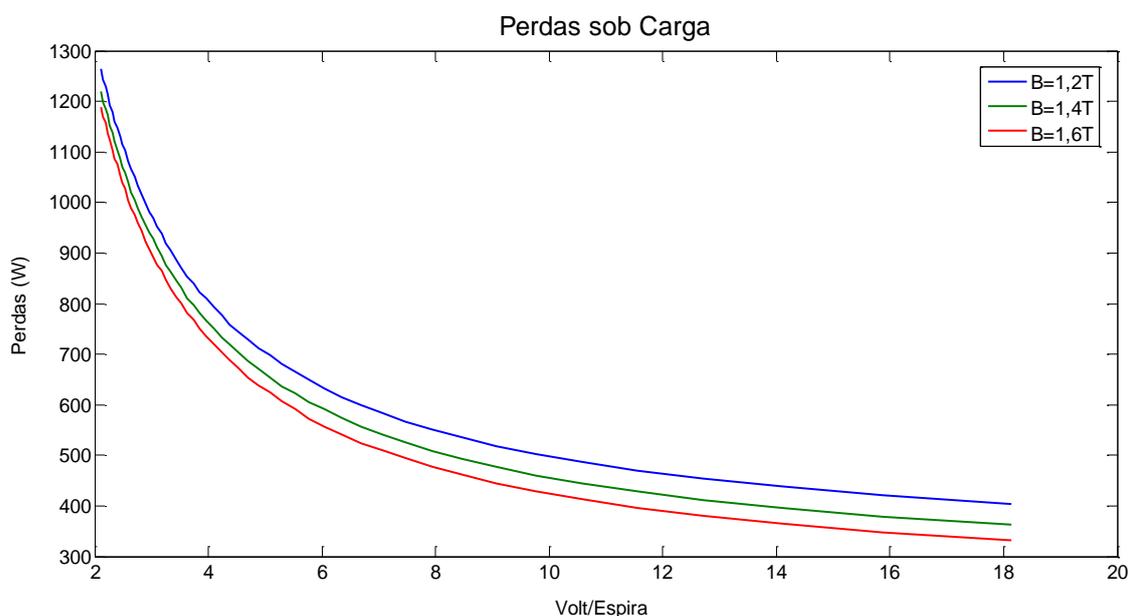


Figura 4.17 – Perdas sob carga variando a indução e o volt/espira para núcleo amorfo.

Observando a Figura 4.16 e a Figura 4.17, nota-se que o comportamento das perdas a vazio e sob carga para núcleo de metal amorfo são semelhantes ao comportamento das perdas para núcleo de aço-silício, diferindo somente na redução significativa de perdas a vazio quando da utilização de metal amorfo no núcleo de transformadores.

Uma comparação entre as perdas a vazio para núcleo de aço-silício e núcleo de metal amorfo é apresentada na Figura 4.18. Já a Figura 4.19 mostra a comparação entre as perdas totais para núcleo de aço-silício e núcleo de metal amorfo.

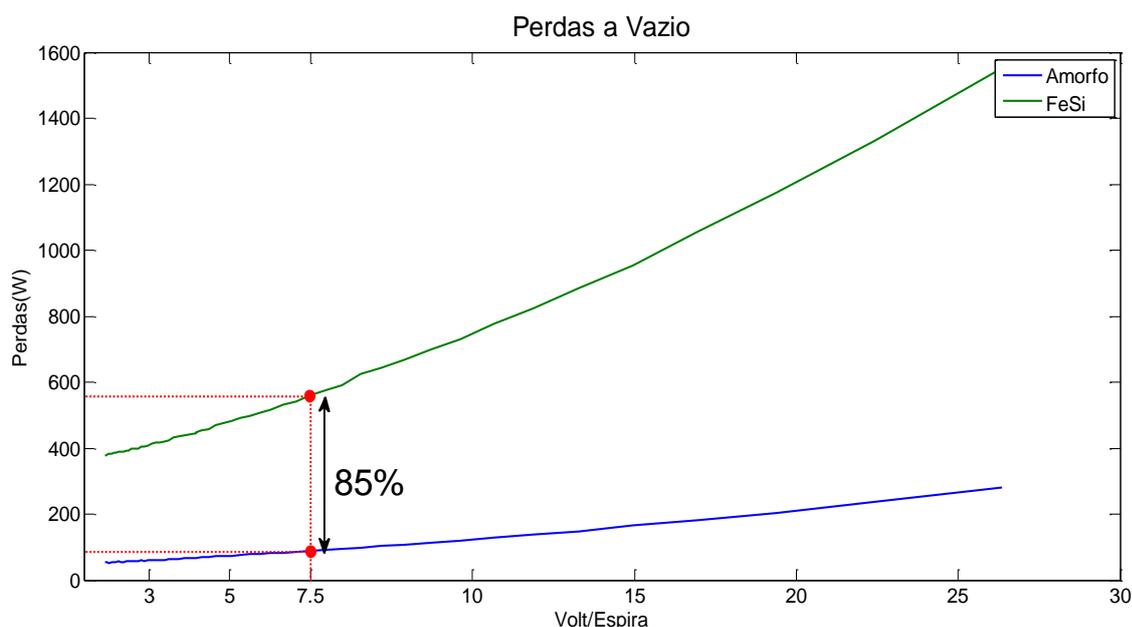


Figura 4.18 – Comparação entre perdas a vazio para metal amorfo e aço-silício variando o volt/espira.

Admitindo um valor do volt/espira de aproximadamente 7,5, porém o valor de saturação de cada material para a indução nota-se uma redução de aproximadamente 85% nas perdas a vazio, quando da utilização do metal amorfo em substituição ao aço-silício no núcleo de transformadores de distribuição, conforme se observa na Figura 4.18.

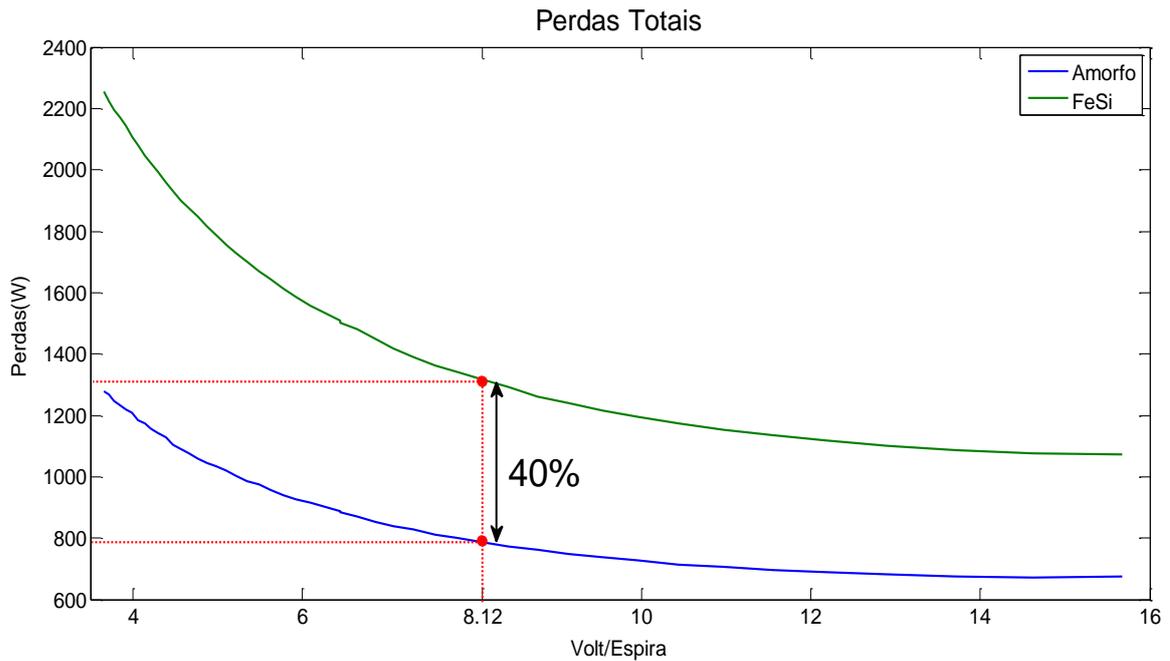


Figura 4.19 – Comparação entre perdas totais para metal amorfo e aço-silício variando o volt/espira.

Analisando as curvas de perdas totais da Figura 4.19, para um valor do volt/espira igual a 8,12, nota-se uma redução de aproximadamente 40% nas perdas totais para transformadores com núcleo de metal amorfo em comparação com transformadores com núcleo de aço-silício.

Simulações, em elementos finitos no software Maxwell, são realizadas, com o intuito de comprovar o valor de perdas a vazio, do transformador utilizado como base para a redução de perdas. A Figura 4.20 apresenta a curva de perdas a vazio do transformador base.

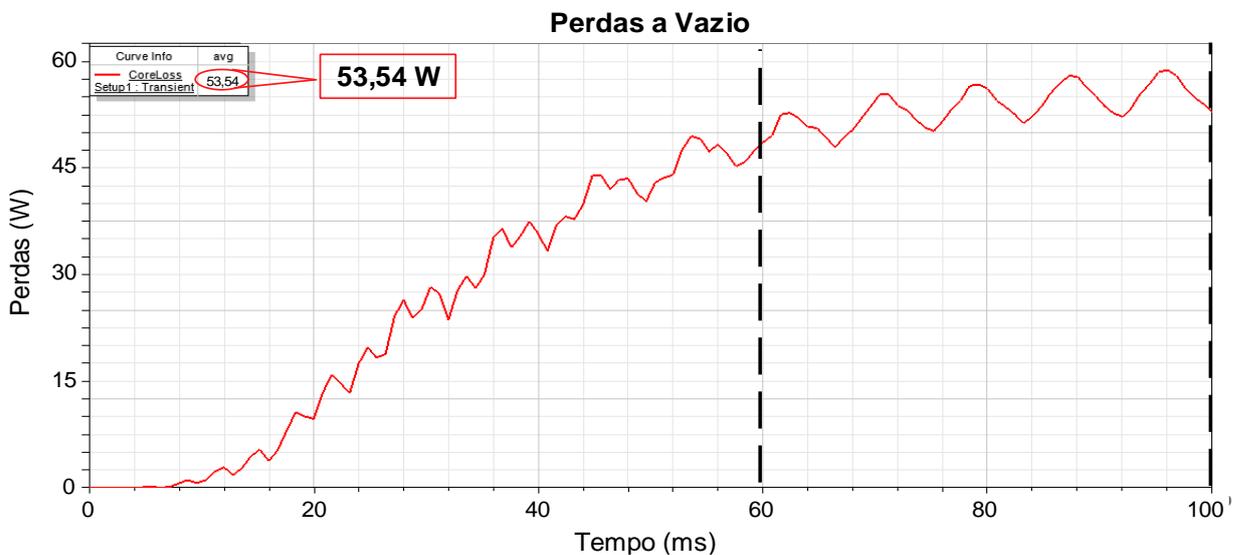


Figura 4.20 – Perdas a vazio do transformado com núcleo amorfo via simulação.

Observa-se, na Figura 4.20, que o valor médio de perdas obtido através da simulação, entre o intervalo mostrado na figura, é de aproximadamente 53,54 W. O valor de perdas calculadas analiticamente, conforme projeto, apresenta um valor de 57,7 W. Dessa forma, a simulação apresentou um erro de aproximadamente 7,20% em relação às perdas a vazio segundo projeto.

A Figura 4.21 ilustra as formas de tensão nos enrolamentos de alta tensão, obtidas por meio de simulação.

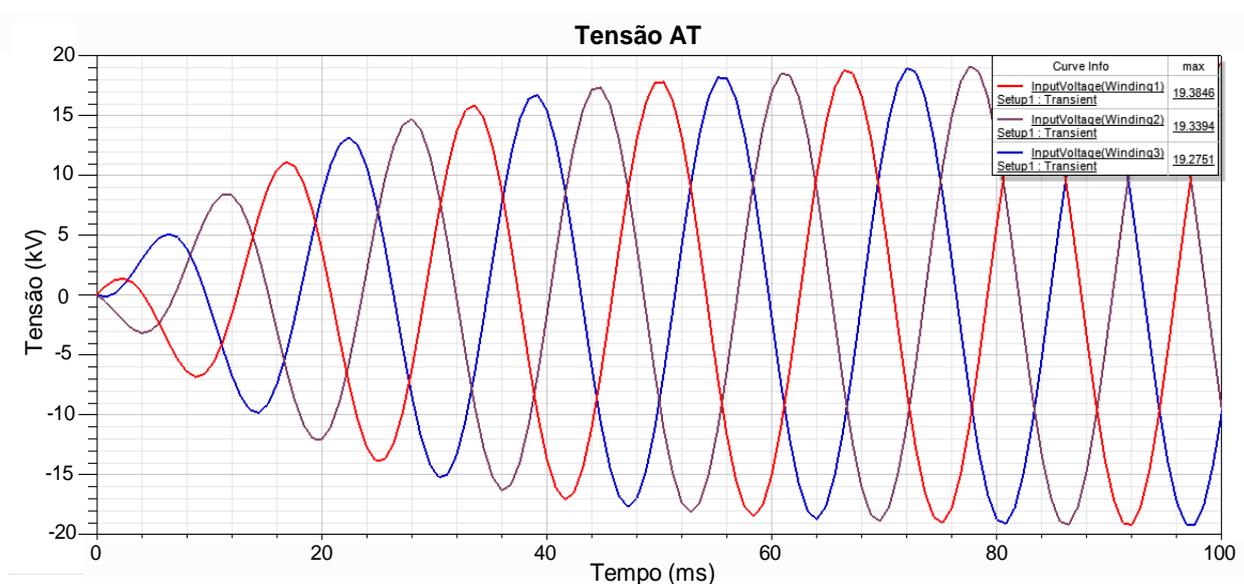


Figura 4.21 – Tensão nos enrolamentos de AT via simulação.

Os resultados das simulações térmicas, para este modelo de transformador, são apresentados no Capítulo 3 (Validação de Simulações Térmicas Utilizando o Método de Elementos Finitos - Modelo 4).

Através das simulações térmicas de configurações de radiadores para sistema de refrigeração de transformadores de distribuição realizadas no capítulo 3, e por meio da metodologia de projeto apresentada neste capítulo, juntamente com a substituição do núcleo de aço-silício por núcleo de metal amorfo, é possível o desenvolvimento de um transformador mais eficiente, com redução das perdas totais, diminuição do número de aletas empregados no sistema de refrigeração, mantendo a temperatura de operação do transformador dentro dos limites estipulados por norma. A Figura 4.22 apresenta o transformador com núcleo de aço-silício e sistema de refrigeração anterior ao estudo de melhora da eficiência. Já a Figura 4.23 mostra o transformador com núcleo de metal amorfo e sistema de refrigeração eficiente.

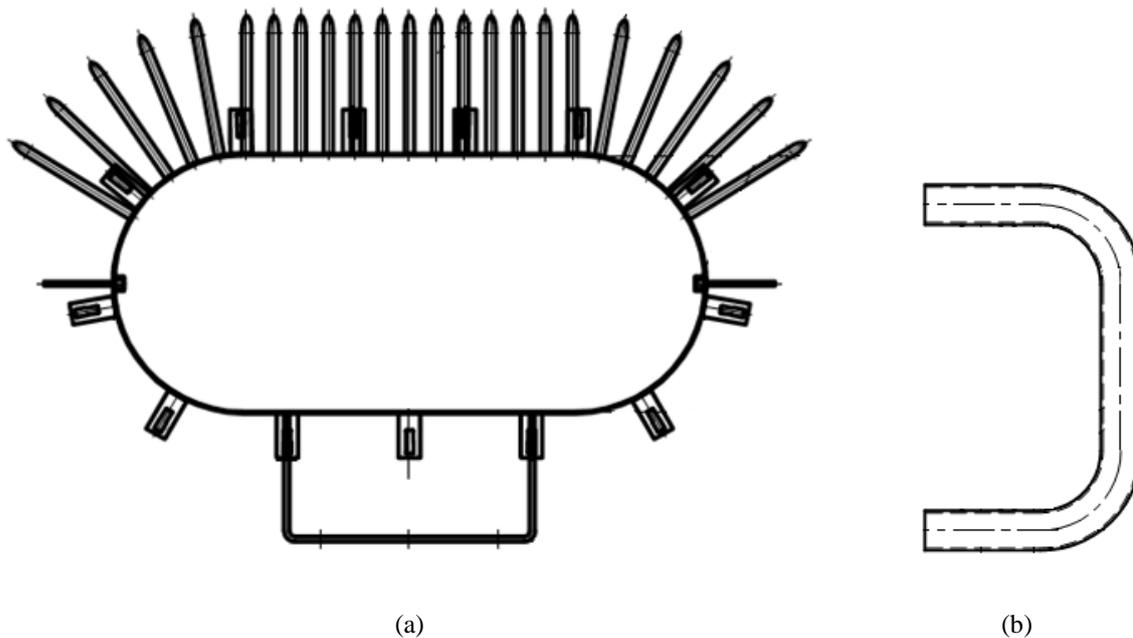


Figura 4.22 – Transformador com sistema de refrigeração anterior ao estudo de eficiência. (a) Visão superior. (b) Formato aleta

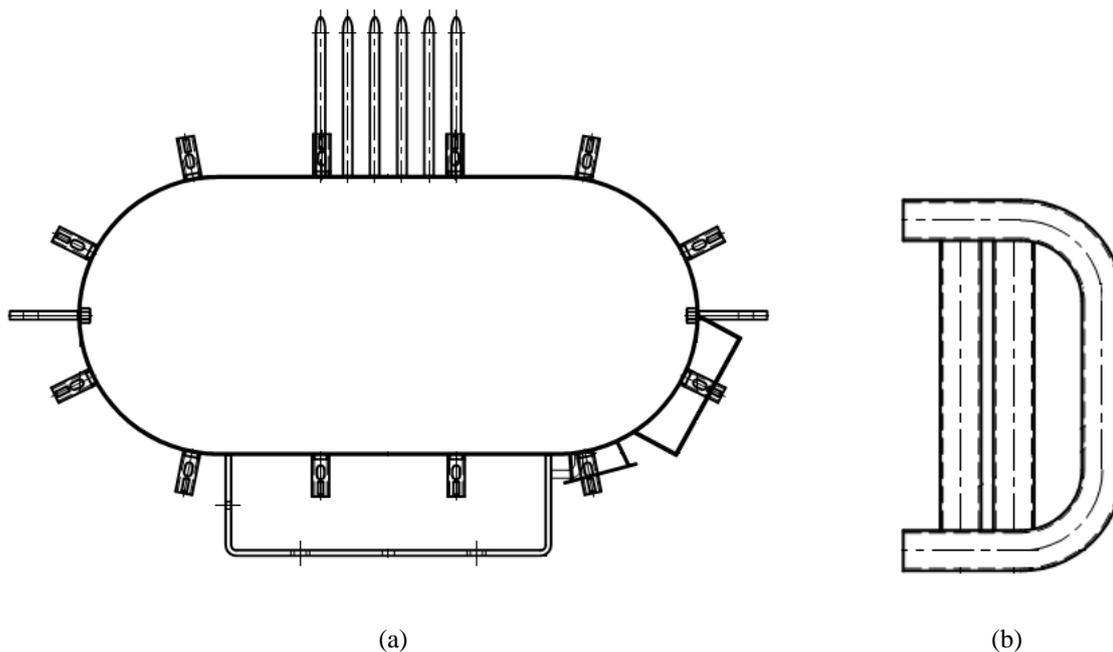


Figura 4.23 – Transformador com sistema de refrigeração eficiente. (a) Visão superior. (b) Formato aleta

Analisando a Figura 4.22 e a Figura 4.23, nota-se uma redução de 17 aletas no sistema de refrigeração. Essa redução, por sua vez, acarreta em uma redução na massa total do sistema de refrigeração. Além disso, apesar de haver um aumento no volume total do transformador, tem-se uma redução considerável nas perdas totais deste equipamento, acarretando, dessa forma, em uma redução significativa na relação entre perdas e peso.

4.5. Conclusão

Neste capítulo foi proposta uma metodologia de projeto para melhoria de desempenho de transformadores de distribuição, por meio da redução de perdas nestes equipamentos, além de apresentar uma metodologia de cálculo de projeto de transformadores de distribuição. Simulações de perdas em elementos finitos no software Maxwell, para a comprovação de resultados, também foram realizadas.

Com o objetivo de analisar a influência nas perdas a vazio e perdas totais em transformadores de distribuição, devido a utilização de metal amorfo no núcleo destes equipamentos, uma análise do comportamento de perdas e para transformadores com estas características, foi apresentada neste capítulo.

A partir das simulações térmicas de configurações de radiadores para sistema de refrigeração de transformadores de distribuição e por meio da metodologia de projeto apresentada neste capítulo, juntamente com a substituição do núcleo de aço-silício por núcleo de metal amorfo, é possível o desenvolvimento de um transformador mais eficiente, com uma redução de aproximadamente 31% na massa total do sistema de refrigeração (aletas). Apesar de a massa total do transformador ter tido um acréscimo de cerca de 23%, devido à substituição do núcleo de aço-silício pelo núcleo de metal amorfo, fator que aumenta o volume do equipamento em aproximadamente 33%, foi possível diminuir as perdas a vazio em aproximadamente 169,3 W, ou seja, uma redução de 74,58%, que por consequência, acarreta em uma redução de cerca de 20% nas perdas totais do transformador, devido a substituição do aço-silício pelo metal amorfo, associada com a metodologia de projeto apresentada neste capítulo. Dessa forma, tem-se uma redução de 34,71% na relação entre perdas e peso.

CAPÍTULO 5

ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

5.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar o ensaio de elevação de temperatura de um transformador de distribuição, empregando núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante, projetado a partir da metodologia proposta no capítulo 4. Neste capítulo é realizada a comparação dos valores obtidos no ensaio de elevação de temperatura realizado, com os valores enviados pela empresa Romagnole. Resultados de simulação em elementos finitos são apresentados, com o objetivo de comparação dos resultados obtidos no ensaio de elevação de temperatura realizado, e comprovação do uso do método de elementos finitos em simulações térmicas de transformadores.

5.2. Resultados Experimentais

Segundo a (ABNT NBR 5356-2, 2007), o método para determinação de elevação de temperatura em regime permanente de transformadores imersos em óleo, é o método de curto-circuito. Este ensaio tem como objetivo: estabelecer a elevação de temperatura do topo do óleo em regime permanente com dissipação das perdas totais, bem como estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos à corrente nominal com a elevação de temperatura do topo do óleo. O procedimento de execução do ensaio de elevação de temperatura é descrito na (ABNT NBR 5356-2, 2007).

O ensaio de elevação de temperatura é efetuado em um transformador de distribuição trifásico, com potência de 75 kVA, núcleo de metal amorfo, óleo vegetal isolante e enrolamentos de alumínio, já descrito anteriormente e mostrado na Figura 5.1. O setup necessário para a realização do ensaio de elevação de temperatura pode ser visualizado na Figura 5.2.



Figura 5.1 – Transformador submetido ao ensaio de elevação de temperatura.



Figura 5.2 – Setup para realização do ensaio de elevação de temperatura.

Durante este tipo de ensaio, o transformador é submetido às perdas totais calculadas, previamente obtidas pela determinação das perdas em carga à temperatura de referência e das perdas em vazio. A Figura 5.3 apresenta a curva da variação de perdas totais aplicadas ao

transformador, durante o ensaio de elevação de temperatura. A medição das perdas totais aplicadas foi realizada por meio de um *Power Meter CW240 Clamp-On Yokogawa*.

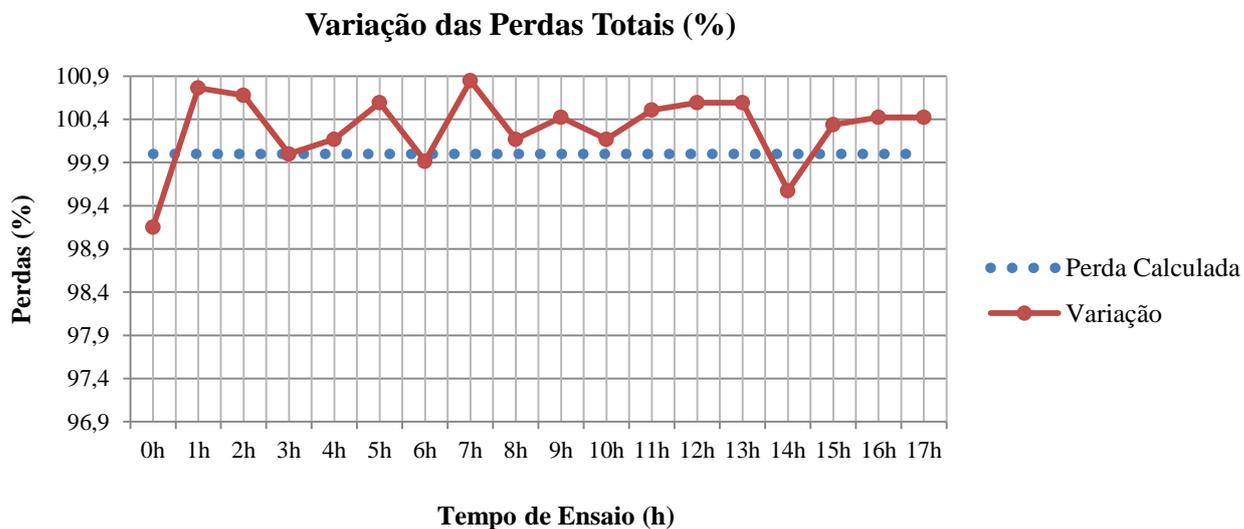


Figura 5.3 – Variação das perdas totais.

Durante o ensaio são monitoradas a temperatura ambiente e a temperatura de topo de óleo, através de termômetros instalados no entorno do transformador e no poço do mesmo, respectivamente. A partir dessas medições de temperatura, é obtido o gradiente de temperatura do óleo, ou seja, a elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura média ambiente. A Figura 5.4 mostra a temperatura média ambiente, a temperatura de topo de óleo e a elevação de temperatura do óleo.

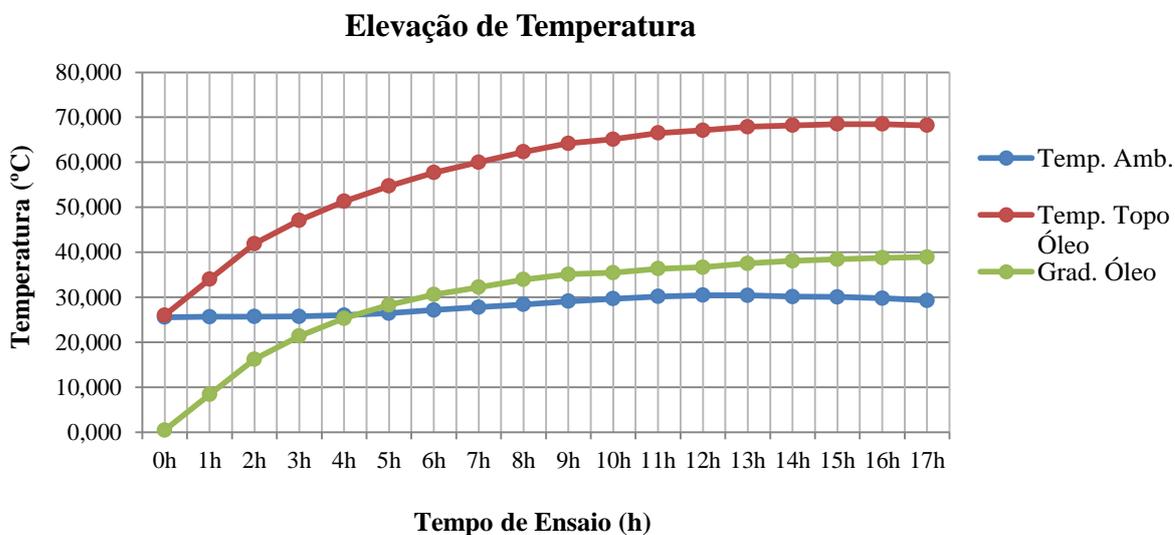


Figura 5.4 – Elevação de temperatura.

Analisando os dados obtidos no ensaio e as curvas da Figura 5.4, observa-se que a taxa de variação da elevação da temperatura do topo do óleo é menor que 1°C durante as últimas três horas, conforme determina a ABNT NBR 5356-2. Dessa forma, para o ponto final de ensaio, a temperatura média ambiente verificada foi de $29,2^{\circ}\text{C}$ e a temperatura de topo de óleo foi de $68,2^{\circ}\text{C}$. Assim, o gradiente do óleo foi de $38,93^{\circ}\text{C}$.

A Figura 5.5 apresenta as curvas do ensaio de elevação de temperatura realizado pela empresa Romagnole.

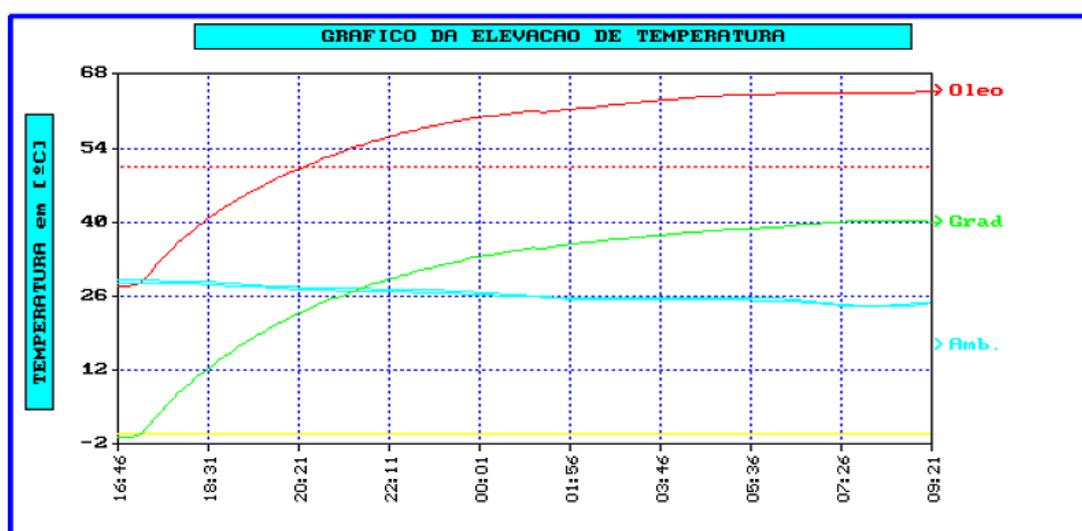
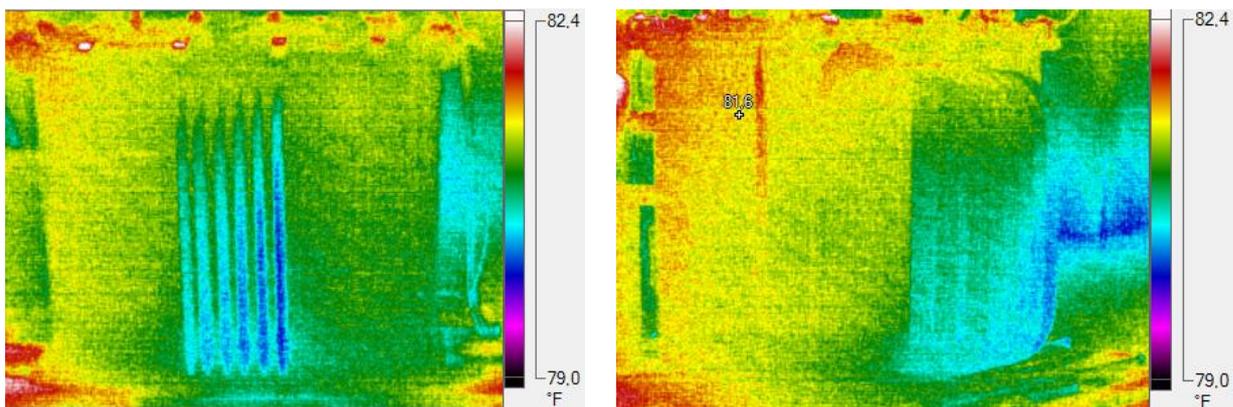


Figura 5.5 – Ensaio de elevação de temperatura realizado pela Romagnole.

Através da Figura 5.4 e Figura 5.5, nota-se que, o comportamento do óleo durante os ensaios de elevação de temperatura, foi semelhante. Apesar de haver uma discrepância na temperatura de topo de óleo atingida nos dois ensaios, uma diferença de $3,88^{\circ}\text{C}$ (erro de aproximadamente 6%), devido a diferença na temperatura média ambiente, o gradiente de temperatura foi semelhante para ambos, com um erro de aproximadamente 2,2%.

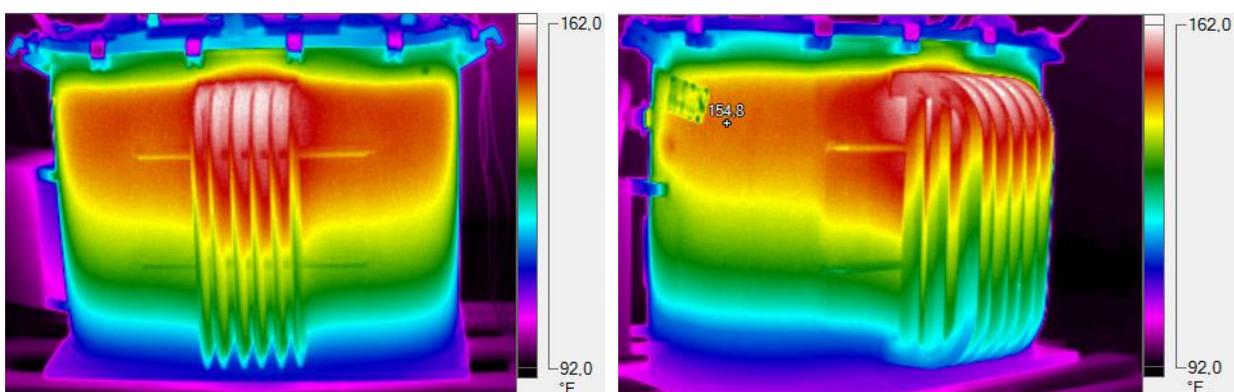
Imagens térmicas realizadas durante o ensaio de elevação de temperatura são mostradas na Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8, para o início, meio e fim do ensaio, respectivamente. As imagens térmicas foram efetuadas a cada hora de ensaio, por uma câmera térmica *Fluke TI32*. O valor da temperatura de topo de óleo para cada imagem está indicado na figura “visão lateral”. As imagens térmicas foram realizadas para um valor de emissividade igual a 0,95.



(a)

(b)

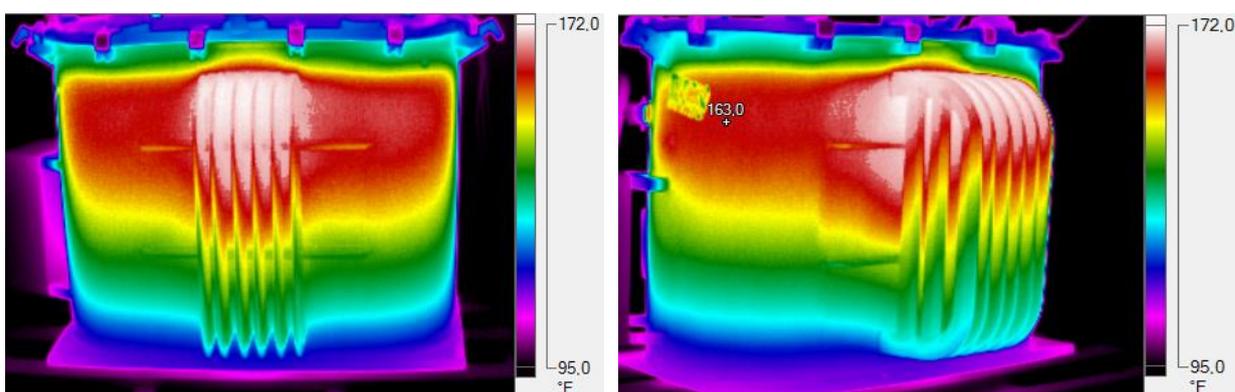
Figura 5.6 – Imagem térmica no início do ensaio. (a) visão frontal. (b) visão lateral.



(a)

(b)

Figura 5.7 – Imagem térmica após 9h de ensaio. (a) visão frontal. (b) visão lateral.



(a)

(b)

Figura 5.8 – Imagem térmica após 17h de ensaio. (a) visão frontal. (b) visão lateral.

Os valores de temperatura das imagens térmicas estão expressos em °F. Para a conversão para °C deve-se utilizar a equação (5.1).

$$\frac{T_C}{5} = \frac{T_F - 32}{9} \quad (5.1)$$

Onde:

T_C = temperatura em °C;

T_F = temperatura em °F.

A Tabela 5.1 apresenta uma síntese e comparação, da temperatura de topo de óleo durante o ensaio, entre os valores medidos através de um termômetro digital e os valores obtidos nas imagens térmicas.

Tabela 5.1 – Comparação da temperatura de topo de óleo medida entre termômetro e imagem térmica

Tempo de ensaio (h)	Temp. Topo Óleo Termômetro (°C)	Temp. Topo Óleo Imagem Térmica (°C)	Diferença Absoluta (%)
0h	26,0	27,56	6,00
1h	34,0	36,89	8,50
2h	41,9	45,11	7,66
3h	47,1	49,56	5,22
4h	51,3	53,78	4,83
5h	54,7	58,17	6,34
6h	57,7	61,72	6,96
7h	60,0	63,67	6,11
8h	62,3	66,44	6,64
9h	64,2	68,11	6,26
10h	65,1	69,67	7,02
11h	66,5	71,11	6,93
12h	67,1	71,22	6,14
13h	67,9	71,94	5,95
14h	68,2	72,33	6,05
15h	68,5	72,61	6,00
16h	68,5	72,67	6,08
17h	68,2	72,78	6,71

Observa-se, a partir da Tabela 5.1, que os valores da temperatura de topo de óleo, para ambos os métodos de medição utilizados, são similares, não ultrapassando um erro absoluto máximo de 8,50%.

Apesar de o objetivo deste trabalho não ser o desenvolvimento de um sistema de medição de temperatura e transmissão via *GPRS (General Packet Radio Services)*, a Figura 5.9 apresenta a curva da temperatura de topo de óleo, obtida através de um termômetro digital *Fluke 51-II* e através de um sistema de medição e transmissão de dados via *GPRS*, medidas realizadas durante o ensaio de elevação de temperatura do transformador.

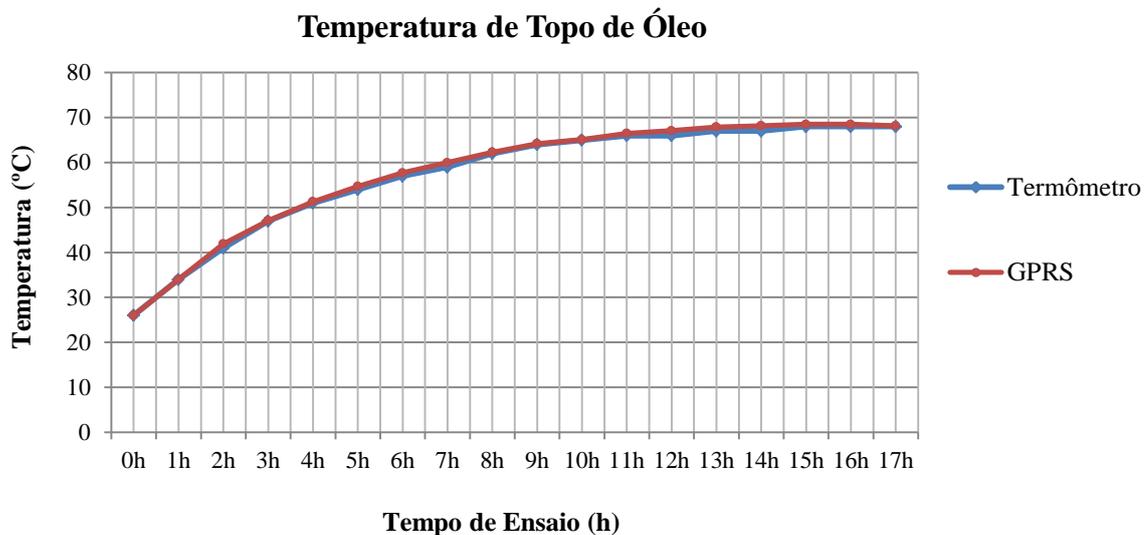


Figura 5.9 – Temperatura de topo de óleo medida através de termômetro e via GPRS.

Observa-se, a partir da Figura 5.9, que a temperatura de topo de óleo, para ambos os métodos de medição, é praticamente a mesma para todos os pontos, não ultrapassando um erro de 1,8% entre os métodos de medição.

Com o objetivo de comparação dos resultados obtidos no ensaio de elevação de temperatura e simulações em elementos finitos, a Figura 5.10 apresenta a temperatura externa do transformador analisado.

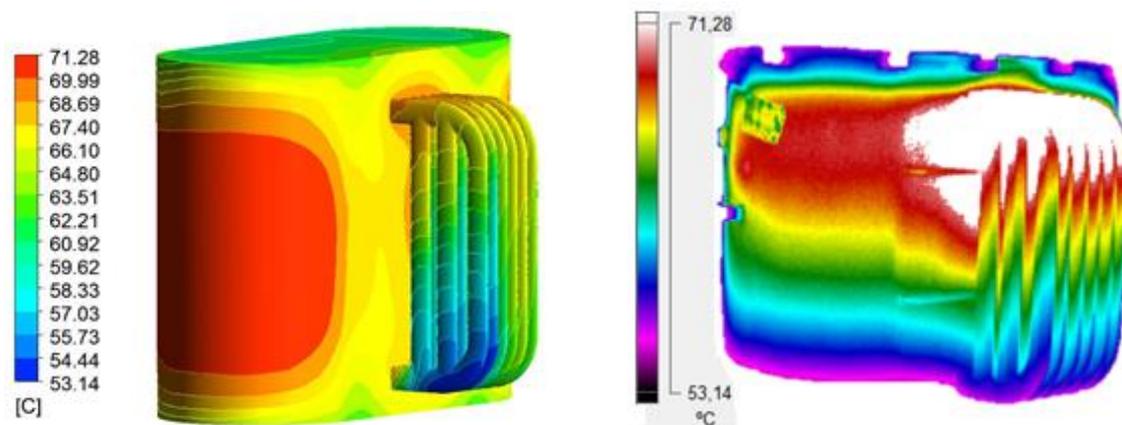


Figura 5.10 – Temperatura externa do transformador. (a) simulação elementos finitos. (b) imagem térmica.

Observa-se, a partir da Figura 5.10, que a temperatura externa do transformador obtida, tanto por meio de simulação quanto por meio de imagem térmica, apresenta certa similaridade entre os dois métodos de obtenção. Apesar da diferença no valor da temperatura

e na coloração das imagens, pode-se observar em ambas as imagens, os pontos mais quentes e mais frios do transformador.

5.3. Conclusão

Este capítulo apresentou o ensaio de elevação de temperatura de um transformador de distribuição, empregando núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante, projetado a partir da metodologia proposta no capítulo 4 e das simulações térmicas de configurações de radiadores para sistema de refrigeração de transformadores de distribuição realizadas no capítulo 3.

Foi realizada uma comparação dos valores obtidos no ensaio de elevação de temperatura efetuado, com os valores enviados pela Romagnole, obtendo uma similaridade nos resultados. Uma comparação da temperatura de topo de óleo, obtida através de um termômetro digital Fluke 51-II e através de um sistema de medição e transmissão de dados via GPRS, também foi realizada.

Simulações em elementos finitos foram apresentadas, com o intuito de comparar com os resultados obtidos no ensaio de elevação de temperatura realizado, obtendo valores aproximados nos resultados entre os dois métodos.

CONCLUSÃO GERAL

A presente dissertação de mestrado apresentou o desenvolvimento de um transformador de distribuição de elevada eficiência e reduzida relação peso/potência, por meio da utilização de núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante. Com isso, foi obtida uma redução de aproximadamente 75% nas perdas a vazio, o que acarreta em uma redução de cerca de 20% nas perdas totais do transformador, levando a um aumento de aproximadamente 0,42% na eficiência deste equipamento. Além disso, obteve-se uma redução de cerca de 31% na massa total das aletas do sistema de refrigeração.

Para tanto, foi realizada uma contextualização sobre perdas e geração de calor nos mesmos, bem como a influência da temperatura nestes dispositivos. Também foi apresentada uma descrição sobre o Método de Elementos Finitos, utilizado em simulações térmicas e elétricas.

Uma metodologia de projeto para transformadores de distribuição, por meio da redução de perdas, é proposta com o objetivo de fornecer ao projetista indicativos para maximizar o desempenho destes dispositivos elétricos. A metodologia considera, além do comportamento das perdas destes equipamentos diante a variação de parâmetros de projeto, a substituição dos convencionais núcleos de aço-silício, por metal amorfo, reduzindo assim significativamente as perdas nos transformadores. Uma vez que essa redução de perdas, além de reduzir desperdícios de energia, ela possibilita também à diminuição da geração de calor na parte ativa dos transformadores, podendo levar a um aumento de vida útil destes dispositivos.

Simulações térmicas, em elementos finitos, de geometrias de radiadores para sistemas de refrigeração de transformadores, com o propósito de analisar a eficiência de refrigeração destes sistemas, e com isso desenvolver sistemas de refrigeração mais eficientes, com a finalidade de melhorar a dissipação de calor gerado pela parte ativa destes equipamentos, podendo, dessa forma, aumentar a vida útil dos mesmos, foram realizadas.

Desta forma, é possível fazer uma combinação entre projetos elétricos de transformadores de distribuição otimizados com um sistema de refrigeração mais eficiente, a fim de reduzir as perdas na parte ativa, bem como diminuir a temperatura de operação destes equipamentos, promovendo, assim, um aumento de vida útil destes dispositivos.

Ainda, foi realizado um ensaio de elevação de temperatura de um transformador de distribuição, empregando núcleo de metal amorfo e óleo vegetal isolante, projetado a partir da metodologia de projeto proposta e das simulações computacionais de dinâmica dos fluidos, com o intuito de comprovar os resultados obtidos.

Conclui-se que o trabalho desenvolvido apresenta uma boa contribuição ao desenvolvimento de transformadores de distribuição mais eficientes, pois realiza uma integração entre projeto elétrico e melhoria do desempenho do sistema de refrigeração com o objetivo final de melhorar a eficiência destes dispositivos elétricos e, por consequência, aumentar o índice de rendimento de um sistema de distribuição de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15422. **ABNT NBR 15422: 2006 Óleo Vegetal Isolante para Equipamento Elétricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 8. 2006.

ABNT NBR 5161. **ABNT NBR 5161: 1977 Produtos Laminados Planos de Aço para fins Elétricos - Verificação das Propriedades**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 35. 1977.

ABNT NBR 5356-1. **ABNT NBR 5356-1: 2007 Transformadores de Potência - Parte1: Generalidades**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 103. 2007.

ABNT NBR 5356-2. **ABNT NBR 5356-2: 2007 Transformadores de Potência - Parte 2: Aquecimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 27. 2007.

ABNT NBR 5356-3. **ABNT NBR 5356-3: 2007 Transformadores de Potência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 50. 2007.

ABNT NBR 5416. **ABNT NBR 5416: 1997 Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 91. 1997.

ABNT NBR 5440. **ABNT NBR 5440: 2014 Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 52. 2014.

ALVES, L. M. **Método dos Elementos Finitos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba , p. 438. 2007.

AMANULLAH, M. et al. **Analyses of Physical Characteristics of Vegetable oils as an Alternative Source to Mineral Oil-based Dielectric Fluid**. IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). p. 397-400. 2005.

AMANULLAH, M. et al. **Evaluation of Several Techniques and Additives to Demisturise Vegetable Oils and Bench Mark the Moisture Content Level of Vegetable Oil-based Dielectric Fluids**. IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). p. 1-4. 2008.

ANSYS. **User's Guide - Maxwell 3D**. Canonsburg, p. 1006. 2010.

ANSYS. **ANSYS - Customer Portal. Support Ansys**, 2014. Disponível em: <<https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal>>. Acesso: 17 Dezembro 2014.

ARANTES, J. G. **Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência pela Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante Através de Redes Neurais**. 2005. p. 115. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

BARBOSA, S. R. **Estudos dos Efeitos da Sobretensão em Transformadores de Potência Aliada a Carregamentos Acima da Potência Nominal**. 2005. p. 127. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BECHARA, R. **Análise de Falhas em Transformadores de Potência**. 2010. p. 118. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

COSTA, M. A. et al. **Monitoração e Diagnóstico On-line de Transformador de Potência com Óleo Vegetal**. XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 2009.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2^a ed. New Jersey: IEEE, 2009.

ELIASSON, A.; ELVFING, H.; RAMANAN, V. R. **Amorphous Metal Core Material Shows Economic and Environmental Benefits when Pre-existing Transformers are to be Replaced within Vattenfall Group's Distribution Network**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). p. 1-7. 2010.

FILHO, F. D. A. **Avaliação da Formação e Migração do Sulfeto de Cobre em Papel Isolante Utilizado em Equipamentos Elétricos**. 2008. p. 115. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. Florida: CRC Press, 2004.

HASEGAWA, R.; PRUESS, D. C. **Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution**. Power Engineering Society Summer Meeting. p. 1820-1823. 2001.

IARONKA, O. **Desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração de Elevada Eficiência com o Método de Elementos Finitos para Transformadores de Distribuição**. 2014. p. 96. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

IEC 60076-1. **IEC 60076-1: 2000: Power Transformers Part 1: General.** IEC International Electrotechnical Commission. 2000.

IEC 60076-2. **IEC 60076-2: 1993: Power Transformers Part 2: Temperature Rise.** IEC International Electrotechnical Commission. 1993.

IEEE C57.91-1995. **IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers.** Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 113. 2012.

IEEE C57.92-1981. **Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Up to and Including 100 MVA with 55 deg C or 65 deg C Winding Rise.** Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1996.

ISLAM, M. A. **Prospective Analysis of Energy Efficient Amorphous Metal Distribution Transformer (AMDT).** Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). p. 1-4. 2012.

JORDÃO, R. G. **Transformadores.** 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2002.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering Design and Practise.** New York: Marcel Dekker, 2004.

LEOPOLDINO, R. **Estudos sobre Gases Dissolvidos em Óleos Vegetais Isolantes - Influência de Arco Elétrico e Superaquecimento.** 2011. p.89. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

LOTTI, R. S. et al. **Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos.** Maringá. p. 35-43. 2006.

MAURÍCIO, A. F. D. S. **Construção e Caracterização de um Transformador de 562,5 VA com Núcleo de Ferro Amorfo.** 2014. p.95. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

MCLYMAN, C. W. T. **Transformer and Inductor Design Handbook.** 3ª ed. New York: Marcel Dekker, 2004.

MCSHANE, C. P. et al. **Aging of Kraft Paper in Natural Ester Dielectric Fluid.** 14th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). p. 173-177. 2002.

MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante.** São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1984.

MONIZ, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição.** 2007. p. 177. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

MORAIS, D. R. **Ferramenta Inteligente para a Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante.** 2004. p.

112. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NOGUEIRA, D. D. S.; ALVES, D. P. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais**. 2009. p. 212. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NUNES, A. A. **Uma Contribuição para Projeto de Transformadores Monofásicos de Média Tensão**. 2011. p. 118. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

OLIVARES-GALVÁN, J. C. et al. **Selection of Copper Against Aluminium Windings for Distribution Transformers**. IET Electric Power Applications. p. 474-485. 2010.

PICANÇO, A. F. **Avaliação Econômica de Transformadores de Distribuição com Base no Carregamento e Eficiência Energética**. 2006. p. 156. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

PORTELLA, M. D. G. **Avaliação da Presença de Indicadores de Oxidação do Papel Isolante Termoestabilizado em Equipamentos de Subestação**. 2010. p. 123. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PRONTO, A. M. G. **Análise de Perdas em Sistemas de Energia que Empregam Materiais Supercondutores de Alta Temperatura**. 2010. p. 159. Dissertação (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

RESENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

RIES, W. **Transformadores - Fundamentos para Projeto e Cálculo**. 1ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A. Romagnole. **Romagnole**, 2014. Disponível em: <<http://www.romagnole.com.br/catalogo.php?categoria=transformadores>>. Acesso em: 19 Agosto 2014.

ROSENTINO, A. J. P. J. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico**. 2010. p. 200. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para Redes de Média Tensão**. 2012. p. 118. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SÁNCHEZ, C. A. A. **Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análise Não Linear**. 2001. p. 143. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SCHMIDT, W. **Materiais Elétricos - Isolantes e Magnéticos**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, v.2, 1979.

SHOCKMETAIS. **Acompanhamento - LME (London Metal Exchange) e Dólar. Shock Metais**, 2014. Disponível em: <<http://www.shockmetais.com.br>>. Acesso em: 15 Setembro 2014.

SILVA, F. L. **Modelagem de Transformadores Trifásicos de Distribuição para Estudos de Fluxo de Potência**. 2004. p. 99. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.

SILVA, S. R. et al. **Caracterização de Transformadores com Núcleo de Metal Amorfo para Aplicação em Redes Monofásicas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1º Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica - CITENEL. Brasília: 2001.

SOLTANZADEH, K.; TAVAKOLI, A.; ARBAB, P. B. **Effects of Amorphous Core Distribution Transformers in Improvement the Functioning of the Electricity Distribution System**. Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC). p. 1-7. 2012.

SOUZA, L. M. D. **Inteligência Computacional Aplicada à Modelagem Térmica e Avaliação da Vida Útil de Transformadores de Distribuição**. 2011. p. 146. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SOUZA, R. M. D. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 40. 2003.

STEINMETZ, T.; CRANGANU-CRETU, B.; SMAJIC, J. **Investigations of No-Load and Load Losses in Amorphous Core Dry-Type Transformers**. XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM). p. 1-6. 2010.

STOCCO, M. B. C. **Avaliação do Potencial de Aplicação de Óleos Vegetais como Fluidos Isolantes em Transformadores de Distribuição da Rede Elétrica**. 2009. p. 129. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

TAMURA, L. F. **Determinação de Parâmetros do circuito Equivalente Térmico de Transformadores de Potência por Meio de Técnicas de Otimização**. 2009. p. 129.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

UHREN, W. **Aplicação de Óleo Vegetal como Meio Isolante em Equipamentos Elétricos, em Substituição ao Óleo Mineral**. 2007. p. 142. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

VIENA, L. B. **Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferrorresonância**. 2010. p. 167. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. Produção e Uso de Óleos Vegetais Isolantes no Setor Elétrico. **Brasil Engenharia**, São Paulo, p. 120-124, 2009.

WINDERS, J. J. J. **Power Transformers Principles and Applications**. New York: Marcel Dekker, 2002.

APÊNDICE A

TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

A.1. Introdução

O transformador é um equipamento estático, que por indução eletromagnética, transforma tensão e correntes alternadas entre dois ou mais enrolamentos, em valores diferentes de tensão e corrente, sem a mudança da frequência (IEC 60076-1, 2000).

O transformador é um equipamento de grande importância no sistema elétrico de potência, uma vez que tem a função de reduzir ou elevar o nível de tensão, viabilizando, assim, a transmissão e o fornecimento de energia elétrica (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011). Dessa forma, o transformador ocupa posições estratégicas ao longo do sistema elétrico de potência, sendo responsável pela interconexão dos circuitos em vários níveis de tensão (VIENA, 2010).

Estes equipamentos possuem grande importância nos sistemas de transmissão, onde a energia deve ser transmitida por grandes distâncias. Assim, o nível de tensão é elevado através do transformador, a fim de minimizar as perdas nas redes de transmissão.

De forma mais específica, os transformadores de distribuição, foco deste estudo, tem a função de rebaixar a tensão para níveis de utilização do consumidor final. Devido os transformadores de distribuição representarem um dos últimos estágios para que a energia possa ser utilizada pelos consumidores, a confiabilidade é uma obrigatoriedade destes equipamentos (IARONKA, 2014). A Figura A.1 apresenta a visão geral de um transformador de distribuição trifásico.

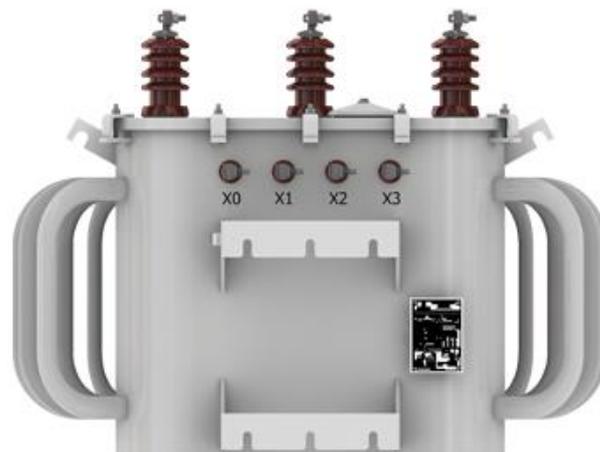


Figura A.1 – Transformador de distribuição trifásico (ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A, 2014).

Dessa forma, este capítulo tem como objetivo fazer a contextualização do princípio de funcionamento de um transformador, bem como elucidar os principais aspectos e componentes construtivos deste equipamento.

A.2. Princípio de Funcionamento

O funcionamento do transformador se baseia no acoplamento eletromagnético entre duas bobinas, por meio de um circuito magnético que pode ser o ar ou um material ferromagnético, com o propósito de aumentar este acoplamento. O transformador é constituído, fundamentalmente, por uma bobina primária que recebe a energia em uma determinada tensão e corrente elétrica, e uma bobina secundária pela qual esta energia, com tensão e corrente elétrica diferentes, é transferida a uma carga (RIES, 2007). O circuito eletromagnético de um transformador monofásico é mostrado na Figura A.2.

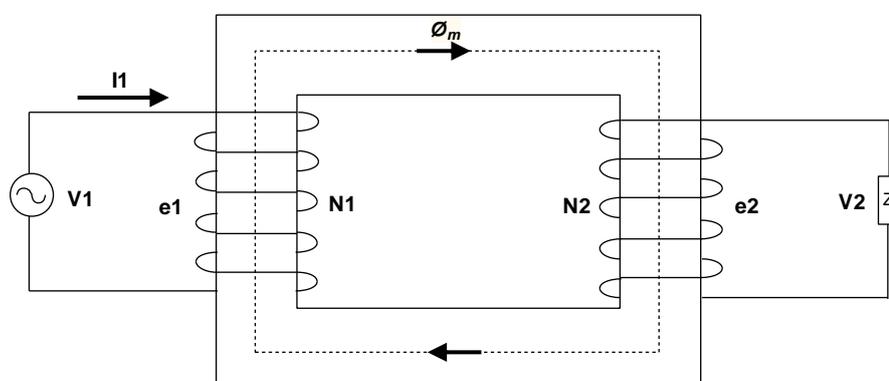


Figura A.2 - Circuito eletromagnético de um transformador (Adaptado de: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004)).

Ao aplicar uma tensão alternada U_1 nas extremidades do enrolamento primário do transformador, surge a circulação de uma corrente alternada I_1 , ocasionando a magnetização alternada do núcleo, formando, assim, uma fonte de fluxo mutuo ϕ_m . A variação deste fluxo alternado, através do enrolamento primário, faz surgir uma força eletromotriz alternada e_1 neste enrolamento (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (NUNES, 2011), que pode ser descrita conforme a equação (A.1).

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

e_1 = tensão induzida no enrolamento primário (V);

N_1 = número de espiras do enrolamento primário;

ϕ_m = fluxo magnético mútuo (Weber).

Considerando que o enrolamento não apresente resistência, têm-se que a tensão aplicada aos terminais do enrolamento primário (U_1) é igual a força eletromotriz induzida neste enrolamento (e_1), conforme apresenta a equação (A.2) (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (NUNES, 2011).

$$U_1 = e_1 \quad (\text{A.2})$$

Como a tensão aplicada aos terminais do enrolamento primário varia sinusoidalmente, o fluxo mútuo também varia da mesma forma com a frequência, conforme é apresentado em (A.3) (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

$$\phi_m = \phi_{mp} \sin \omega t \quad (\text{A.3})$$

Onde:

ϕ_{mp} = valor de pico do fluxo magnético mútuo (weber);

$\omega = 2\pi f$ (rad/sec).

Desta forma, rearranjando as equações (A.1) e (A.3), a tensão induzida no enrolamento primário é dada pela equação (A.4), sendo que o valor eficaz (r.m.s) da tensão induzida neste enrolamento é dado pela equação (A.5).

$$e_1 = N_1 \phi_{mp} \cos \omega t \quad (\text{A.4})$$

$$E_1 = 4,44 \phi_{mp} f N_1 \quad (\text{A.5})$$

A variação do fluxo magnético mútuo ϕ_m no enrolamento secundário produz uma força eletromotriz alternada e_2 neste enrolamento. De forma análoga, a tensão induzida no enrolamento primário, a tensão induzida no enrolamento secundário e o valor eficaz desta tensão induzida, são descritas conforme as equações (A.6) e (A.7), respectivamente (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (NUNES, 2011).

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (\text{A.6})$$

$$E_2 = 4,44\phi_{mp} f N_2 \quad (\text{A.7})$$

Para o caso de um transformador ideal, a tensão aplicada nos terminais do enrolamento primário, relaciona-se com a tensão nos terminais do enrolamento secundário, pela relação do número de espiras dos respectivos enrolamentos, conforme a equação (A.8) (MONIZ, 2007). (NUNES, 2011)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{A.8})$$

Onde:

U_1 = tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento primário (V);

U_2 = tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento secundário (V);

e_1 = tensão induzida no enrolamento primário (V);

e_2 = tensão induzida no enrolamento secundário (V);

N_1 = número de espiras do enrolamento primário ;

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário .

A tensão aplicada nos terminais do enrolamento primário faz com que surja a corrente I_1 , que circula por este enrolamento dando origem ao fluxo magnético mútuo ϕ_m , que induz uma força eletromotriz e_2 , no enrolamento secundário. A força eletromotriz e_2 provoca, se existir carga conectada nos terminais do enrolamento secundário, a circulação da corrente I_2 neste enrolamento. A corrente I_2 , por sua vez, origina o fluxo magnético alternado, que se opõe ao fluxo ϕ_m , no sentido de reduzi-lo. Porém, esta redução é equilibrada por um fluxo de compensação originado pela passagem do fluxo magnético, oriundo do enrolamento secundário, pelo enrolamento primário. Desta forma, as correntes que circulam nos enrolamentos estão relacionadas com o número de espiras destes enrolamentos, de acordo com a equação (A.9) (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011).

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{A.9})$$

Onde:

I_1 = valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento primário (A);

I_2 = valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento secundário (A).

Assim, para um transformador ideal (sem resistência nos enrolamentos, sem fluxo de dispersão e sem perdas), a relação entre as tensões aplicadas nos enrolamentos primário e secundário, bem como as correntes que circulam por estes e seus respectivos números de espiras, é dada pela equação (A.10) (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{A.10})$$

A.3. Componentes Construtivos

A fase de construção e montagem de um transformador é uma das mais importantes, onde cada fabricante possui uma forma particular para a sua construção. Porém, os aspectos básicos são essencialmente os mesmos, o que permite definir um padrão construtivo (NOGUEIRA e ALVES, 2009)

As principais partes construtivas de um transformador de distribuição imerso em óleo isolante são a parte ativa, fluido isolante, tanque e sistema de refrigeração. A parte ativa é composta basicamente pelo núcleo e enrolamentos. Os enrolamentos têm a função de gerar o fluxo através da passagem da corrente. O núcleo tem a função de conduzir o fluxo gerado pelos enrolamentos, por um caminho de alta permeabilidade magnética, realizando o acoplamento magnético entre os enrolamentos. O tanque é responsável por conter o fluido isolante, que, por sua vez, tem a função de manter a temperatura de operação do transformador sem comprometer o isolamento elétrico. O sistema de refrigeração tem o papel de resfriar o fluido isolante que circula no transformador (IARONKA, 2014).

A.3.1. Enrolamentos

Os enrolamentos ou bobinas pertencem à parte ativa dos transformadores, onde sua função é prover a passagem de corrente elétrica, e podem ser considerados a parte mais

importante na concepção de um transformador, pois a vida útil deste equipamento esta diretamente relacionada com a vida útil dos seus enrolamentos. Deste modo, além da suportabilidade térmica e dielétrica, os enrolamentos devem suportar os esforços mecânicos, que podem ser causados por uma corrente de curto-circuito ou corrente de energização do transformador (IARONKA, 2014) (RIES, 2007) (ROSENTINO, 2010) (SALUSTIANO, 2012).

As bobinas consistem em condutores isolados, que podem ser de cobre ou alumínio, enrolados no núcleo do transformador, para assim criar o circuito eletromagnético (HARLOW, 2004) (NOGUEIRA e ALVES, 2009) (NUNES, 2011). Apesar do alumínio ser mais leve e barato que o cobre, a sua capacidade de condução de corrente é menor se comparado com um condutor de cobre de mesma seção (HARLOW, 2004) (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

Segundo (HARLOW, 2004), existem, fundamentalmente, quatro tipos de bobinas: tipo “panqueca”, em camadas, helicoidal e em disco.

O termo enrolamento tipo “panqueca” refere-se a uma bobina utilizada em núcleos do tipo envolvente, onde os condutores são enrolados em torno de um formato retangular, com a maior face do condutor orientada horizontal ou verticalmente (HARLOW, 2004). A Figura A.3 ilustra este tipo de enrolamento.



Figura A.3 – Enrolamento do tipo panqueca (HARLOW, 2004).

Nos enrolamentos em camadas, os condutores isolados são enrolados diretamente, um ao lado do outro, em torno de um cilindro e espaçadores. Neste tipo de enrolamento, várias camadas de condutores podem ser enroladas, uma em cima da outra, separadas por isolantes sólidos (HARLOW, 2004). O sentido do enrolamento do condutor se inverte, em cada

camada, do topo para a base e vice-versa, mantendo sempre um mesmo sentido (SALUSTIANO, 2012), conforme mostra a Figura A.4.

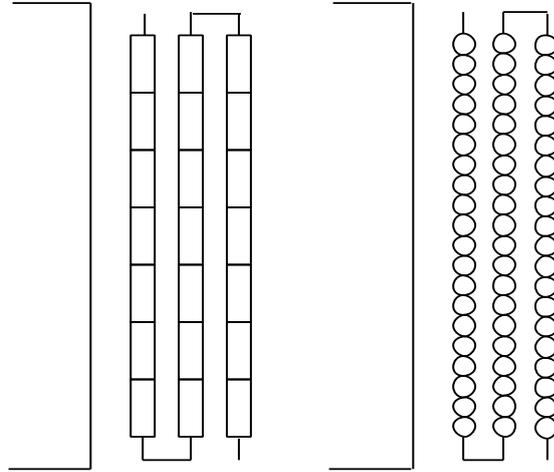


Figura A.4 – Enrolamento em camadas (Adaptado de: (SALUSTIANO, 2012)).

Geralmente, este tipo de enrolamento é empregado para bobinas de alta tensão e feito para uma grande gama de níveis de corrente (SALUSTIANO, 2012). A Figura A.5 mostra o processo de montagem de uma camada deste tipo de enrolamento.

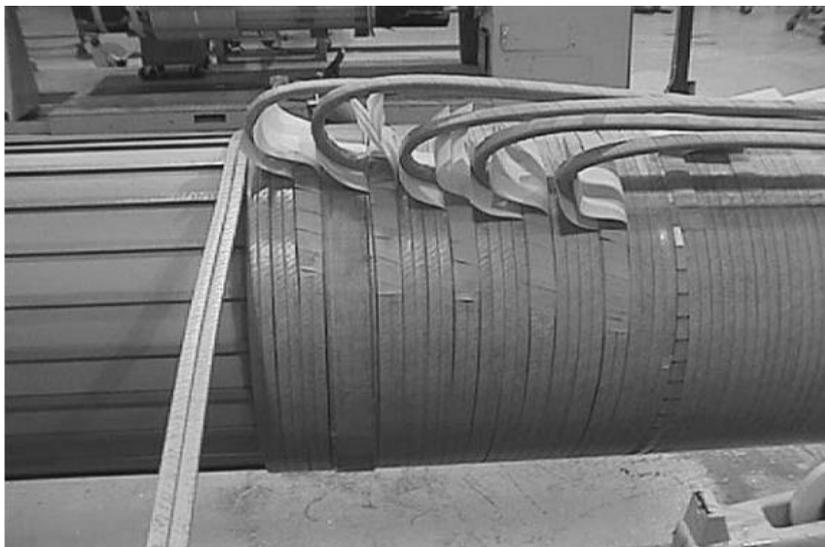


Figura A.5 – Enrolamento em camadas durante processo de montagem (HARLOW, 2004)

Segundo (SALUSTIANO, 2012), o condutor do enrolamento helicoidal é disposto em forma de espiral em uma única camada, sem sobreposição dos condutores, conforme mostra a Figura A.6.

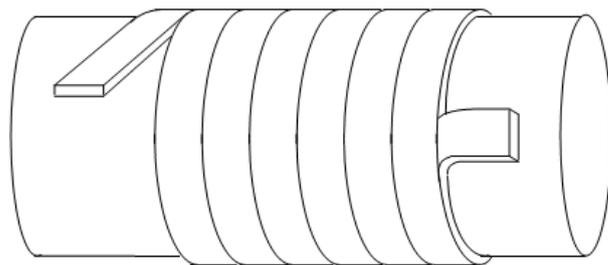


Figura A.6 – Enrolamento helicoidal (RIES, 2007).

Este tipo de enrolamento pode ser bobinado diretamente sobre um cilindro isolante ou ter espaçadores inseridos entre os enrolamentos adjacentes, a fim de minimizar as correntes que circulam entre os condutores e formar canais de óleo para a refrigeração (HARLOW, 2004) (SALUSTIANO, 2012). A Figura A.7 ilustra um enrolamento helicoidal durante o processo de montagem.

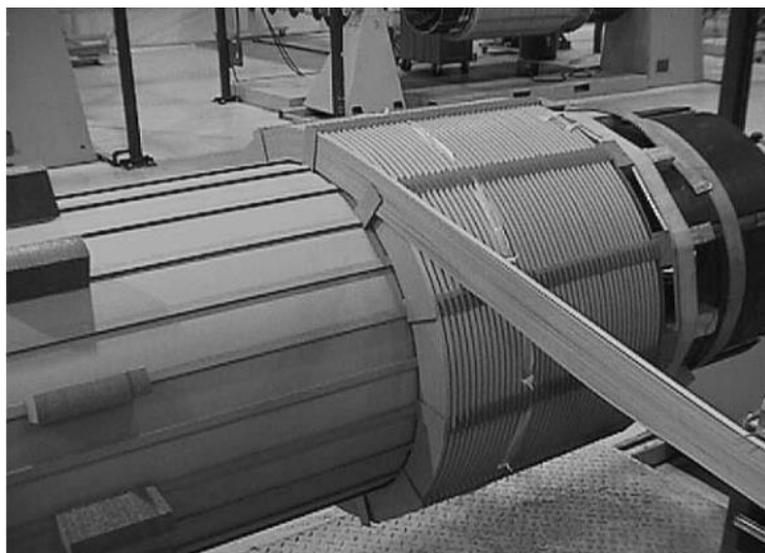


Figura A.7 – Enrolamento helicoidal durante processo de montagem (HARLOW, 2004).

O enrolamento do tipo disco é feito enrolando um certo número de discos (voltas), uma sobre a outra, de forma alternada de dentro para fora e de fora para dentro, sendo conectados em série (HARLOW, 2004) (SALUSTIANO, 2012), conforme mostra a Figura A.8.

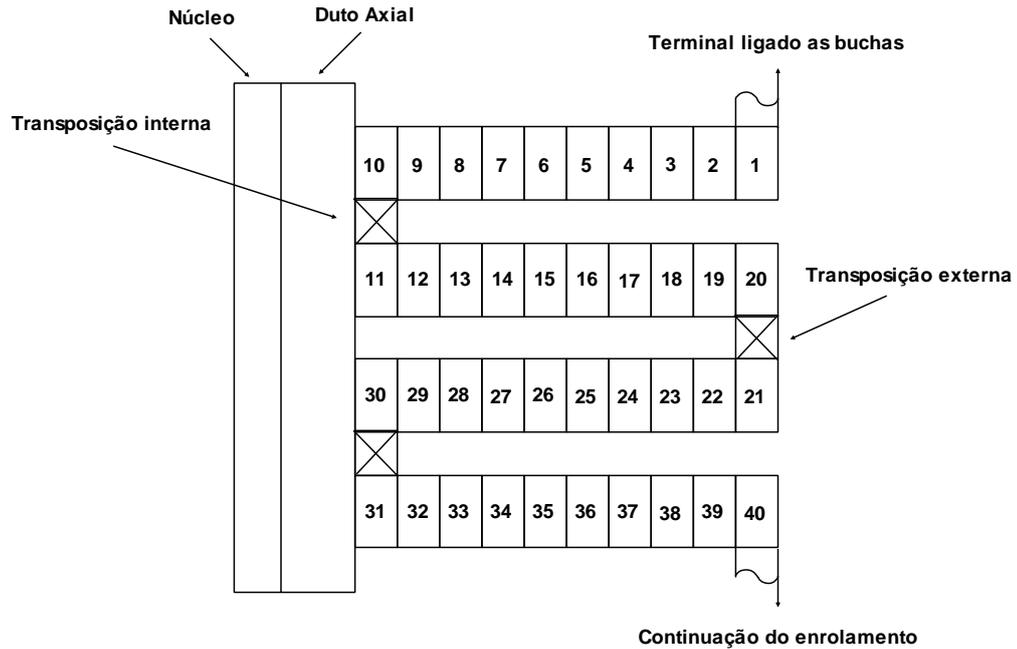


Figura A.8 – Esquema de ligação dos enrolamentos (Adaptado de: (HARLOW, 2004)).

Este tipo de enrolamento é empregado quando o enrolamento do tipo helicoidal torna-se economicamente inviável, devido o aumento da tensão e diminuição da corrente (SALUSTINO, 2012). A Figura A.9 mostra os típicos cruzamentos durante o processo de fabricação.

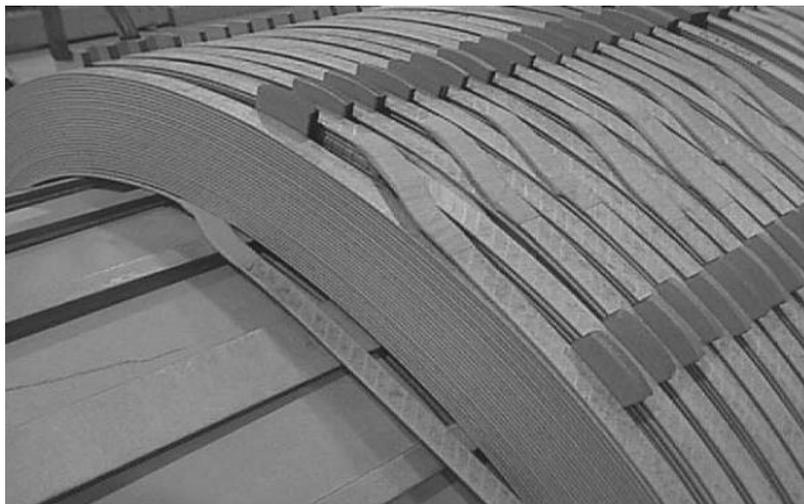


Figura A.9 – Enrolamento do tipo disco durante processo de montagem (HARLOW, 2004).

Segundo (RIES, 2007), a disposição das bobinas ou enrolamentos podem ser de duas formas: concêntricas ou intercaladas (discos ou “panquecas”).

Na forma concêntrica, os enrolamentos primário e secundário são montados concentricamente, ou seja, um sobre o outro, de forma centralizada (RIES, 2007) (SALUSTIANO, 2012), conforme mostra a Figura A.10.

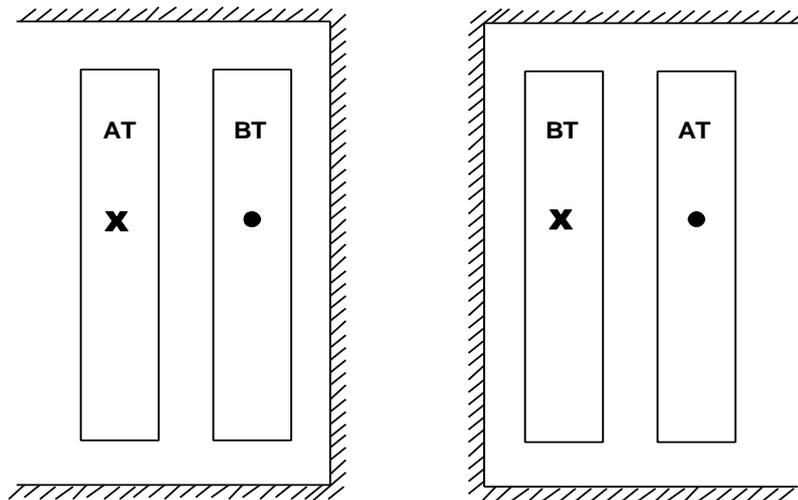


Figura A.10 – Enrolamentos concêntricos (Adaptado de: (RIES, 2007)).

Os enrolamentos intercalados são constituídos por bobinas dispostas uma sobre as outras, no sentido axial, intercalando-se bobinas de alta tensão e baixa tensão (RIES, 2007), conforme ilustra a Figura A.11.

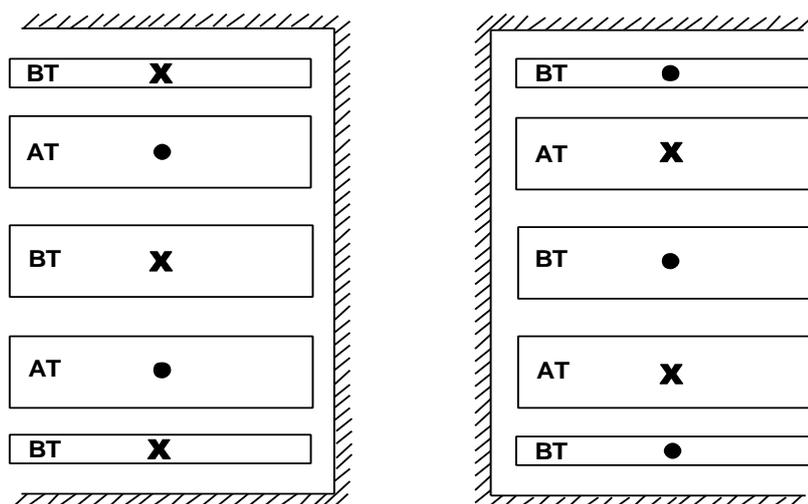


Figura A.11 – Enrolamentos intercalados (Adaptado de: (RIES, 2007)).

Diversos fatores devem ser levados em consideração na escolha da bobina, tais como: distribuição da tensão ao longo do enrolamento, perdas adicionais, rigidez mecânica (uma vez

que deve suportar curto circuitos), a disposição geométrica, a fim de facilitar a construção e a ligação das bobinas e por fim o custo de fabricação.

Quanto a seção do condutor dos enrolamentos, ela pode ser redonda ou retangular. A forma circular é usada, normalmente, até a seção de 8 mm², acima da qual é usada a forma retangular comum ou condutores em paralelo. O condutor da seção retangular deve sempre ser disposto de modo a reduzir as perdas parasitas. As bobinas podem ser construídas com um só condutor, até uma seção limite de aproximadamente 100 mm². Acima deste valor, são usados condutores em paralelo, devido a facilidade de montagem da bobina e com a finalidade de manter as perdas parasitas dentro dos limites aceitáveis. No entanto, com o uso de condutores em paralelo, é necessário fazer a transposição de cabos, com o propósito de garantir que todos tenham o mesmo comprimento final, e conseqüentemente, apresentem a mesma resistência ôhmica e a mesma reatância de dispersão (RIES, 2007). A transposição de condutores é mostrada na Figura A.12.



Figura A.12 – Transposição de condutores em paralelo (IARONKA, 2014).

Os condutores de seção circular, assim como os de seção retangular, são, em geral, isolados com papel e/ou esmalte. A espessura do isolamento depende das solicitações dielétricas nos enrolamentos decorrentes das sobretensões nos transformadores. Estes, quando em operação ou em ensaios em laboratórios, estão sujeitos a dois tipos de sobretensões: transitórias de chaveamento do sistema e de descargas atmosféricas e as sobretensões de curtos-circuitos no sistema e de perdas de carga do sistema. Em laboratório, estes tipos de sobretensões são reproduzidos por meio de ensaio de impulso de onda longa, ensaio de impulso normal de onda plena e de onda cortada e ensaio de tensão induzida e aplicada (RIES, 2007).

O nível de tensão para cada um dos ensaios supracitados é definido segundo a (ABNT NBR 5356-3, 2007) em função do nível de tensão do projeto do transformador. Deste modo, os condutores, bem como as demais partes sob tensão do transformador, devem ser isoladas de modo a suportarem as solicitações decorrentes dos ensaios mencionados (RIES, 2007).

A.3.3.1. Comparativo entre Cobre e Alumínio

O cobre e o alumínio são os dois materiais condutores mais utilizados pelo setor de equipamentos elétricos, devido a sua boa capacidade de condução de corrente elétrica (SALUSTIANO, 2012), sendo que, em transformadores, os enrolamentos são projetados e construídos com esses materiais (OLIVARES-GALVÁN, LEÓN, *et al.*, 2010).

A definição da utilização do cobre e do alumínio como materiais condutores, se deve principalmente ao custo de aquisição, uma vez que estes materiais possuem preços mais acessíveis e adequados para sua utilização pelo setor de energia elétrica, se comparados com outros materiais, como por exemplo, a prata (SALUSTIANO, 2012). No entanto, a escolha do material certo a ser empregado na construção dos enrolamentos de transformadores deve ser feita considerando vários fatores físicos, como, resistividade, tensão de ruptura e densidade, e não somente o custo de manufatura destes materiais, mas também, deve-se analisar como estes materiais se comportam durante os ensaios exigidos para a aprovação e liberação do transformador (OLIVARES-GALVÁN, LEÓN, *et al.*, 2010) (SALUSTIANO, 2012). A Tabela A.1 apresenta um comparativo de algumas das mais importantes características físicas do cobre e do alumínio.

Tabela A.1 – Características físicas do cobre e alumínio

Propriedades	Cobre	Alumínio
Resistividade a 20°C ($\Omega \cdot m$)	$1,72 \times 10^{-8}$	$2,83 \times 10^{-8}$
Coefficiente de Temperatura a 20°C ($^{\circ}C^{-1}$)	0,00393	0,00403
Temperatura ponto T ($^{\circ}C$)	234,5	228,1
Tensão de ruptura a 20°C (Kgf/mm ²)	23	4,9
Limite de escoamento – $\sigma=0,2\%$ (Kgf/mm ²)	7,0	1,3
Módulo de elasticidade (Kgf/mm ²)	12032	7030
Densidade (Kg/dm ³)	8,89	2,7
Coefficiente de expansão ($^{\circ}C^{-1}$)	$16,7 \times 10^{-6}$	$23,86 \times 10^{-6}$
Condutividade térmica (W/m°C)	398	210
Calor específico (J/Kg°C)	384,6	904
Ponto de fusão ($^{\circ}C$)	1085	660

Fonte: (SALUSTIANO, 2012)

Conforme mostra a Tabela A.1, enquanto a resistividade do cobre é cerca de 39% menor que a do alumínio, a densidade do alumínio é cerca de 70% menor que a do cobre, ou seja, o cobre é cerca de 3,3 vezes mais pesado que o alumínio. Outra característica importante é a tensão à ruptura, sendo que o cobre é cerca de 4,7 vezes mais resistente à ruptura que o alumínio. Além disso, o cobre conduz calor cerca de 1,9 vezes mais que o alumínio, ou seja, o cobre conduz 90% mais calor que o alumínio.

O grau de pureza dos materiais condutores é um fator que deve ser levado em consideração na sua manufatura, uma vez que esse fator determina a capacidade de condução destes materiais. O condutor de cobre utilizado em transformadores é composto por cobre eletrolítico com grau de pureza superior a 99,9%, sendo que pequenas quantidades de impurezas misturadas ao cobre podem degradar a resistividade do condutor. Já o alumínio, uma porcentagem menor que 0,5% de impurezas pode reduzir a capacidade de condução de corrente do alumínio em mais de 10% (SALUSTIANO, 2012).

A.3.1.1.1. Custo da Matéria Prima

Devido o cobre e o alumínio serem *commodities* (mercadorias), suas transações são realizadas nas principais bolsas de mercadorias internacionais ou com base nas cotações vigentes nesses mercados, fazendo com que estes produtos sofram variações diárias, o que pode afetar diretamente o preço final do transformador (SALUSTIANO, 2012). A variação do preço do cobre e do alumínio nos últimos quatro anos, segundo dados disponíveis no site da SHOCKMETAIS (SHOCKMETAIS, 2015), é mostrado no gráfico da Figura A.13.

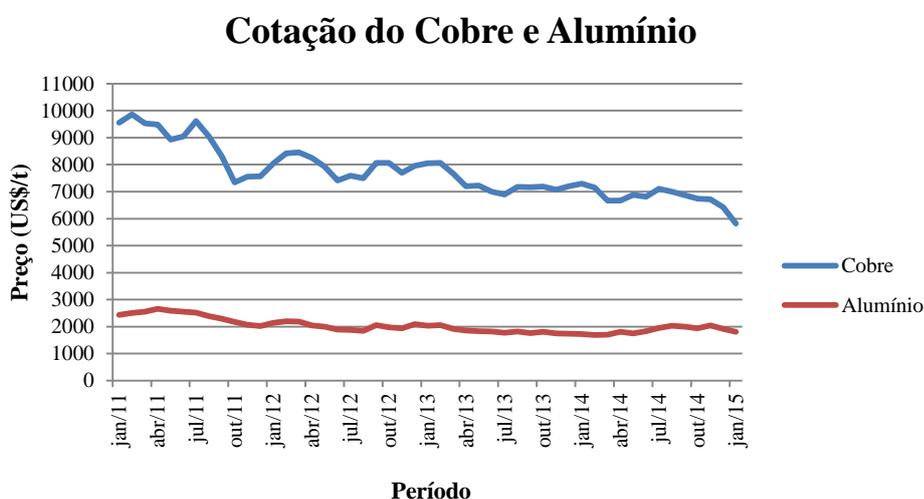


Figura A.13 – Histórico de cotação entre 2011 e 2014 para cobre e alumínio.

Se observa no gráfico da Figura A.13, a diferença entre o preço do cobre e do alumínio chega, em certos períodos, a uma diferença de cerca de 4,5 vezes, ou seja, em determinados períodos, o preço do alumínio é cerca de 76% mais barato que o preço do cobre. Este fato tem acarretado à utilização do alumínio em substituição ao cobre.

Outro fator que pode afetar o preço do cobre e do alumínio é a sua disponibilidade, ou seja, a quantidade de matéria prima acessível em suas reservas, uma vez que a disponibilidade de alumínio é consideravelmente maior que a de cobre (OLIVARES-GALVÁN, LEÓN, *et al.*, 2010) (SALUSTIANO, 2012).

A.3.1.1.2. Custo Devido à Resistividade dos Materiais

O cálculo do custo do cobre e do alumínio devido suas respectivas resistividades é detalhado em (SALUSTIANO, 2012), aonde se chega à relação de que o custo de aquisição do condutor de cobre corresponde a 51% do custo de aquisição unitário do condutor de alumínio, levando em consideração apenas o enrolamento.

A.3.1.1.3. Comportamento Térmico durante Curto-Circuito

O alto valor de corrente imposta durante um curto-circuito, faz com que a temperatura do transformador e principalmente dos seus enrolamentos suba rapidamente, podendo chegar a níveis prejudiciais aos isolamentos, e conseqüentemente, diminuir a vida útil do equipamento. No entanto, a velocidade com que a temperatura dos enrolamentos aumenta, durante o curto-circuito, é o ponto mais importante a ser considerado (OLIVARES-GALVÁN, LEÓN, *et al.*, 2010) (SALUSTIANO, 2012). A Figura A.14 mostra as curvas para o cobre e o alumínio, obtidas considerando um curto-circuito com duração igual a quatro segundos e uma classe de temperatura de 105 °C.

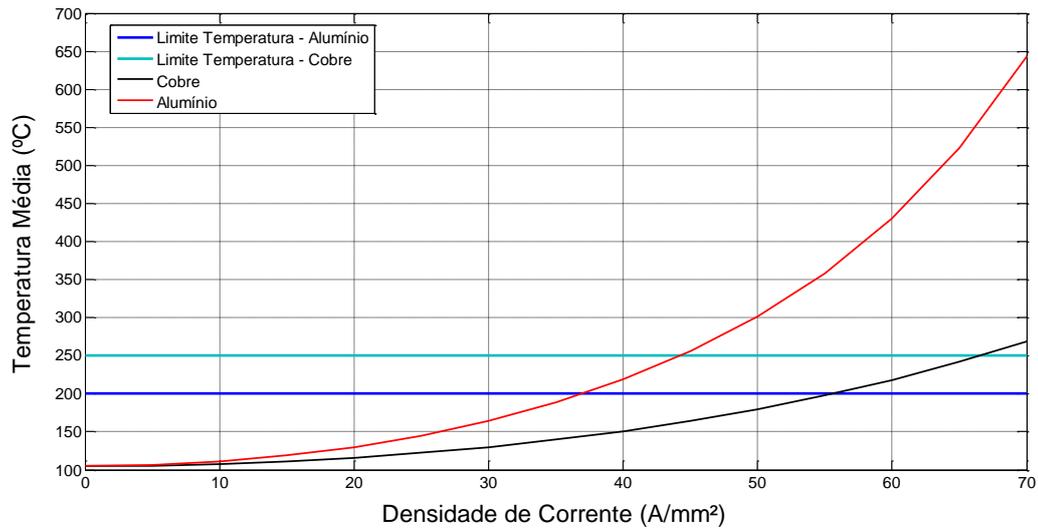


Figura A.14. – Temperatura do enrolamentos para curto-circuito de 4 segundos (Adaptado de: (SALUSTIANO, 2012)).

Além das curvas levantadas para o curto-circuito, o gráfico da Figura A.14 mostra também os limites máximos de temperatura para o alumínio e o cobre, uma vez que os limites são de 200°C e 250°C, respectivamente. Além disso, a partir das curvas da Figura A.14, é possível observar que o enrolamento de alumínio atinge seu limite máximo de temperatura para uma densidade de corrente de 37 A/mm². Já o cobre atinge sua temperatura máxima com uma densidade de corrente de aproximadamente 66,6 A/mm². Dessa forma, observa-se que a densidade de corrente para condutores de cobre pode ser 80% maior que para condutores de alumínio durante um curto-circuito. Assim, analisando a seção transversal do condutor, o alumínio deve ter uma seção 80% maior que o cobre para obter desempenhos equivalentes frente ao curto-circuito (SALUSTIANO, 2012).

A.3.1.1.4. Perdas Parasitas

A influência das perdas parasitas, utilizando condutor de cobre e alumínio, é detalhado em (SALUSTIANO, 2012), onde chega-se aos resultados de que as mesmas, quando usando condutor de cobre, são cerca de 3,3 vezes menores que as perdas parasitas utilizando condutor de alumínio.

A.3.2. Núcleo

No caso dos transformadores, a principal função do núcleo é transferir eletromagneticamente, através do seu fluxo, as correntes induzidas pelos enrolamentos de

baixa e alta tensão. Para tanto, utiliza-se, em geral, materiais ferromagnéticos, com o propósito de se criar um caminho de alta permeabilidade magnética, favorecendo a circulação do fluxo magnético por esse meio. O alto fluxo mútuo entre bobinas e o baixo fluxo de dispersão, devido o uso de materiais ferromagnéticos no núcleo de transformadores, resultam em um alto grau de acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário, podendo chegar a valores próximos ao unitário (IARONKA, 2014) (SALUSTIANO, 2012).

A alta resistividade elétrica é outra característica desejada no núcleo de transformadores, a fim de se diminuir as perdas por correntes parasitas. O aumento da resistividade elétrica pode ser obtido através da adição de silício em ligas de ferro (IARONKA, 2014) (JORDÃO, 2002) (SALUSTIANO, 2012). Segundo a (ABNT NBR 5161, 1977), norma que estabelece o procedimento para a verificação das propriedades dos produtos laminados planos de aço para fins elétricos, a resistividade elétrica dos materiais varia com o teor de silício adicionado a eles, conforme mostra o gráfico da Figura A.15.

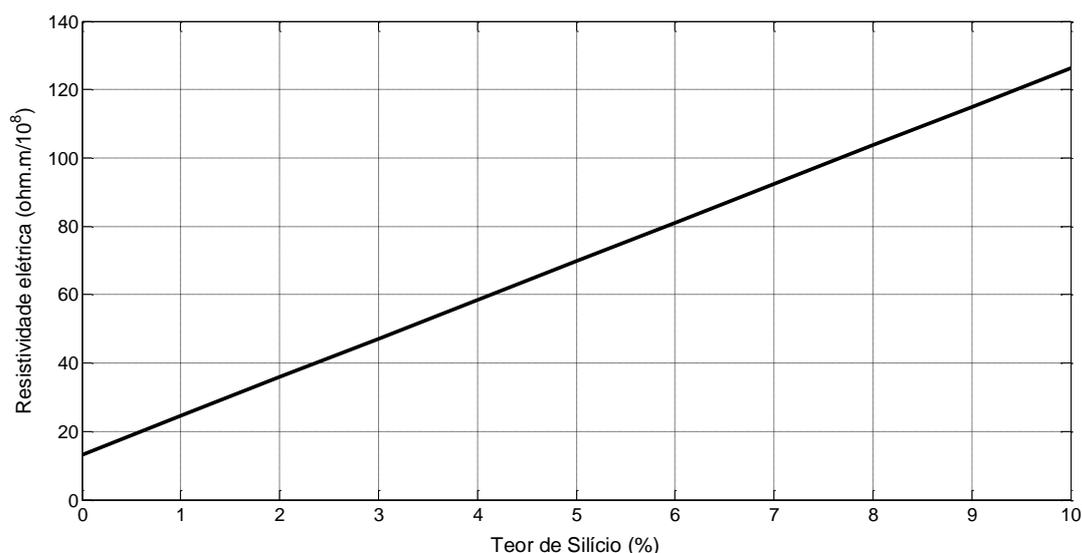


Figura A.15 – Resistividade elétrica em função do teor de silício (Adaptado de: (ABNT NBR 5161, 1977))

Outra maneira de reduzir as perdas por correntes parasitas é a utilização de chapas finas na construção do núcleo de transformadores, com espessura de 0,23mm a 0,30mm, laminadas a frio e cobertas com uma camada fina de um isolante elétrico inorgânico, evitando, deste modo, o contato entre as chapas e, conseqüentemente, reduzindo os possíveis caminhos para as correntes parasitas (SALUSTIANO, 2012).

O núcleo é formado, basicamente, pelas colunas e pelas culatras. A parte do núcleo onde são montadas as bobinas é chamada de coluna, enquanto a parte que não é envolvida

pelos enrolamentos, a qual completa o caminho do fluxo magnético, é chamada de culatra (RIES, 2007) (SALUSTIANO, 2012) (VIENA, 2010).

Segundo (HARLOW, 2004), construtivamente, o núcleo de transformadores pode ser, basicamente, de dois tipos: núcleo envolvido e núcleo envolvente.

Nos transformadores do tipo núcleo envolvido, existe somente um caminho para a circulação do fluxo magnético. Neste tipo de núcleo, os enrolamentos são dispostos em torno das colunas, ou seja, o núcleo é envolvido pelas bobinas (HARLOW, 2004) (SALUSTIANO, 2012). A Figura A.16 ilustra a disposição do núcleo e das bobinas para um núcleo do tipo envolvido.

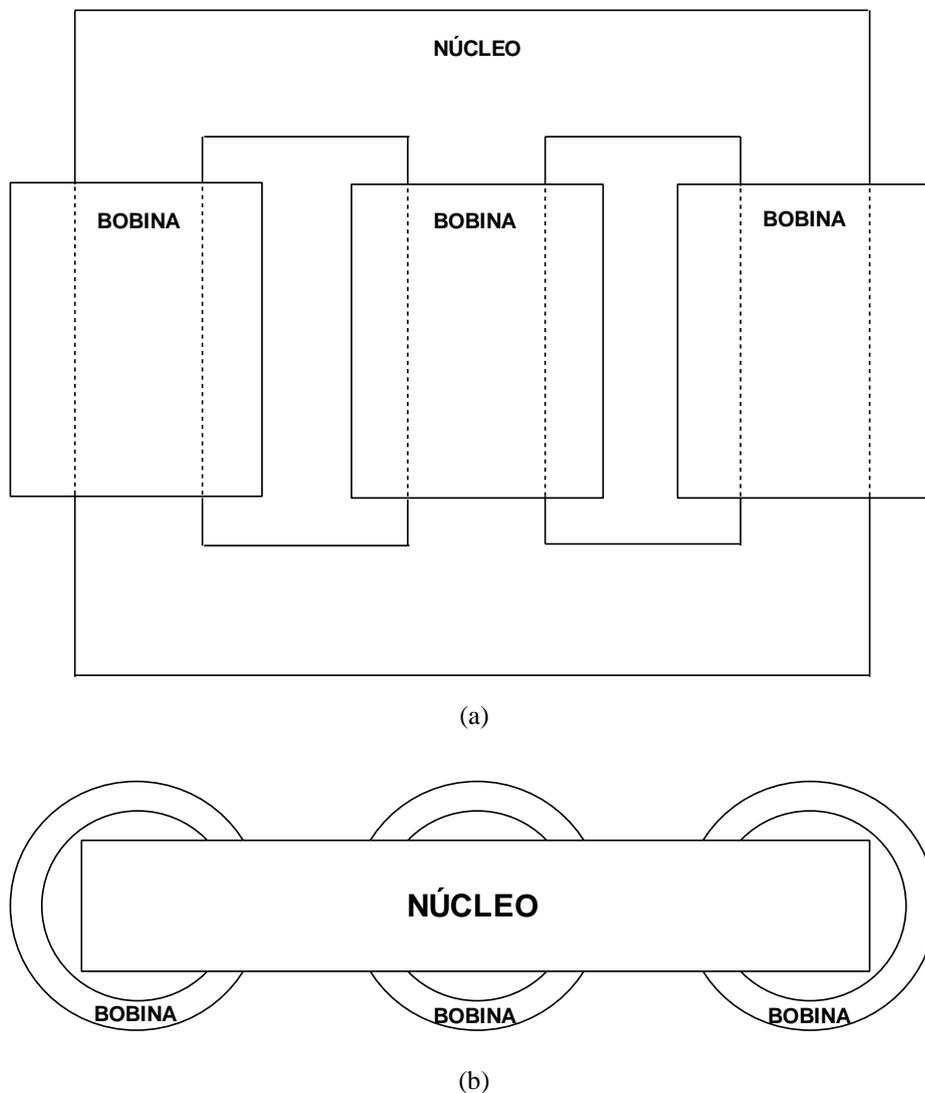


Figura A.16 – Esquemático de um transformador de núcleo envolvido trifásico. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (Adaptado de: (HARLOW, 2004))

O núcleo do tipo envolvente oferece vários caminhos para a circulação do fluxo magnético (HARLOW, 2004). Em transformadores com este tipo de núcleo, as bobinas são envolvidas pelo núcleo (HARLOW, 2004) (MCLYMAN, 2004) (SALUSTIANO, 2012). Na Figura A.17 é mostrada a disposição do núcleo e das bobinas para um núcleo do tipo envolvente.

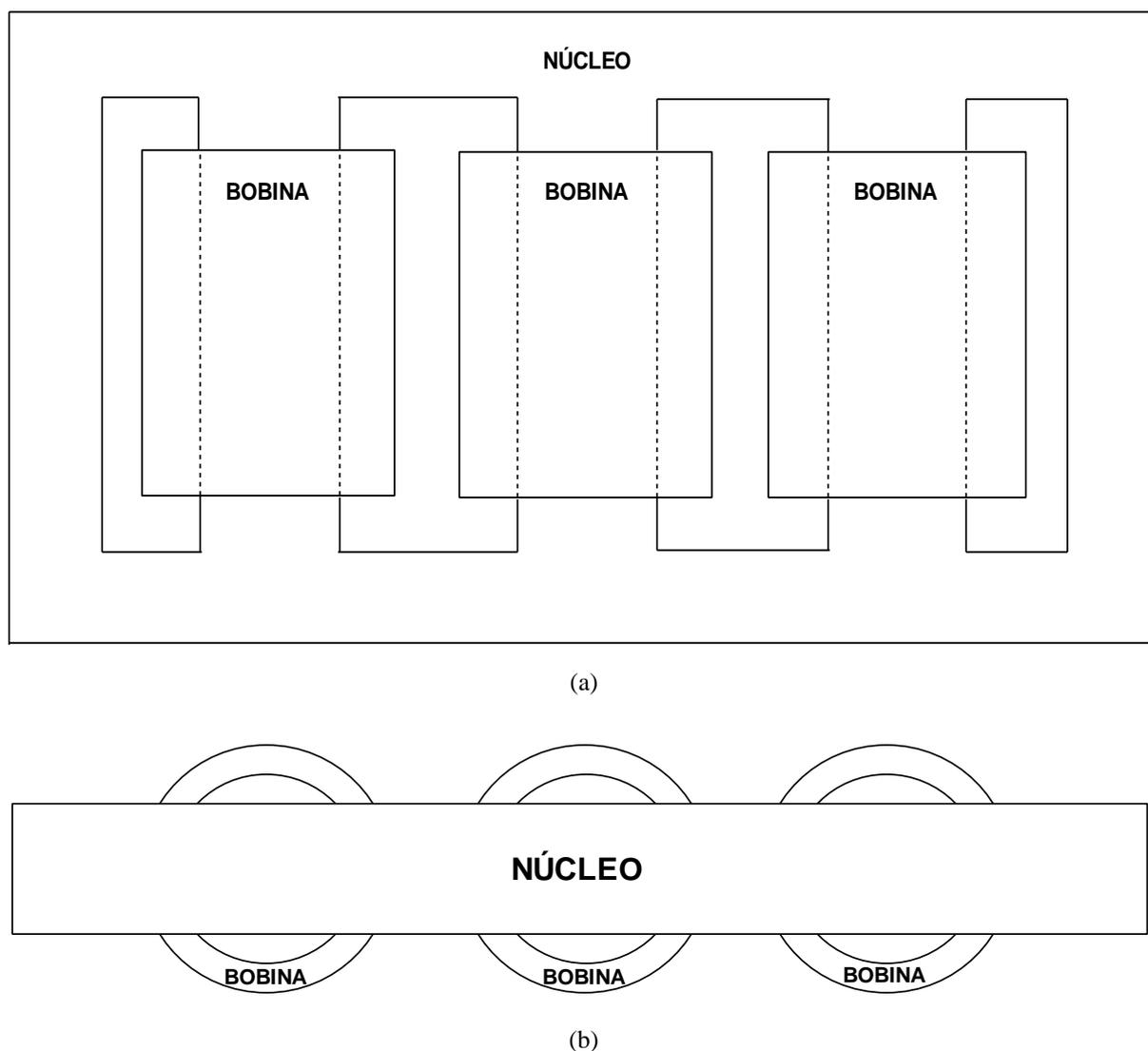


Figura A.17 – Esquemático de um transformador de núcleo envolvente trifásico. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (Adaptado de: (HARLOW, 2004))

Além da classificação quanto à forma construtiva, o núcleo pode ser também classificado quanto à forma de laminação, podendo ser do tipo empilhado ou enrolado. O núcleo empilhado consiste em colocar lâmina sobre lâmina formando uma pilha com várias lâminas de formatos e tamanhos diferentes (SALUSTIANO, 2012), conforme mostra a Figura A.18. O núcleo enrolado, também denominado por *wound core*, é feito de longas tiras de um

material magnético enroladas em torno de um eixo, chamado de mandril (MCLYMAN, 2004). A Figura A.19 mostra um núcleo do tipo enrolado sendo montado.



Figura A.18 – Núcleo empilhado. (SALUSTIANO, 2012)

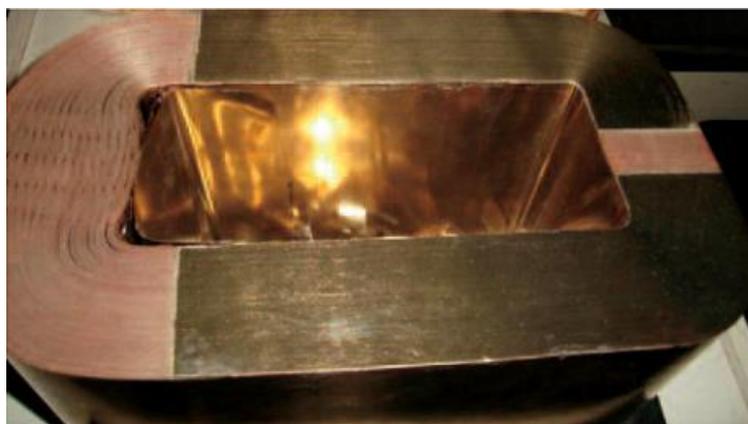


Figura A.19 – Núcleo enrolado. (NUNES, 2011)

A.3.2.1. Aços Utilizados em Núcleos de Transformadores

Os materiais magnéticos mais produzidos e utilizados em núcleos de máquinas elétricas são os chamados *aços elétricos*. Estes materiais dividem-se basicamente em três grupos: aços de baixo carbono, aços de grão não orientado (GNO) e aços de grão orientado

(GO), sendo estes dois últimos conhecidos por aços silícios, e são os mais utilizados na fabricação de transformadores (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010).

Os aços de baixo carbono possuem teores de carbono inferiores a 0,03%, ou seja, são ferros comerciais com algumas impurezas indesejadas de carbono. Os primeiros transformadores construídos com esse tipo de aço foram por volta dos anos 1880, sendo que atualmente não são mais utilizados na construção de transformadores (PRONTO, 2010).

Os aços de grão não orientado (GNO), surgiram em 1900, quando o metalurgista inglês Sir Robert Hadfield descobriu que a adição de silício ou alumínio ao ferro, em pequenas quantidades (inferiores a 3%), diminuía as perdas magnéticas para cerca de 25% dos valores que normalmente se atingia nos aços de baixo carbono (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010). A diminuição das perdas magnéticas são devido ao aumento da resistividade do material (provocado pelo acréscimo de silício), que por consequência, provoca uma diminuição das correntes de Foucault. Além disso, a adição de silício diminui a anisotropia magnetocristalina, permitindo um aumento da permeabilidade magnética do material, e a diminuição da magnetostricção, o que conduz a menores variações dimensionais durante o processo de magnetização e desmagnetização e a menor sensibilidade das propriedades magnéticas às tensões mecânicas (CULLITY e GRAHAM, 2009). Em contrapartida, a adição de silício diminui a indução magnética de saturação e torna o material mais frágil, dificultando seu manuseio durante a manufatura. Por isso, a adição de silício é limitada em 3%. Os aços GNO são produzidos sob a forma de chapas, para facilitar seu uso final na indústria (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010).

Os aços de grão orientado (GO) surgiram em 1933 quando o metalurgista americano Norman P. Goss descobriu que conseguia obter chapas com propriedades magnéticas muito superiores, se o aço silício fosse laminado a frio, ao contrário do aço GNO que é laminado a quente, e recozido a uma temperatura entre 900°C e 1100°C, e acabando o processo com recozimento a cerca de 1200°C. Em geral, o teor de silício esta limitado a um valor entre 2,2% e 3,2% . Os aços de GO são os mais usados em transformadores, onde se dá preferência a uma direção preferencial de magnetização, ao contrário do que acontece em máquinas rotativas (PRONTO, 2010). Uma comparação entre aço GNO e aço GO é mostrado na Figura A.20.

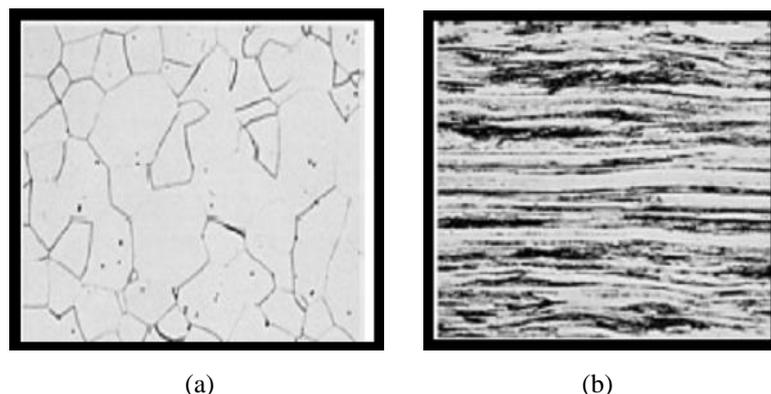


Figura A.20 –Micrografia de uma chapa de FeSi. (a) Grão não orientado. (b) Grão orientado (PRONTO, 2010)

A.3.2.2. Comparativo entre Aço-Silício e Metal Amorfo

Ao final de 1970 foi anunciada a descoberta de um novo tipo de material, o metal amorfo, que apesar de ser um metal, possui características de um vidro (SILVA, VASCONCELOS, *et al.*, 2001). A descoberta destes metais é atribuída a P. Duwez, que em 1960 produziu amostras de um material amorfo, através de um súbito arrefecimento da liga $Au_{75}Si_{25}$, que, porém, a introdução ao mercado somente ocorreu em meados da década de 70. As ligas amorfas mais importantes contêm cerca de 80% de um material ferromagnético como Ferro, Níquel e Cobalto e 20% de um metaloide que normalmente é Boro ou Silício (MAURÍCIO, 2014). Dessa forma, os metais amorfos melhoram a eficiência do sistema através da redução de perdas no núcleo de transformadores de distribuição (SOLTANZADEH, TAVAKOLI e ARBAB, 2012).

Diversos países têm utilizado transformadores com núcleo de metal amorfo, demonstrando para concessionárias e unidades consumidoras a possibilidade de substituição de transformadores com núcleo de aço-silício por transformadores com núcleo de metal amorfo. Apesar de os transformadores de metal amorfo diminuam significativamente as perdas a vazio, estes podem aumentar o custo operacional durante sua vida útil, devido ao seu alto custo inicial, se comparado com transformadores de aço-silício (SALUSTIANO, 2012).

As ligas metálicas mais comuns, como por exemplo, o aço-silício, possuem, normalmente, estruturas atômicas cristalinas, onde os átomos estão arranjados em uma rede ordenada e repetida (PRONTO, 2010). Diferentemente destas ligas, os metais amorfos têm seus átomos distribuídos de um modo praticamente aleatório e desprovidos de ordem à longa distância, como nos vidros (ISLAM, 2012) (SOLTANZADEH, TAVAKOLI e ARBAB, 2012). A Figura A.21 ilustra as estruturas cristalinas e amorfas.

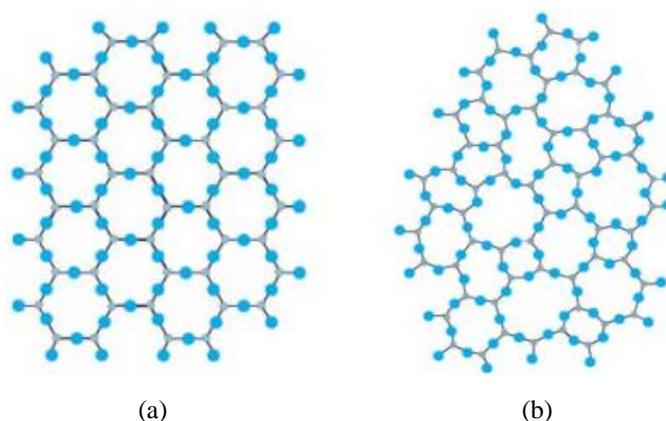


Figura A.21 –Estruturas atômicas. (a) Cristalina. (b) Amorfa (SALUSTIANO, 2012)

Devido à dureza dos metais amorfos, podendo ser quatro vezes maior que os aços convencionais utilizados em núcleos de transformadores, a laminação se torna difícil e variável, pois não é possível garantir a mesma espessura durante todo o corte da lâmina. Dessa forma, as ferramentas não conseguem manter um grau de exatidão estável, desregulando-se durante o processo de corte, pois o desgaste destas ferramentas se dá de forma mais rápida se comparado com o processo de corte do aço-silício. Assim, o custo de transformadores com núcleo amorfo se torna mais caro que transformadores com núcleo de aço-silício (MAURÍCIO, 2014) (PRONTO, 2010) (SALUSTIANO, 2012) (SILVA, VASCONCELOS, *et al.*, 2001).

Segundo (MAURÍCIO, 2014) e (PRONTO, 2010), a espessura das lâminas de metal amorfo são cerca de dez vezes menores que a espessura das lâminas de aço-silício, o que diminui muito as perdas por corrente de Foucault. A baixa espessura das lâminas acarreta a um alto número de laminações, implicando em um aumento de custos de produção de núcleos com metal amorfo, pois o corte destas lâminas requer técnicas avançadas e perícia.

A combinação entre alto valor de dureza, baixa espessura das lâminas, variação do valor de espessura e superfície rugosa, acarreta ao metal amorfo possuir um baixo fator de empilhamento, na ordem de 80%, comparado com 95% dos aços convencionalmente usados como materiais elétricos, como por exemplo, o aço-silício. Por consequência, há um aumento de aproximadamente 18% na área de seção reta do núcleo dos transformadores construídos com metal amorfo (MAURÍCIO, 2014) (PRONTO, 2010). O aumento da seção reta do núcleo de transformadores de metal amorfo, devido a um menor fator de empilhamento, implica em um aumento de cerca de 15% no volume destes equipamentos, se comparado com transformadores a aço-silício (MAURÍCIO, 2014) (SILVA, VASCONCELOS, *et al.*, 2001).

Em geral, os metais amorfos possuem uma composição de aproximadamente 80% de ferro e 20% de boro, levando a uma indução de saturação 20% menor em comparação com outros materiais magnéticos utilizados em núcleos de transformadores, para uma mesma temperatura. Esse fator implica em um aumento da seção de metal amorfo necessária para se obter a mesma quantidade de fluxo magnético, em comparação com os aços elétricos. Da mesma forma, em função do menor valor de indução de saturação, há um aumento de aproximadamente 15% na massa do núcleo de transformadores de metal amorfo, em comparação ao núcleo de aço-silício (MAURÍCIO, 2014) (SALUSTIANO, 2012) (SILVA, VASCONCELOS, *et al.*, 2001).

Outro fator importante a ser considerado é a magnetostricção, nome dado às alterações das dimensões físicas de um material magnético, que ocorrem quando este se encontra magnetizado, podendo causar ruídos. Assim sendo, o metal amorfo possui uma magnetostricção semelhante a do aço-silício.

Uma vantagem dos transformadores com núcleo de metal amorfo, em comparação com os transformadores convencionais de aço-silício, é a baixa corrente de magnetização (MAURÍCIO, 2014).

Os metais amorfos apresentam características favoráveis ao estabelecimento da indução magnética, além de apresentar um estreito ciclo de histerese e alta permeabilidade magnética. Diante dessas características, os metais amorfos apresentam pequenas perdas por histerese, se comparados com o tradicional aço-silício. Dessa forma, projetos de circuitos magnéticos de transformadores com núcleo amorfo tem como garantia uma baixa corrente de magnetização e alta eficiência (SALUSTIANO, 2012) (SILVA, VASCONCELOS, *et al.*, 2001). Na Figura A.22 pode-se comparar o ciclo de histerese de uma liga amorfa com o ciclo de histerese de um aço elétrico de grão orientado.

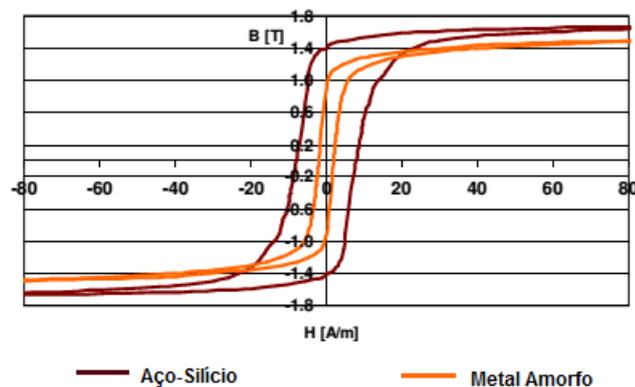


Figura A.22 – Ciclos de histerese de um metal amorfo e aço-silício (Adaptado de: (STEINMETZ, CRANGANU-CRETU e SMAJIC, 2010))

Conforme pode ser visualizado nas curvas de magnetização da Figura A.22, o metal amorfo satura em um nível mais baixo que o aço-silício, além de possuir um ciclo de histerese mais estreito. Dessa forma, transformadores com núcleo amorfo apresentam menores perdas por histerese e perdas por corrente de Foucault (SALUSTIANO, 2012). A redução de perdas no núcleo pode atingir valores entre 60% e 90%, sendo uma grande vantagem a utilização deste tipo de metal em núcleos de transformadores (HASEGAWA e PRUESS, 2001). A Tabela A.2 mostra um comparativo de perdas a vazio, para transformadores com núcleo amorfo e aço-silício, para diferentes potências.

Tabela A.2 – Comparativo de perdas no núcleo entre aço-silício e metal amorfo

Classificação (kVA)	Perdas a vazio (W)		Redução de Perdas
	Aço-Silício	Metal Amorfo	
	Monofásico		
15	55	20	64%
25	65	30	54%
50	105	35	67%
75	155	55	65%
100	200	75	63%
167	235	95	60%
	Trifásico		
300	505	200	60%
500	725	220	70%
750	1125	355	68%
1500	2170	725	67%
2500	2750	745	73%

Fonte: (ELIASSON, ELVFING e RAMANAN, 2010)

Observa-se, a partir da Tabela A.2, uma redução de até 73% nas perdas a vazio quando da utilização de metal amorfo em núcleo de transformadores, em comparação com aço-silício.

A Tabela A.3 apresenta um comparativo entre algumas das principais características do metal amorfo e do aço-silício.

Tabela A.3 – Comparativo de características entre aço-silício e metal amorfo

Material	Densidade de saturação de fluxo (T)	Resistencia Elétrica (Ω m.cm)	Perdas Ferro (W/Kg)	Espessura das lâminas (mm)
Aço-Silício	2,03	50	0,440	0,230
Metal Amorfo	1,56	130	0,070	0,025

Fonte: (ISLAM, 2012)

Analisando esta última tabela, observa-se uma redução de cerca de 84% nas perdas ferro e uma redução de aproximadamente 89% na espessura das lâminas do núcleo, para metal amorfo em comparação com o aço-silício. Além disso, tem-se um aumento na resistência elétrica do núcleo de aproximadamente 160%, o que acarreta em menores perdas Foulcault.

A.3.3. Sistema de Isolamento

A isolação elétrica presente nos transformadores, além da sua função principal, que é minimizar o fluxo de corrente entre os condutores submetidos a diferenças de potencial elétrico, também deve atuar na transferência de calor gerado na parte ativa deste equipamento, bem como suportar os esforços eletromecânicos e apresentar estabilidade química dentro de níveis que possam garantir as suas funções como material isolante (MORAIS, 2004).

O sistema de isolamento é uma das partes principais e que requer muita atenção no projeto de transformadores. Formado basicamente por um líquido isolante e uma isolação sólida (isolante a base de papel Kraft) (FILHO, 2008) (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010), o sistema de isolação é o principal item afetado com o aquecimento do sistema e responsável pela vida útil do transformador (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010). O papel isolante é utilizado para recobrir os condutores com a finalidade de evitar um curto-circuito entre eles, e o líquido isolante tem a finalidade de isolar os enrolamentos da carcaça do transformador e dissipar o calor gerado pela parte ativa do transformador (NOGUEIRA e ALVES, 2009). O papel, em comparação com o líquido isolante, é o elemento responsável pela definição da vida útil do equipamento, devido ao fato de que, diferentemente do óleo isolante, o papel não pode ser regenerado ou substituído ao longo da operação do transformador, pois este é inserido entre as bobinas no momento da fabricação do equipamento (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010). Na Figura A.23 é apresentado o esquema do núcleo de um transformador com detalhamento do isolamento sólido.

A.3.3.1. Isolação Sólida

Os papéis isolantes utilizados em transformadores são constituídos de celulose, ou seja, um polímero originário de vegetais, e devem apresentar alta capacidade de isolamento elétrico, além de elevada resistência mecânica (NOGUEIRA e ALVES, 2009) (SOUZA, 2011).

Devido ao processo de polimerização, com o tempo e com as elevadas temperaturas de operação do transformador, a resistência mecânica do papel diminui, deixando-o frágil e quebradiço. Além disso, devido à ação de esforços térmicos, do oxigênio e da umidade, os papéis isolantes se degradam, afetando diretamente a vida útil do transformador (MORAIS, 2004) (SOUZA, 2011).

A classificação dos tipos de papéis isolantes é dependente da sua matéria prima e de seu processo de fabricação, apresentando diferentes composições e características. Os principais tipos de papel isolante utilizados na isolação de transformadores são: Papel Kraft (fibra de madeira), Papel Manilha (fibra de madeira e cânhamo), Pressboard (papela com fibra de algodão) (MORAIS, 2004).

A.3.3.2. Líquido Isolante

O óleo isolante, podendo ser mineral ou vegetal, tem como funções: promover um meio dielétrico entre os condutores energizados das bobinas, proteger a superfície interna da carcaça do transformador contra reações químicas, como a oxidação, além de dissipar o calor gerado pela parte ativa do equipamento. Esse calor gerado é dissipado através do processo de transferência de calor (condução e convecção), ou seja, o líquido isolante conduz o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo para a carcaça que então transfere o calor para o ambiente, permitindo, assim, a refrigeração interna do transformador (IARONKA, 2014) (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

O óleo isolante também é usado para indicar as condições de operação elétrica dos equipamentos, tal como quando ocorre um curto-circuito, dissipando uma grande quantidade de calor e, conseqüentemente, gerando a degradação química do material isolante, o que gera o aparecimento de subprodutos. É a partir desses subprodutos que podem ser feitas análises em laboratório para saber o tipo de avaria e a gravidade dos defeitos causados ao núcleo e aos enrolamentos (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

A.3.3.2.1. Óleo Mineral Isolante

Os óleos minerais isolantes (OMI) têm sido utilizados como meio dielétrico e refrigerante desde os primeiros transformadores com fluido isolante (IARONKA, 2014). O óleo mineral isolante, utilizado em transformadores, é obtido a partir da destilação do petróleo a uma temperatura entre 300 e 400°C, sendo que suas características dependem da natureza do petróleo e do processo de obtenção (MORAIS, 2004) (PORTELLA, 2010) (STOCCO, 2009) (MILASCH, 1984) (UHREN, 2007). Este destilado consiste basicamente de hidrocarbonetos (moléculas compostas por Hidrogênio e Carbono), apresentando ainda pequenas quantidades de outros compostos contendo Nitrogênio, Enxofre, Oxigênio em sua estrutura. Quanto à origem, o óleo mineral pode ser de origem parafínica ou naftênica (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010) (STOCCO, 2009) (UHREN, 2007).

As principais características físico-químicas utilizadas como parâmetros de classificação do óleo isolante são: a sua cor, ponto de fulgor, ponto de fluidez, densidade, viscosidade, ponto de anilina, teor de umidade, rigidez dielétrica e tensão interfacial. Além de servirem como parâmetros de projeto de isolamento, algumas destas características são utilizadas na avaliação e acompanhamento do óleo em serviço, indicando possível contaminação, estimativas de sua deterioração ou determinação de suas condições funcionais.

Um dos parâmetros mais importante na avaliação do desempenho do óleo isolante é a rigidez dielétrica, uma vez que esta representa a capacidade do óleo isolante suportar a aplicação de campos elétricos sem a perda de sua característica dielétrica (MORAIS, 2004). Segundo (SCHMIDT, 1979), o valor de rigidez dielétrica para óleos novos e secos pode atingir valores de até 200 kV/cm. Fatores como temperatura, estrutura dos eletrodos e impurezas influenciam na determinação do valor de rigidez dielétrica do óleo isolante (MORAIS, 2004).

Durante a operação do transformador, o óleo isolante envelhece e suas características variam. Como consequência, ocorre: a deterioração das propriedades isolantes do óleo; aceleração do processo de degradação da celulose; oxidação da parte ativa e do tanque dos transformadores; e depósito de material na parte ativa dos transformadores (borra), dificultando a transferência de calor (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010) (STOCCO, 2009).

A Tabela A.4 apresenta algumas das principais características ideais de um fluido isolante mineral para utilização em transformadores de distribuição.

Tabela A.4 – Características principais do OMI novo.

Propriedades	Valor Médio Típico
Viscosidade cinemática (a 20 °C)	25,0 cSt
Ponto de fulgor	140 °C
Índice de Neutralização (máx)	0,03 mg KOH.g ⁻¹
Fator de Potência (a 25 °C)	0,05%
Fator de Potência (a 90 °C)	0,40%
Rigidez Dielétrica (Eletrodo de Disco)	30 kV
Rigidez Dielétrica (Eletrodo de calota)	42 kV
Tensão Interfacial (a 25 °C)	40 dina.cm ⁻¹

Fonte: (PORTELLA, 2010).

Devido o óleo mineral isolante apresentar baixa biodegradabilidade, alto poder de contaminação do solo e dos lençóis freáticos quando da ocorrência de um derramamento no ambiente e apresentar risco de esgotamento das fontes petrolíferas do planeta, levam a busca de alternativas que possam minimizar as consequências destes fatos. Dessa forma, surge o óleo vegetal isolante como substituto do óleo mineral (IARONKA, 2014) (UHREN, 2007).

A.3.3.2.2. Óleo Vegetal Isolante

A crescente crise de óleos derivados do petróleo, ou seja, a dificuldade de fornecimento de OMI, o aumento do seu preço, aliado a necessidade de fluidos biodegradáveis, demonstram a necessidade de encontrar uma alternativa em substituição do óleo mineral isolante como fluido dielétrico e refrigerante (AMANULLAH, ISLAM, *et al.*, 2008) (UHREN, 2007).

Experimentos usando óleos vegetais como dielétrico foram conduzidos na mesma época de realização dos primeiros testes com óleo mineral. Porém, os óleos vegetais demonstraram ser menos atrativos que o mineral devido à sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas. Em contrapartida, a questão ambiental, que tem sido motivo de preocupação da comunidade mundial, foi a impulsionadora do desenvolvimento de óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos, por volta de 1999 (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009).

Os óleos vegetais são obtidos a partir de grãos ou sementes de plantas oleaginosas, ou seja, são produtos naturais e de grande abundância de oferta (AMANULLAH, ISLAM, *et al.*, 2005) (COSTA, ARAÚJO, *et al.*, 2009) (IARONKA, 2014) (STOCCO, 2009) (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009). A obtenção destes óleos é feita através de processos apropriados

(trituração, cozimento, prensagem mecânica, extração por solvente, entre outros), obtendo ao final desse processo o óleo bruto. Este óleo passa então por processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, obtendo o óleo refinado (IARONKA, 2014) (STOCCO, 2009).

Os óleos vegetais isolantes (OVIs) são facilmente biodegradáveis no ambiente, uma vez que estes apresentam uma biodegradabilidade de aproximadamente 95%, enquanto os óleos minerais isolantes apresentam uma biodegradabilidade de aproximadamente 37% (AMANULLAH, ISLAM, *et al.*, 2005) (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009).

Durante o processo de funcionamento do transformador, o óleo isolante está sujeito a um processo de oxidação, onde se formam ácidos como produtos finais da degradação, sendo que para o OVI, os produtos da oxidação são inócuos ao papel isolante (Kraft), ou seja, não degradam o isolamento de papel.

Outro fator sempre presente nos líquidos isolantes é a umidade, a qual varia com a estrutura química dos mesmos. A umidade por sua vez, atua como agente catalisador na decomposição da celulose, diminuindo, por consequência, a vida útil do equipamento elétrico. Desta forma, estudos de envelhecimento do isolante sólido mostram que este tem sua vida prolongada na presença de óleos vegetais, em comparação aos óleos minerais (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009). A Figura A.24 apresenta um comparativo do aspecto do papel isolante após um ensaio de tempo de envelhecimento na presença de óleo mineral e óleo vegetal.

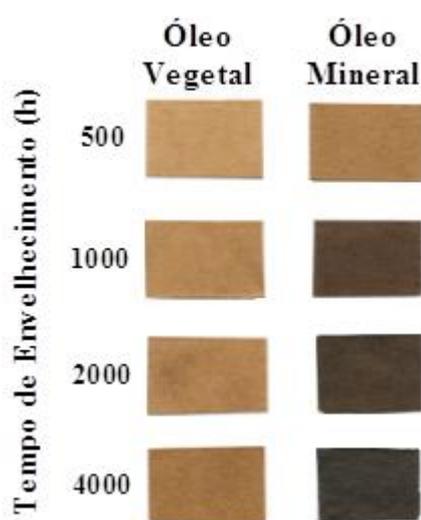


Figura A.24 – Isolação sólida após ensaio de tempo de envelhecimento (Adaptado de: (MCSHANE, RAPP, *et al.*, 2002)).

Devido os OVI's apresentarem ponto de combustão superior a 300 °C, estes são considerados fluidos de segurança, ao contrário dos OMI's que possuem um ponto de combustão em torno de 150 °C (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009).

Os primeiros produtos comerciais de OVI's lançados no mercado nacional foram o BIOTEMP® (importado da Suécia pela ABB Brasil) e o ENVIROTEMP® FR3™ (comercializado pela Cooper Power Systems, fabricado pela Cargill). Em 2007, foram lançados, no mercado nacional, os óleos BIOVOLT®, produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional, pela empresa Mineraltec (STOCCO, 2009) (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15422, 2006), especifica as características do óleo vegetal isolante novo para uso como dielétrico e refrigerante em equipamentos elétricos.

A.3.4. Sistema de Refrigeração

Nos transformadores, assim como em qualquer dispositivo elétrico, nem toda a potência de entrada é fornecida a carga, ou seja, ocorre perda de energia. As perdas, por sua vez, geram calor, ou seja, aumento de temperatura em várias partes do transformador (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (MCLYMAN, 2004). As principais fontes de geração de perdas são o núcleo e os enrolamentos (KULKARNI e KHAPARDE, 2004). As perdas podem ser divididas, basicamente, em perdas no núcleo e perdas nos enrolamentos, sendo estas as principais responsáveis pela geração de calor no transformador (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (MCLYMAN, 2004). As perdas no núcleo são fixas, enquanto as perdas nos enrolamentos são variáveis e dependem da carga do equipamento (MCLYMAN, 2004).

Dessa maneira, há a necessidade da eliminação do calor gerado pelas perdas internas do transformador, para que não haja uma elevação da temperatura, além de limites pré-estabelecidos e cause a deterioração da isolação, e conseqüentemente a diminuição da vida útil deste equipamento (MCLYMAN, 2004) (RIES, 2007). Para tanto, faz-se uso de dispositivos capazes de aumentar a eficiência da troca de calor, entre o transformador e o ambiente (IARONKA, 2014). Para esse fim, geralmente, são utilizados trocadores de calor ou radiadores, moto ventiladores e moto bombas (ROSENTINO, 2010).

A transferência de calor das diversas partes de um transformador é feita por um ou mais dos seguintes modos: condução, convecção e radiação. Na transferência de calor por condução, o fluxo de calor se dá a partir do centro do núcleo e dos enrolamentos para as

superfícies externas dos mesmos, as quais estão em contato com o meio de arrefecimento (ar ou óleo). O processo de condução também é realizado através das paredes do tanque e dos radiadores do transformador. No processo de convecção, o calor é transferido das superfícies externas do núcleo e dos enrolamentos para o fluido isolante e refrigerante (ar ou óleo). Quando isso ocorre, a temperatura do fluido aumenta e conseqüentemente a sua densidade diminui. Além disso, o calor é transferido do fluido isolante e refrigerante para as paredes internas do tanque e dos radiadores, proporcionando a redução da temperatura do fluido e o aumento de sua densidade, permitindo assim, a continuação de circulação do fluido isolante e refrigerante. O processo de convecção também ocorre das paredes externas do tanque e dos radiadores para o ar ambiente ou outro meio de refrigeração. Por fim, o processo de transferência de calor por radiação ocorre das paredes externas do tanque e dos radiadores ao ar, bem como das superfícies externa do núcleo e dos enrolamentos para o fluido isolante (KULKARNI e KHAPARDE, 2004) (RIES, 2007).

Nos transformadores a seco, a refrigeração é realizada pela simples circulação de ar em torno da bobina e do núcleo, podendo ser por convecção natural ou por fluxo de ar forçado. Este tipo de refrigeração é, normalmente, limitada para transformadores de baixa tensão (até 5 kV), com potência inferior a 1500 kVA e que se localizam em ambientes cobertos. Desse modo, para tensões maiores, o emprego de óleo para isolamento das bobinas faz-se necessário, impedindo o uso de ar para o arrefecimento direto do núcleo e dos enrolamentos (WINDERS, 2002).

Os transformadores imersos em fluido isolante podem ser classificados quanto ao tipo de seu sistema de refrigeração (WINDERS, 2002). Essa classificação é definida pela norma (IEC 60076-2, 1993), a qual é apresentada na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Classificação dos transformadores quanto ao tipo de resfriamento.

Nomenclatura IEC	Descrição
ONAN	Óleo natural, ar natural
ONAF	Óleo natural, ar forçado
OFAF	Óleo forçado, ar forçado
ODAF	Óleo direcional forçado, ar forçado
OFWF	Óleo forçado, água forçada
ODWF	Óleo direcional forçado, água forçada
ONAN/ONAF/ONAF	Óleo natural, ar natural no primeiro estágio e nos dois estágios seguintes é utilizado ar forçado
ONAN/ODAF	Óleo natural, ar natural no primeiro estágio, no segundo estágio é utilizado óleo direcional forçado e ar forçado
ONAN/ODAF/ODAF	Óleo natural, ar natural no primeiro estágio, nos dois estágios seguintes é utilizado óleo direcional forçado e ar forçado

Fonte: (WINDERS, 2002).

No sistema de refrigeração do tipo *ONAN*, o óleo e o ar circulam de forma natural no interior e exterior do transformador, respectivamente. Ou seja, a convecção ocorre de maneira natural (RIES, 2007) (WINDERS, 2002), conforme mostrado na Figura A.25.

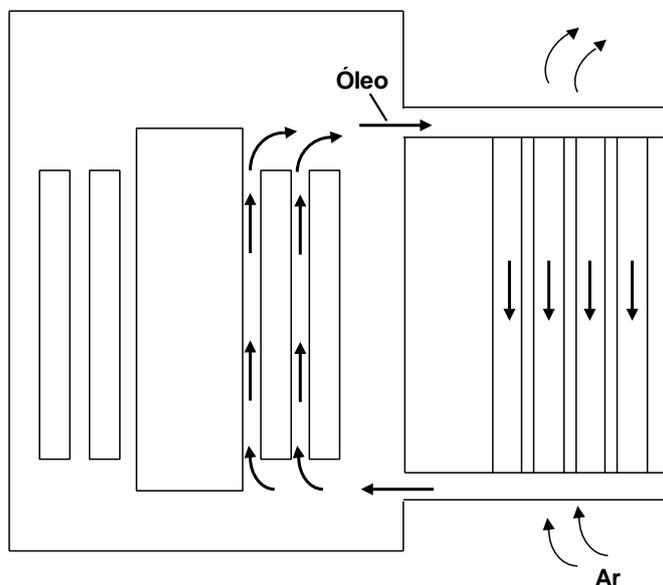


Figura A.25 – Sistema de resfriamento *ONAN*. (Adaptado de: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004)).

No tipo *ONAF*, o óleo circula naturalmente no interior do equipamento (convecção natural), enquanto que o ar tem sua circulação forçada por meio de ventiladores na parte externa do transformador (RIES, 2007). A Figura A.26 apresenta um esquemático deste tipo de sistema de refrigeração.

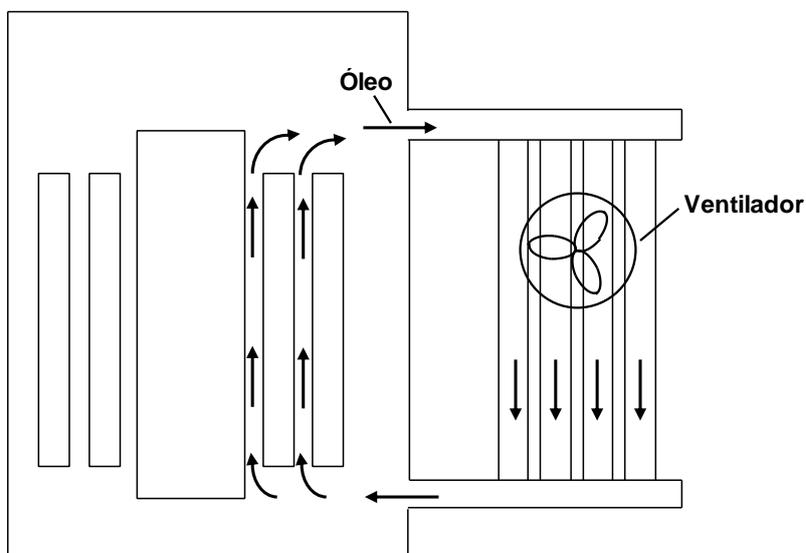


Figura A.26 – Sistema de resfriamento *ONAF*. (Adaptado de: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004)).

O sistema de refrigeração do tipo *OFAF* é semelhante ao sistema *ONAF*, com distinção que a circulação do óleo é realizada por meio de bombas, fazendo com que este circule com maior vazão (RIES, 2007). Na Figura A.27 é mostrado o sistema de refrigeração *OFAF*.

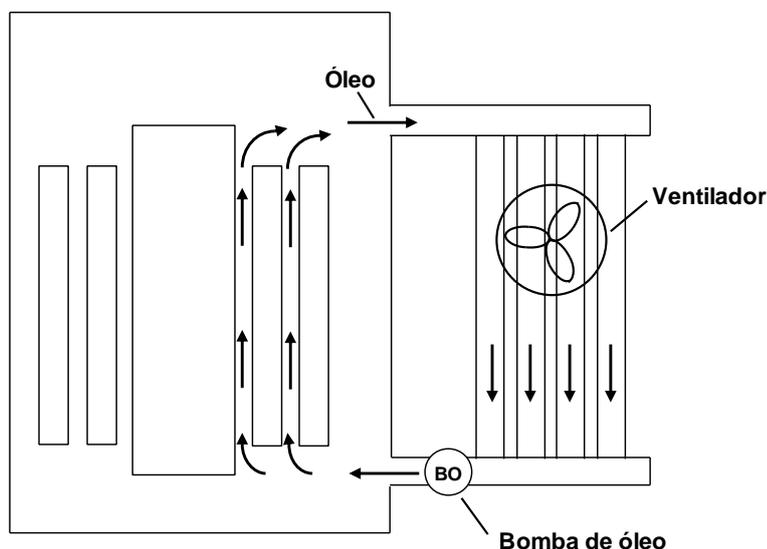


Figura A.27 – Sistema de resfriamento *OFAF*. (Adaptado de: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004)).

No sistema *ODAF*, o óleo e o ar tem sua circulação forçada por meio de bombas e ventiladores, respectivamente. No entanto, neste tipo de refrigeração, o óleo é direcionado a passar pelos dutos de refrigeração no interior dos enrolamentos (KULKARNI e KHAPARDE, 2004). A Figura A.28 apresenta um esquemático do sistema de refrigeração *ODAF*.

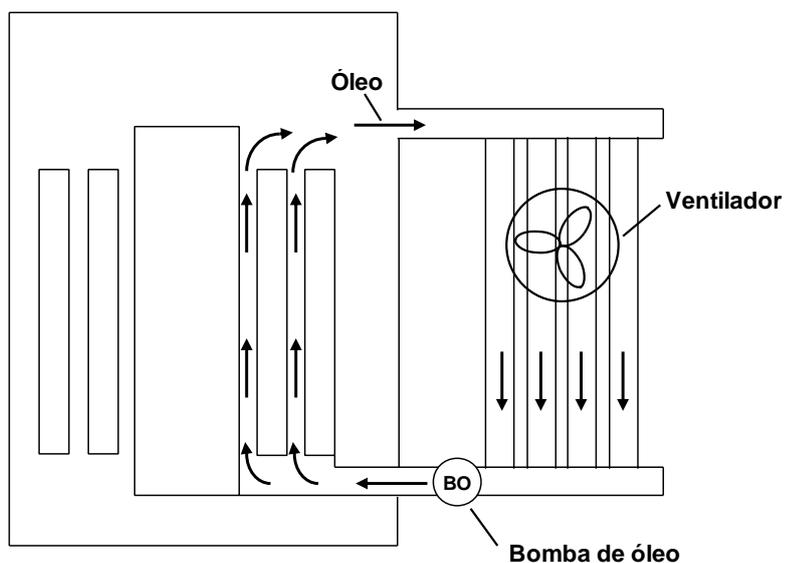


Figura A.28 – Sistema de resfriamento *ODAF*. (Adaptado de: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004)).

Os sistemas de refrigeração *OFWF* e *ODWF* são similares aos sistemas *OFAF* e *ODAF*, respectivamente, com distinção que o fluido refrigerante externo utilizado é a água, ao invés do ar.

Segundo a (ABNT NBR 5440, 2014), norma que estabelece os requisitos das características elétricas dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição, determina os limites máximos de elevação de temperatura dos transformadores, conforme é apresentado na Tabela A.6.

Tabela A.6 – Limites de elevação de temperatura.

Temperatura	Limites de elevação de temperatura (°C)		
	Alternativa 1	Alternativa 2*	Alternativa 3**
Média dos Enrolamentos	55	65	75
Ponto mais quente do enrolamentos	65	80	90
Óleo isolante (topo do óleo)	50	60	70
Temperatura referência das perdas totais e impedância	75	85	95

* Para transformadores imersos em óleo mineral isolante, a isolação dos enrolamentos (condutores e isolamento entre camadas) deve ser em papel termoesbilizado compatível com o óleo isolante. ** Para transformadores imersos em óleo vegetal isolante, a isolação dos enrolamentos pode ser em papel Kraft regular, papel termoestabilizado ou papel aramida compatível com o óleo isolante. Esta alternativa não se aplica para transformadores imersos em óleo mineral isolante.

Fonte: (ABNT NBR 5440, 2014).

APÊNDICE B

ARTIGOS PUBLICADOS

- 1) Feil, D. L. P., Marchesan, T. B.; “Desenvolvimento de Novas Topologias de Radiadores para a Otimização do Sistema de Refrigeração através da Análise de Elementos Finitos e Rotinas para Otimização de Perdas de Transformador de Distribuição” XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI), 2014.
- 2) Feil, D. L. P., Medeiros, L. H., Marchesan, T. B.; Bernardon, D. P., Dutra, A. C., Tardivo, M. A., “Desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração Eficiente e Otimização de Perdas de Transformadores de Distribuição” XVI Encontro Regional Iberoamericano do Cigré (ERIAC), 2015.
- 3) Feil, D. L. P., Dutra, A. C., Marchesan, T. B.; Tardivo, M. A., “Rotinas para Otimização de Perdas e Efeitos do Uso de Núcleo Amorfo nas Perdas em Transformadores de Distribuição” 8º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle (SEPOC) e 2º Seminário de Energia e Sistemas de Potência (SESP), 2014.
- 4) Medeiros, L. H., Feil, D. L. P., Marchesan, T. B.; Tardivo, M. A., “Desenvolvimento de Novas Topologias de Radiadores para a Otimização do Sistema de Refrigeração de Transformadores de Distribuição” 8º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle (SEPOC) e 2º Seminário de Energia e Sistemas de Potência (SESP), 2014.

APÊNDICE C

PEDIDO DE PATENTE

- 1) Feil, D. L. P.; Marchesan, T. B.; Medeiros, L. H.; Bernardon, D. P.; Tardivo, M. A.; Bardeja, A. A.; Zanini, A. “Transformador de Distribuição Trifásico Classe de Tensão 15 kV e 25 kV, Núcleo Amorfo, Óleo Vegetal Isolante, Sistema de Refrigeração Eficiente e Sistema de Comunicação sem Fio para Monitoramento da Temperatura e Estimativa de Vida Útil”. 2015, Brasil. Número do registro: 00278-PI/2015.

APÊNDICE D

TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se o desenvolvimento de outros trabalhos de modo a complementar o estudo desenvolvido. Conforme segue:

- Estudo para otimização do projeto elétrico, considerando o ponto ótimo de operação, com relação às perdas, e o custo para manufatura deste equipamento;
- Estudo do custo/benefício da substituição dos convencionais núcleos de aço-silício por núcleo de metal amorfo;
- Estudo para estimativa da vida útil de transformadores de distribuição diante a substituição de núcleo de FeSi por núcleo de metal amorfo e uso de óleo vegetal isolante.