

JULIANO RICARDO DA SILVA

**AVALIAÇÃO “ON-LINE” DE TEMPERATURA DO
TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE
MODELAGEM NUMÉRICA MAGNÉTICA E
TERMODINÂMICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Pedro Assumpção Bastos

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Silva, Juliano Ricardo da

Avaliação “On-Line” de temperatura do transformador de
potência através da modelagem numérica magnética e
termodinâmica / Juliano Ricardo da Silva ; orientador, João
Pedro Assumpção Bastos - Florianópolis, SC, 2015.
151 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Transformador de potência.
3. Métodos Numéricos. 4. Modelagem Eletro-Térmica. I. Bastos,
João Pedro Assumpção. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

Juliano Ricardo da Silva

**AVALIAÇÃO “ON-LINE” DE TEMPERATURA DO
TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE
MODELAGEM NUMÉRICA MAGNÉTICA E
TERMODINÂMICA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de outubro de 2015.

Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.

Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
UFSC

Prof. Marcelo Grafulha Vanti, Dr.
FURB

Prof. Laurent Didier Bernard, Dr.
UFSC

Prof. Sérgio Henrique Lopes
Cabral, Dr.
FURB

Prof. Mauricio Valencia Ferreira
da Luz, Dr.
UFSC

Este trabalho é dedicado a minha esposa Karine e a meus filhos, Bernardo e Nicolas, pelo apoio, em todos os momentos, mesmo que sacrificando ao convívio.

AGRADECIMENTOS

À minha família, Karine, Bernardo e Nicolas, pelo apoio, incentivo e carinho, que sempre tiveram durante todos os momentos de necessidade e pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus pais, por me ensinarem os conceitos de persistência e responsabilidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Pedro Assumpção Bastos, pelo tempo dedicado em me auxiliar no cumprimento da pesquisa e execução deste trabalho.

Aos integrantes do GRUCAD, pelas diversas interações e amizades adquiridas, em especial aos professores e a Celly, pelo apoio prestado.

A Itaipu Binacional, pelo incentivo e apoio, sem o qual esse trabalho não seria possível.

À WEG transformadores, por disponibilizar as estruturas fabris e dados necessários a validação dos estudos, além das inúmeras discussões com o corpo técnico.

A persistência é o caminho do êxito.

(Charles Chaplin)

Resumo de Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Avaliação “*On-line*” de Temperatura do Transformador de Potência Através de Modelagem Numérica Magnética e Termodinâmica

Juliano Ricardo da Silva

Outubro de 2015

Orientador: João Pedro Assumpção Bastos

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos

Palavras-Chave: Transformador de Potência, Métodos Numéricos, Modelagem Eletro-Térmica.

RESUMO: As perdas no núcleo e enrolamentos de transformadores levam a um aumento nas temperaturas internas nestes equipamentos. Este aquecimento deve ser monitorado a fim de evitar envelhecimento precoce no isolamento de papel impregnado e, conseqüentemente, perda de vida útil do transformador. O presente trabalho de tese aborda o desenvolvimento e implementação de um modelo térmico para análise das temperaturas internas em transformadores de potência, considerando a dificuldade e custos da obtenção destas temperaturas diretamente. A estimação das temperaturas no óleo e enrolamento em diversos pontos do transformador é realizada considerando características térmicas dos materiais envolvidos e aspectos construtivos do transformador. Para a validação do modelo proposto são realizadas comparações com as medições realizadas no transformador simulado. Os resultados ainda foram comparados com os valores de temperaturas obtidos para os mesmos pontos, com a utilização da recomendação técnica IEEE C57.91 (1995).

Abstract Thesis presented to UFSC as a partial Fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

On-line Evaluation of Power Transformer Temperatures using Magnetic and Thermodynamics Numerical Modeling

Juliano Ricardo da Silva

October, 2015

Advisor: João Pedro Assumpção Bastos

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices

Keywords: Power Transformers, Numerical Methods, Electro-Thermal Modeling

ABSTRACT: The losses in the core and windings of transformers lead to an increase of the internal temperatures in these equipments. This heating should be monitored, in order to avoid early ageing of the insulation of impregnated paper and, consequently, the transformer's loss of life. This research work describes the development and implementation of a thermal model aiming to calculate the internal temperatures in power transformers, considering the difficulties and costs for obtaining these temperatures by direct measurement. The approach uses parameters such as the thermal characteristics of the materials involved and the transformer constructive aspects, to estimate the oil and windings temperatures in several points in the transformer. In order to validate the proposed procedure a comparison with direct measurement in the power transformer is performed. The supplied results are compared with the values provided by the application of the IEEE transformer loading guide C57.91 (1995).

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Núcleo “Shell-type”	35
Figura 2.2 – Núcleo “Core-type”	35
Figura 2.3 - (a) Enrolamento; (b) Disposição dos pacotes tipo panqueca.....	36
Figura 2.4 – Construção do enrolamento por camada.....	36
Figura 2.5 - Enrolamento do tipo Helicoidal.....	37
Figura 2.6 - Enrolamento tipo disco.....	38
Figura 2.7 - (a) Fluxo direcionado; (b) Fluxo não-direcionado.....	39
Figura 2.8 - Vista em corte de um enrolamento de transformador....	42
Figura 2.9 - Lâmina de material ferromagnético com indução magnética variável.....	44
Figura 2.10 - Ciclo de histerese de uma lâmina de material ferromagnético	45
Figura 2.11 - Diferentes curvas de histerese para diferentes níveis de tensão.....	46
Figura 2.12 - Empilhamento de condutores em paralelo formando um único cabo	51
Figura 2.13 - Fluxograma de cálculo.....	56
Figura 3.1 - Parte Ativa do transformador.....	58
Figura 3.2 - Vista em corte da parte superior do enrolamento comum.....	60
Figura 3.3 – Vista em corte da parte superior do enrolamento série .	60
Figura 4.1 - Dimensional do transformador analisado	69
Figura 4.2 - Malha gerada utilizando o EFR	70
Figura 4.3 - Curva B-H da chapa M-4 obtida em laboratório	72
Figura 4.4 – Perdas magneticasdo material do núcleo	72
Figura 4.5 - Linhas de fluxo no tempo de 1,67ms.....	75
Figura 4.6 –Indução no tempo de 1,67ms	75
Figura 4.7 - Indução ao longo dos enrolamentos coluna 1	76
Figura 4.8 - Indução ao longo dos enrolamentos coluna 2	76
Figura 4.9 - Indução ao longo dos enrolamentos coluna 3	77
Figura 4.10 – Linha de fluxo para o tempo de 3,33ms	77
Figura 4.11 - Valores de campo para o tempo de 3,33ms	78
Figura 4.12 - Valores de indução, sobre a linha longitudinal a-b da figura 4.11	79
Figura 5.1 - Enrolamento AT completo	85
Figura 5.2 - Enrolamento BT completo e Núcleo ferromagnético....	86

Figura 5.3 - (a) tanque do transformador, (b) seção mostrando a modelagem dos volumes sem óleo.....	86
Figura 5.4 - Parte ativa.....	87
Figura 5.5 - Corte seção Parte Ativa	91
Figura 5.6 - (a) Coluna de enrolamento AT e BT; (b) espaçadores entre os discos de enrolamentos.....	92
Figura 5.7 - Linhas de Fluxo de óleo no enrolamento	93
Figura 5.8 - Temperatura no enrolamento.....	94
Figura 6.1 - Ficha do ensaio de aquecimento do transformador	101
Figura 7.1 - Detalhe de seção do transformador	105
Figura 7.2 - Distribuição dos coeficientes h para o enrolamento	108
Figura 7.3 - Vista típica de um disco do enrolamento.....	110
Figura 8.1 - (a) Canal enrolamento de AT; (b) Canal do enrolamento de BT.....	113
Figura 8.2 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 100%	114
Figura 8.3 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento	115
Figura 8.4 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2.....	115
Figura 8.5 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4	115
Figura 8.6 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6.....	116
Figura 8.7 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7	116
Figura 8.8 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 105%	117
Figura 8.9 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento	118
Figura 8.10 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2.....	118
Figura 8.11- Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4.....	118
Figura 8.12- Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6.....	119
Figura 8.13 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7	119
Figura 8.14 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 100%	120

Figura 8.15 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento	121
Figura 8.16 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4	121
Figura 8.17 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4	121
Figura 8.18 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6	122
Figura 8.19 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7	122
Figura 8.20 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 100%	123
Figura 8.21 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento	124
Figura 8.22 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2	124
Figura 8.23 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4	124
Figura 8.24 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6	125
Figura 8.25 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7	125
Figura 8.26 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 115%	126
Figura 8.27 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento	126
Figura 8.28 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2	127
Figura 8.29 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4	127
Figura 8.30 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6	127
Figura 8.31 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7	128
Figura 8.32 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) posicionamento das seções finais dos segmentos; para carga 130%. 129	
Figura 8.33 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento	129
Figura 8.34 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2	130

Figura 8.35 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4.....	130
Figura 8.36 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6.....	130
Figura 8.36 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7	131
Figura 8.38 - Valor do Coeficiente K por segmento, para as simulações do enrolamento de AT	134
Figura 8.39 - Valor do Coeficiente K por segmento, para as simulações do enrolamento de BT	134
Figura 9.1 - Valores de hotspot do enrolamento de AT para variação de temperatura de óleo no fundo do tanque em diferentes condições de carregamento	142
Figura 9.2 - Valores de hotspot do enrolamento de BT para variação de temperatura de óleo no fundo do tanque em diferentes condições de carregamento	143

SUMÁRIO:

1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE TEMPERATURAS EM TRANSFORMADORES.....	23
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	23
1.2 DIFICULDADES PARA A OBTENÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS TRANSFORMADORES	24
1.3 MODELAGEM NUMÉRICA PARA O APERFEIÇOAMENTO DOS MODELOS.....	27
1.4 TRABALHOS CORRELATOS.....	27
1.5 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS COM O DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS DA TESE	29
1.6 DISTRIBUIÇÃO DO TRABALHO.....	30
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O FENÔMENO DE TROCA DE CALOR NO INTERIOR DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	33
2.1 INTRODUÇÃO	33
2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES.....	33
2.3 ANÁLISE DO PROBLEMA DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR	38
2.4 PROBLEMA DE TROCA DE CALOR ANALISADO	40
2.5 FONTES DE GERAÇÃO DE CALOR NO INTERIOR DO TRANSFORMADOR	41
2.6 AVALIAÇÃO DAS PERDAS – LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS.....	47
2.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE OS MATERIAIS NO INTERIOR DO TRANSFORMADOR.....	49
2.8 ACOPLAMENTO ENTRE AS SOLUÇÕES DO PROBLEMA ELETROMAGNÉTICO E DO PROBLEMA TÉRMICO.....	53
2.9 CONCLUSÕES	55
3 REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO TRANSFORMADOR	57
3.1 INTRODUÇÃO	57
3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	58
3.3 RESULTADOS.....	60
3.4 CONCLUSÕES	62

4 ANÁLISE DO FLUXO MAGNÉTICO EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO O MEF - EFCAD..... 64

4.1	INTRODUÇÃO	64
4.2	BREVE INTRODUÇÃO AO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	65
4.3	APRESENTAÇÃO DO EFCAD	65
4.4	SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO O EFCAD.....	66
4.5	LEVANTAMENTO DA GEOMETRIA DO TRANSFORMADOR E MONTAGEM DA ESTRUTURA 2D	67
4.6	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	70
4.7	DEFINIÇÃO DAS FONTES DE CORRENTE PARA SIMULAÇÃO	72
4.8	RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO O EFCAD.....	73
4.9	LEVANTAMENTO E UTILIZAÇÃO DAS GRANDEZAS OBTIDAS COM A SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	78
4.10	CONCLUSÕES.....	79

5 ANÁLISE TERMODINÂMICA DA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM TRANSFORMADORES..... 80

5.1	INTRODUÇÃO	80
5.2	CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)	80
5.3	BREVE INTRODUÇÃO SOBRE O ANSYS WORKBENCH.....	81
5.4	ANÁLISE DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO CFD 81	
5.5	LEVANTAMENTO DA ESTRUTURA DO TRANSFORMADOR E OBTENÇÃO DA GEOMETRIA 3D	82
5.6	RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO A SIMULAÇÃO 3D ANSYS-CFX.....	89
5.7	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO	93
5.8	LEVANTAMENTO DAS GRANDEZAS DE INTERESSE	93
5.9	CONCLUSÕES	94

6 RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DA NORMA IEEE C57.91..... 96

6.1	INTRODUÇÃO	96
6.2	DEFINIÇÕES E CONCEITOS.....	96

6.3	CÁLCULO DA TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DE ACORDO COM A IEEE C57.91	97
6.4	RESULTADOS PARA AS TEMPERATURAS DO TRANSFORMADOR A PARTIR DO MÉTODO PROPOSTO PELA IEEE	99
6.5	CONCLUSÕES	99
7	METODOLOGIA PARA O CÁLCULO “ON-LINE” DE ELEVÇÃO DE TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR ATRAVÉS DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	102
7.1	INTRODUÇÃO	102
7.2	CÁLCULO ANALÍTICO CONVENCIONAL DA CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO DO TRANSFORMADOR	102
7.3	MODELAGEM DAS CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO PARA CÁLCULO EM TEMPO REAL UTILIZANDO OS PARÂMETROS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	106
7.4	COMENTÁRIOS SOBRE O MÉTODO PROPOSTO	109
8	RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA	111
8.1	INTRODUÇÃO	111
8.2	GEOMETRIA DO TRANSFORMADOR	111
8.3	CASOS ANALISADOS.....	112
8.4	COEFICIENTE DE ELEVÇÃO DE TEMPERATURA (K).....	132
8.5	LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE MAIOR AQUECIMENTO E GRADIENTES DE TEMPERATURA PARA CÁLCULO DO PONTO DE MAIOR AQUECIMENTO.....	134
8.6	COMPARAÇÃO DOS VALORES SIMULADOS COM OS VALORES OBTIDOS PARA O ENSAIO DE ELEVÇÃO DE TEMPERATURA	135
8.7	CONCLUSÕES	136
9	APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA ESTIMATIVA DE CÁLCULO DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO	138
9.1	INTRODUÇÃO	138
9.2	ESTIMATIVA DOS VALORES DE TEMPERATURA PARA VALORES DE CARREGAMENTO DIFERENTES DOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	139
9.3	COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O MÉTODO PROPOSTO DE CÁLCULO EM TEMPO REAL	143
9.4	CONCLUSÕES	144

10	CONCLUSÕES.....	145
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148

1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE TEMPERATURAS EM TRANSFORMADORES

1.1 Motivação da Pesquisa

Os transformadores são equipamentos construídos com a finalidade de modificar os níveis de tensão entre sistemas eletricamente isolados, utilizando a transformação de energia elétrica em energia magnética e vice-versa. Para a realização dessa função, é necessário que seu funcionamento seja confiável, pois falhas podem resultar em um grande prejuízo para a rede no qual está inserido.

Outros prejuízos, que geralmente não podem ser contabilizados, vêm de situações de não fornecimento de energia a hospitais, sistemas de drenagem de água, sistemas de sinalização de trânsito, entre outros, e que podem colocar em risco a vida de pessoas.

Um problema bastante interessante é o da necessidade de conhecimento dos níveis de temperatura no interior das bobinas e do núcleo do transformador, que são dificilmente obtidos por meio de medição direta. Na atualidade, para se conhecer as temperaturas no interior do equipamento, utilizam-se sistemas de predição analíticos, como os de imagem térmica. Porém, sabe-se que esses sistemas não fornecem uma boa estimativa dos valores de temperatura.

Devido a essas dificuldades, diversos autores e especialistas desenvolvem outros métodos que visam a obtenção das medidas internas ao transformador através de estimações com medidas indiretas. Esses métodos produzem resultados um pouco melhores que os obtidos pela medição por imagem térmica, mas não detalham precisamente as dinâmicas que ocorrem no interior do transformador, segundo Silva (2005). Esse tipo de estimativa é válido quando somente se deseja ter uma idéia da condição de aquecimento do transformador. Para um maior detalhamento das dinâmicas que ocorrem no interior do transformador, necessita-se de ferramentas muito mais poderosas para a análise das diversas peculiaridades de seus projetos. Para se atingir esse objetivo pode-se utilizar a modelagem numérica dos processos físicos, pois essa leva em conta toda a geometria do problema, sendo capaz de detalhar por completo o funcionamento do equipamento. Alguns autores como Bastos & Sadowski (2003), Preiss (2005) e Kim (2005) utilizam essa abordagem para diferentes problemas.

Nesse trabalho será abordado o problema que consiste na necessidade de efetuar a estimativa das temperaturas de trabalho no interior do transformador de potência, mais precisamente no interior do

enrolamento do transformador, mediante a modelagem matemática dos fluxos de calor, existentes entre os diversos materiais que o compõem. Esses fluxos podem ser alterados de acordo com o projeto de cada transformador e a sua condição de funcionamento, o que demonstra o quão complexo pode se tornar esse problema. No trabalho será analisado um transformador de potência, com enrolamentos do tipo disco.

Levando em conta os aspectos acima, utiliza-se o Método de Elementos Finitos para a obtenção do modelo termo-físico do problema por se tratar de um método de fácil implementação que produz excelentes resultados e que já é utilizado pelo GRUCAD por diversos anos como uma ferramenta de simulação e aprimoramento de equipamentos elétricos.

1.2 Dificuldades para a obtenção do comportamento térmico dos transformadores

A necessidade de se obter os valores de temperatura no interior do transformador de potência é um problema muito abordado pelos especialistas, usuário e fabricantes desses equipamentos. Dentre as dificuldades para obter diretamente as medidas podemos citar as seguintes (IEEE C57.91, 2003):

- A necessidade de utilizar cabos com elevada isolamento elétrica para ligar sensores internamente ao enrolamento, pois esses devem suportar o mesmo grau de isolamento do enrolamento principal;
- Necessidade de intervenção em equipamentos que já estão em operação, o que pode levar ao comprometimento da condição de operação satisfatória do mesmo;
- Dificuldade ou impossibilidade da troca dos sensores quando do defeito dos mesmos, pois a abertura do transformador compromete seu funcionamento;

Devido essas e outras dificuldades, diversos autores e especialistas desenvolvem métodos que visam a obtenção das medidas internas ao transformador através de estimações com medidas indiretas. Isto caracteriza outro problema, que consiste na necessidade de efetuar a estimativa das temperaturas de trabalho no interior do transformador de potência, mediante a modelagem matemática dos fluxos de calor, existentes entre os diversos materiais que compõem o equipamento.

1.2.1 Processo utilizado para a obtenção da temperatura por meio de modelagem analítica

O desenvolvimento de modelos que forneçam os valores de trabalho das grandezas que não podem ser medidas no interior dos transformadores (caso das temperaturas do enrolamento) já foi abordado na recomendação IEEE C57.91 (1981). Pierce (1991, 1992, 1994) tentou detalhar, de melhor forma, as considerações sobre a distribuição das temperaturas internas para os diversos modelos de transformadores e a sua influência sobre a capacidade de carregamento desses equipamentos. Esses estudos foram utilizados para a revisão feita desta recomendação.

Por se tratar de um estudo pioneiro, a maioria dos métodos baseia-se no cálculo das temperaturas internas do transformador de acordo com a recomendação IEEE C57.91 (2003), que fornece um modelo simplificado para que se possa estimar a temperatura do ponto mais quente do enrolamento e também a evolução das temperaturas em alguns pontos internos ao equipamento. Utiliza-se como entrada de dados os valores dos parâmetros típicos para o modelo do equipamento, tais como quantidade de cobre nos enrolamentos, quantidade de ferro no núcleo e condições de temperatura ambiente média na região.

Esse modelo deve ser alimentado com a temperatura de operação de diversas partes constituintes do transformador em um determinado instante de tempo (óleo, enrolamento, núcleo, etc). Alguns desses valores são obtidos por meio de medição direta e outros são estimados, podendo esses últimos não estarem refletindo a real condição de temperatura, levando a erros cumulativos na estimação das grandezas, segundo Cigre (2009).

Para o método de cálculo descrito nessa recomendação técnica são utilizados alguns parâmetros empíricos que dependem das características construtivas do transformador analisado e do tipo de refrigeração do equipamento. Esses valores são escolhidos de acordo com a experiência do especialista da área, o que pode gerar divergências na análise devido às escolhas do realizadas.

A influência desses parâmetros sobre os valores de temperatura estimados e sobre o cálculo da perda de vida útil foi analisada por Peterchuck & Pahwa (2002), sendo mostrado que uma boa escolha desses parâmetros pode beneficiar consideravelmente os resultados obtidos com o modelo adotado pela norma. Para isso deve-se saber de antemão quais as características de carga do sistema ao qual o transformador está inserido para que seja possível realizar um estudo

preliminar de modo a obter uma boa escolha dos mesmos. No entanto, quase sempre verifica-se que não existe um cuidado para a escolha desses, o que pode levar a erros consideráveis, muitas vezes contaminando em demasia as estimativas das grandezas, como mostrado por Dupont & Chaves (1999).

Na tentativa de melhor refletir as condições de temperatura interna dos transformadores, autores como Tang & Richardson (2002) e Tang *et al* (2002) tentam introduzir novas variáveis à modelagem térmica. Nesses trabalhos observa-se a preocupação no tratamento das incertezas e inclusão de outras variáveis que podem ser a temperatura ambiente, pressão atmosférica, velocidade do vento dentre outros parâmetros, os quais influenciam diretamente na condição operativa e de aquecimento do transformador. Isso demonstra que realmente para algumas aplicações onde temos o transformador sendo solicitado acima de suas condições de projeto, a norma não se aplica com eficiência, necessitando para isso modelos mais detalhados e cuidadosos.

Alegi & Black (1990) e Silva (2005), já prevendo essa dificuldade, desenvolvem um modelo térmico para o transformador onde incluem algumas grandezas antes não tratadas, como a incidência solar, temperatura variável do ar e demonstram as variações dos resultados para alguns dos valores de temperatura quando da presença desses elementos.

Outros trabalhos, como o realizado por Swift (2001), mostram como se pode partir do modelo térmico do transformador e por analogias, elaborar um equivalente elétrico que tenha a mesma forma de resposta no tempo. Neste artigo o autor também realiza uma comparação com a norma IEEE C57.91 (1995) e mostra a divergência dos resultados dos valores de temperaturas para valores diferenciados de carga de acordo com a escolha de alguns parâmetros presentes na norma, sendo que os resultados obtidos para a modelagem foram avaliados em campo.

O modelo elaborado por Radakovic & Feser (2003) também faz uso de analogias elétricas e térmicas, sendo que a diferença principal é a investigação realizada na geometria do enrolamento, analisando vários pontos no seu interior, visando verificar quais são os que contêm uma maior probabilidade de estarem sujeitos a sobreaquecimento.

Apesar dessas tentativas de melhorar o modelo de aquecimento do transformador, todos os métodos citados não fornecem subsídios para que se obtenha um retrato das temperaturas no interior do transformador e seja utilizado tanto como uma ferramenta para o projeto de novos transformadores quanto para a operação dos mesmos. Para que esse objetivo seja alcançado, pode-se realizar um estudo por meio de

métodos numéricos. A seguir será mostrado o Método de Elementos Finitos como uma possível ferramenta para resolver esse problema.

1.3 Modelagem numérica para o aperfeiçoamento dos modelos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que surgiu na década de 50 para a solução de um problema aeronáutico. Sua utilização é de grande flexibilidade e eficiência para a resolução de problemas de difusão de campos e a implementação consiste na discretização do espaço de análise em pequenas partes, denominadas “elementos finitos” utilizando condições de contorno conhecidas para a solução de equações diferenciais, conforme Ida & Bastos (1997).

Com o avanço dos computadores e o aumento de sua capacidade de armazenagem houve um aumento no interesse de resolução de problemas em engenharia utilizando essa técnica. Os maiores avanços se concentraram em rotinas para a solução em duas dimensões, porém, atualmente já é possível se obter excelentes resultados utilizando a formulação em três dimensões, aliados a um bom desempenho computacional.

Muitos são os autores que tratam da implementação do MEF, dentre eles pode-se citar Zienkiewicz (1983), Ida & Bastos (1997), Bastos & Sadowski (2003). Esses autores apresentam a implementação desse método para as diversas áreas da engenharia como o eletromagnetismo, análise de esforços em estruturas, análises térmicas, fenômenos de transporte entre outras.

1.4 Trabalhos Correlatos

Os transformadores são dispositivos de grande interesse bem como de grande complexidade para a análise de seu funcionamento. Sob o prisma deste trabalho, existem diversos autores que abordam o estudo desse equipamento, porém na sua grande maioria, tratam o problema ou de forma analítica ou em duas dimensões (2D).

Um estudo interessante envolvendo a análise dos transformadores de potência em 2D foi abordada por Wakil et. al. (2006), no qual avalia-se a transferência de calor no interior das bobinas dos transformadores, simulando seis estruturas diferentes para o modelo do enrolamento. Essas estruturas consideram desde o enrolamento como sendo composto de condutores de cobre nu, até a consideração da isolação em papel e de alguns espaçadores também. Os resultados obtidos demonstram que o aumento da velocidade do fluido no interior do enrolamento faz com

que as temperaturas sejam diminuídas. Outro resultado interessante mostra que as maiores temperaturas encontram-se na parte superior do enrolamento, devido ao fato de que o óleo está mais aquecido e a eficiência da troca de calor é diminuída, como já havia sido mostrado em Silva (2005).

Estudos mais completos também em 2D sobre os fluxos de óleo no interior do enrolamento do transformador foram realizados por Mufuta & Van Den Bulck (2000, 2001), no qual foram simuladas diferentes condições de fluxo para um transformador com enrolamento do tipo em disco. Esses estudos mostram o comportamento do fluxo de óleo no interior das bobinas e da troca de calor entre o enrolamento e o óleo.

Autores como Van Der Veken & Declerq (1999) utilizaram a simulação numérica em 2D de parte do enrolamento para obter a condição de aquecimento do ponto mais quente do enrolamento, obtendo valores próximos dos obtidos experimentalmente para transformadores com sobrecarga de corrente.

Outra forma de se analisar a condição térmica de um transformador foi feita por Susa et. al. (2005), no qual faz-se uma modelagem analítica do problema, tomando-se como dados de entrada os valores de ensaio realizados no equipamento. Essa forma de análise pode fornecer bons resultados, porém sua generalização não é feita de forma usual e o modelo não é facilmente estendido a todas as famílias de transformadores. Outra dificuldade é que, devido ao caráter não linear dos materiais empregados, para que se tenha um retrato razoavelmente bom do equipamento, deve-se realizar os ensaios em uma grande gama de frequência e diferentes condições de carga, o que pode gerar custos significativamente altos.

Diversas são as literaturas que tratam da resolução de problemas eletromagnéticos, dentre os quais pode-se citar Ida & Bastos (1997), Bossavit (1991), Bastos & Sadowski (2003), Bastos & Sadowski (2014), que mostram as diversas aplicações do MEF para a solução de problemas de campos eletromagnéticos em equipamentos elétricos. Dentre as ferramentas para a resolução desses problemas pode-se citar as desenvolvidas pelo Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) da Universidade Federal de Santa Catarina, que são o sistema EFCAD, para tratar problemas em 2D e o sistema FEEDCAD para tratar problemas em 3D.

Alguns autores sugerem a utilização da simulação numérica com o acoplamento entre as grandezas térmicas e as elétricas do transformador. Tang et al. (2006) realiza uma macro análise da

convecção no tanque do transformador, não detalhando os enrolamentos e os radiadores. Preis, Biro et. al. (2006) realizaram a simulação em 2D de aquecimento pela geração de correntes parasitas induzidas no tanque do transformador pela corrente que passa nas buchas. Rosas, Moraga et. al. (2005) fazem a simulação utilizando o algoritmo SIMPLE para fazer uma análise térmica de um transformador de 75 kVA e recomenda a adição de moto-bombas para melhorar a refrigeração de pontos críticos no interior deste equipamento.

Lefevre, Miegerville et. al. (2005) realizam a simulação em 2D utilizando o caso de um transformador do tipo seco, com a aplicação de uma carga não linear para obter os valores de aquecimento e seu comportamento perante a esta carga.

Driessen, Belmans et. al. (2002) propõem uma metodologia para a simulação eletro-térmica, levando em consideração as diferenças entre as constantes de tempo elétricas e térmicas.

Rodger, Lai et. al.(2001) mostram a possibilidade de resolver problemas de dispositivos eletromagnéticos utilizando o MEF. Hameyer, Henrotte et. al. (2004) discutem alguns dos problemas que podem ser resolvidos com o MEF e também as dificuldades que podem ser encontradas. A análise de algumas simplificações no modelo e suas influências são analisadas por Da Silva & Bastos (2015).

Bensaid, Trichet et. al. (2005) utiliza a formulação em três dimensões (3-D) para resolver o problema de aquecimento indutivo de uma material compósito.

Outros autores utilizam o MEF para realizar a simulação somente das condições de geração de perdas em máquinas e chapas de aço elétrico. Dular, Gyselink, et. al. (2007) utilizam o MEF para o cálculo de correntes parasitas em pacotes de placas metálicas empilhadas, enquanto que Abbaszadch, Gholaman et. al. (2006) fazem a consideração da curva B-H para modelar as perdas no núcleo de transformadores de potência.

1.5 Contribuições esperadas com o desenvolvimento dos trabalhos da Tese

Aborda-se neste trabalho a utilização de cálculo numérico utilizando o Método de Elementos Finitos que trate o problema do cálculo da indução magnética em duas dimensões e utilizando o método de volumes finitos para o cálculo térmico em três dimensões, a fim de detalhar com a maior precisão possível as grandezas térmicas e eletromagnéticas responsáveis pelo funcionamento do transformador de potência e capaz de ser utilizada para efetuar aprimoramentos e

descrever melhor o funcionamento desses equipamentos. Como principais contribuições dessa tese tem-se:

- a) Implementação do Transformador de Potência com a utilização do MEF de modo a obter os valores de campos magnéticos e induções no núcleo, visando a aplicação no levantamento das perdas por equação analítica e demonstrando as considerações utilizadas na modelagem;
- b) Simulação do Transformador de Potência com a utilização de código CFD (“*Computational Fluid Dynamics*”) de modo a obter os valores de temperatura das partes envolvidas e os perfis de velocidade do óleo no interior do transformador, inclusive a determinação do “Hot-Spot” para Transformador de Potência que possuam a condição de circulação de óleo em fluxo dirigido. Nessa implementação serão demonstradas quais as dificuldades e quais parâmetros podem ser suprimidos bem como seus impactos sobre a simulação;
- c) Comprovação dos resultados obtidos nas simulações com a comparação com resultados experimentais realizados sobre um modelo de transformador de potência.
- d) Elaboração de uma metodologia para cálculo analítico para a aplicação em monitoramento em tempo real das temperaturas no interior do enrolamento do transformador, utilizando os parâmetros extraídos das simulações através do EFCAD e do CFD e a comparação com os valores obtidos pela rotina de cálculo recomendada pela IEEE C57.91 de 95.
- e) Como objetivo principal, será elaborado um método de cálculo analítico que utilize os parâmetros obtidos com as simulações e produza valores de temperatura próximos dos realmente existentes no interior do transformador, sem depender necessariamente da realização do ensaio de elevação de temperatura e da experiência do especialista em transformadores.

1.6 Distribuição do trabalho

O trabalho está distribuído em 11 capítulos, sendo que o Capítulo 1 possui a introdução ao problema analisado, motivações e sua contextualização e no Capítulo 11 estão listadas as principais referências

consultadas e citadas no texto. Os demais capítulos estão distribuídos em:

- Capítulo 2: mostra as informações relacionadas a geometria do transformador e as possibilidades de variação dependendo das características elétricas e sistemas a serem alimentados. Também são trazidas informações relacionadas às perdas do equipamento e principais formas de se fazer sua avaliação. Também é explanado com se realiza a transferência de calor no interior do transformador, relacionando-se suas características elétricas e térmicas e mostrando-se a necessidade de acoplamento entre as soluções;
- Capítulo 3: nesse capítulo está mostrado o procedimento de ensaio realizado no transformador para a aquisição direta das temperaturas, utilizando medição com fibra ótica em quatro pontos no interior do transformador para cada enrolamento, sendo que dois pontos monitoram a temperatura do óleo e dois pontos monitoram a temperatura do enrolamento. Os dados medidos e tabelados são necessários para realizar a comprovação das simulações numéricas realizada no Capítulo 9;
- Capítulo 4: estão agrupadas as informações necessárias para se realizar a simulação numérica de campos eletromagnéticos do transformador, foram agrupadas as informações dos materiais utilizados e da geometria analisada. As simulações realizadas no capítulo são necessárias para se obter os valores de perdas nos enrolamentos e núcleo, além de serem necessárias as avaliações com relação a parcela de campo magnético disperso na parte superior do enrolamento, que pode atuar no sentido de aumentar as perdas nessa região e, conseqüentemente, aumentar os valores de temperatura desse componente;
- Capítulo 5: estão agrupadas as informações necessárias para se realizar a simulação numérica termodinâmica do transformador, foram agrupadas as informações dos materiais utilizados e da geometria analisada. São mostrados os componentes considerados na simulação

e os dados de entrada considerados para os modelos de troca de calor e escoamento do óleo no transformador;

- Capítulo 6: mostra o procedimento de cálculo e os valores obtidos para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, considerando a norma IEEE C57.91, também está mostrada a ficha de ensaio utilizada para se extrair os parâmetros utilizados no cálculo da norma;
- Capítulo 7: mostra como pode ser feito o cálculo analítico de aquecimento do transformador e de seus componentes e também aborda as dificuldades de aplicação desse cálculo a geometrias mais complexas. No item 7.4 está descrita a proposta de adaptação do cálculo analítico, utilizando os resultados da simulação numérica para parametrizar o modelo;
- Capítulo 8: estão mostradas as geometrias simuladas para a extração dos parâmetros necessários para o cálculo analítico proposto mostrado no Capítulo 7. Os resultados para diferentes condições de carregamento do transformador foram comparados aos dados da medição com fibra ótica mostrada no Capítulo 3. Esses dados são utilizados no Capítulo 9 para estimar condições de carregamento diferentes das simuladas numericamente;
- Capítulo 9: mostra como deve ser realizada a estimativa de cálculo do ponto mais quente do enrolamento para condições de carregamento não simulados numericamente e sua aplicação a condição de monitoramento em tempo real;
- Capítulo 10: possui as principais conclusões com relação as simulações e estimativa de temperatura em tempo real, além de listar as contribuições e propostas para trabalhos futuros que possam contribuir para o aprofundamento ao assunto abordado na no trabalho.

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O FENÔMENO DE TROCA DE CALOR NO INTERIOR DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

Neste capítulo será feita uma abordagem sobre as principais características do transformador de potência de modo a contextualizar o problema de elevação de temperatura do equipamento. Serão descritos os fatores que influenciam esse fenômeno.

2.2 Aspectos construtivos e elétricos dos transformadores

Os transformadores de potência são construídos de acordo com as especificações da sua condição de operação e do local no qual será instalado.

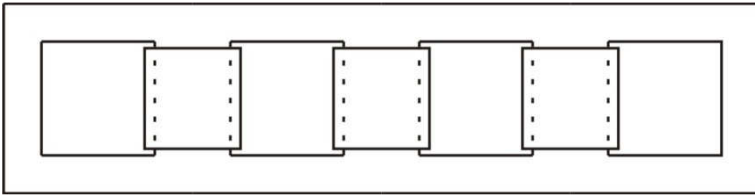
No caso desse estudo, analisam-se somente transformadores de potência com resfriamento por convecção natural do óleo no interior do equipamento. Essa é a condição da maioria dos transformadores que existem em operação atualmente.

Os modelos utilizados para a aplicação e construção de transformadores obedecem a alguns critérios pré-definidos. Basicamente podem-se classificar os modelos de núcleo e de enrolamentos com os seguintes critérios:

2.2.1 Modelos de núcleo:

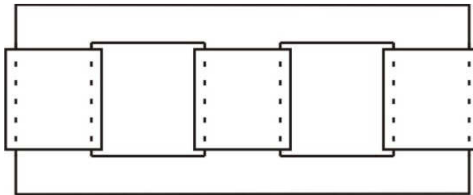
Nos transformadores de potência, utiliza-se basicamente dois tipos de núcleo:

Núcleo tipo “Shell-type”: núcleo do tipo envolvente, no qual a bobina é envolta pelo núcleo por meio das colunas adicionais laterais (figura 2.1). Para transformadores de baixa potência faz-se a construção do núcleo utilizando-se chapas aço de grande comprimento, que são montadas no interior das bobinas já prontas. Para transformadores de grande potência, o núcleo é composto por chapas inseridas em bobinas prontas e faz-se o fechamento da culatra superior. Esse tipo de núcleo possui características próprias com relação ao seu comportamento sob transitórios de tensão e condições de curto circuito. Sua principal desvantagem é que se necessita de mais material ferromagnético que o núcleo do tipo “core” e as dimensões finais do transformador tendem a ser maiores.

Figura 2.1 - Núcleo “*Shell-type*”

Fonte: do autor (2015)

Núcleo tipo “*Core*”: núcleo do tipo envolvido, no qual o fechamento do circuito magnético é realizado somente pelas colunas dos demais enrolamentos (figura 2.2) e não possui colunas laterais adicionais.

Figura 2.2 - Núcleo “*Core-type*”

Fonte: do autor (2015)

2.2.2 Modelos de enrolamentos

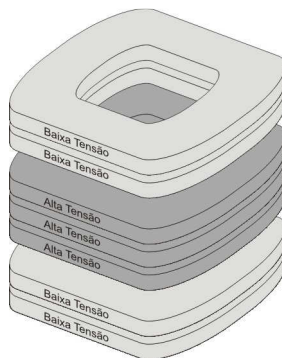
O tipo de enrolamento varia de acordo com as características de tensão e carga que o transformador deve suprir. Podem-se ter diversas configurações de enrolamentos, porém as mais utilizadas são as seguintes:

- Enrolamento do tipo panqueca (“*pancake-type*”): é uma denominação geralmente utilizada para enrolamentos para transformadores com núcleo do tipo “*shell*”, os fios são enrolados de forma espiral, obtendo os pacotes que são empilhados como na figura 2.3.

Figura 2.3 - (a) Enrolamento; (b) Disposição dos pacotes tipo panqueca



(a)



(b)

Fonte: (a) Harlow (2004), (b) do autor (2015).

- Enrolamento por camada (“*layer-type*”): a disposição dos enrolamentos é feita em camadas enroladas diretamente sobre o molde e os espaçadores como na figura 2.4. Pode-se fazer diversas camadas umas sobre as outras e se utilizar condutores em paralelo no caso de correntes mais elevadas. Geralmente esse tipo de configuração é utilizada em enrolamentos de baixa tensão devido à condição de tensão às quais o enrolamento está submetido.

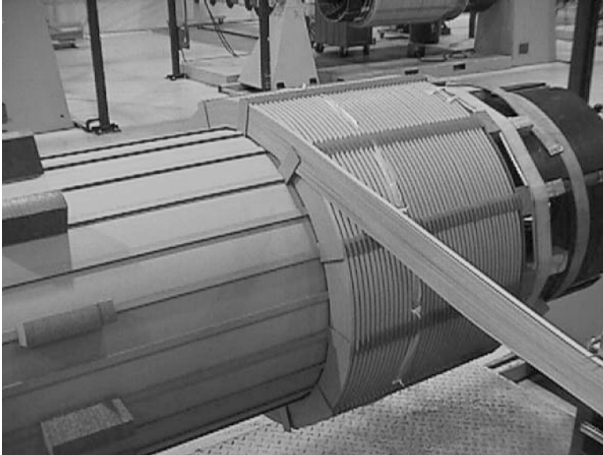
Figura 2.4 - Construção do enrolamento por camada



Fonte: Harlow (2004)

- Enrolamento helicoidal (“*helical-type*”): é utilizado para situações onde se tem altas correntes. Neste tipo de enrolamento são utilizados fios empilhados, enrolados de uma só vez sobre o molde do enrolamento (figura 2.5).

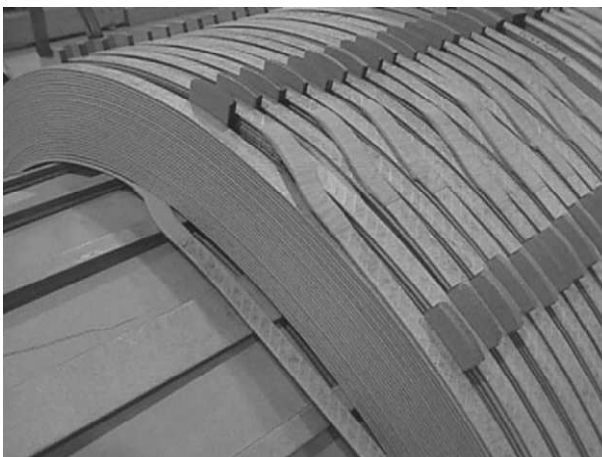
Figura 2.5 - Enrolamento do tipo Helicoidal



Fonte: Harlow (2004)

- Enrolamento do tipo disco (“*disc-type*”): é uma disposição de enrolamento muito utilizada quando se tem elevadas tensões envolvidas. Nesta disposição, um único cabo (pode ser somente um fio de cobre ou diversos fios empacotados) é enrolado sobre o molde de forma a obter uma espiral concêntrica. Diversas espirais são espaçadas horizontalmente sobre o molde e o final de cada espiral é ligada ao início da espiral seguinte (transposição ou “*cross-over*”), formando um único circuito com várias espirais. A figura 2.6 mostra o aspecto do enrolamento tipo disco.

Figura 2.6 - Enrolamento tipo disco

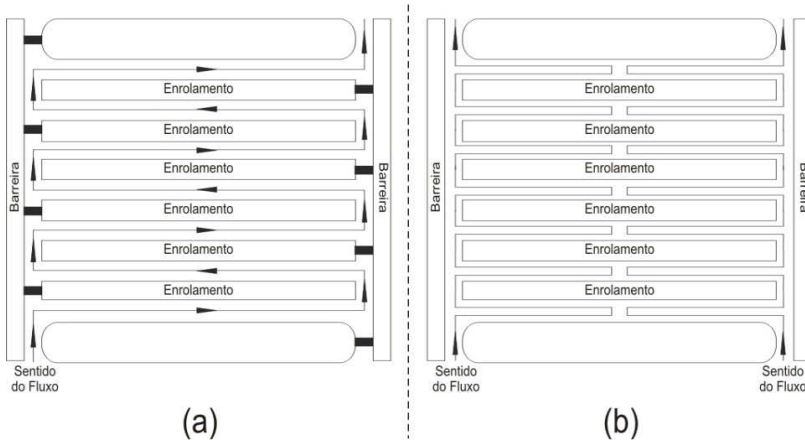


Fonte: Harlow (2004)

2.2.3 Refrigeração dos enrolamentos

Em todos os modelos de enrolamento mostrados no item anterior, a geração de calor devido às perdas no equipamento deve ser retirada de modo a diminuir a elevação de temperatura dos componentes. A técnica geralmente utilizada é a de direcionar o óleo para dentro do enrolamento, perfazendo um caminho da extremidade inferior para a extremidade superior do enrolamento, por convecção natural ou forçada por meio de bomba de óleo. Ainda podem ser utilizadas barreiras, como pode ser visto na figura 2.7 (a), aumentando a eficiência da troca de calor entre o enrolamento e o óleo. A figura 2.7 (b) mostra a situação em que não ocorre o direcionamento do fluxo de óleo no interior do enrolamento.

Figura 2.7 - (a) Fluxo direcionado; (b) Fluxo não-direcionado



(a) Fonte: do autor (2015)

(b)

2.3 Análise do problema de elevação de temperatura do transformador

Considerando que esse trabalho está limitado ao estudo do aquecimento gerado pela parte ativa do transformador (enrolamento e núcleo), pode-se analisar o problema da troca de calor entre o enrolamento e o óleo que passa por entre os dutos de refrigeração. Esse problema é de extrema importância, pois, a maior limitação para o carregamento do transformador vem do fato de que o papel (ou qualquer outro material) que envolve o fio de cobre que compõe a parte ativa do transformador possui um limite térmico de operação que deve ser respeitado e que limita a aplicação de carga nesses transformadores de potência.

2.3.1 Envelhecimento do material isolante do transformador

Sabe-se que a ocorrência de valores de temperatura maiores que os determinados em projeto agem de forma a degradar mais rapidamente a isolamento do transformador, diminuindo a vida útil do equipamento e tornando-o mais propenso a falhas. As equações de envelhecimento apresentadas pela IEEE C57.91 foram obtidas de maneira experimental e relacionam o envelhecimento do papel isolante com a temperatura de trabalho do mesmo. Basicamente consiste em uma adaptação da teoria de Arrhenius (IEEE C57.91, 1995). Lopez-Fernandes, Ertan e Turowski

(2013) fazem uma abordagem aprofundada sobre a condição de envelhecimento dos materiais isolantes do transformado, essas condições de envelhecimento podem ser representadas simplificadaamente pela equação 2.1.

$$Vida\ util = AEXP^{\left[\frac{B}{\Theta_H+273}\right]} \quad (2.1)$$

onde,

Vida útil; [pu de vida nominal]

Θ_H , Temperatura do ponto quente do enrolamento (°C);

A e *B* são constantes empíricas;

Dependendo do critério adotado para o reconhecimento do fim da vida útil, pode-se utilizar diferentes valores para as constantes *A* e *B*. No caso da IEEE C57.91. foram adotados os seguintes valores:

$$A=9,80 \times 10^{-18};$$

$$B=15000$$

Assim, com os valores acima tem-se a equação 2.2:

$$Vida\ util = 9,80 \times 10^{-18} EXP^{\left[\frac{15000}{\Theta_H+273}\right]} \quad (2.2)$$

A equação 2.2 pode ser utilizada para o cálculo da vida útil no caso de se ter a temperatura do ponto mais quente constante para todo o intervalo de tempo de operação. Como no caso real esta temperatura varia com o tempo, deve-se calcular o envelhecimento para intervalos de tempo menores, para os quais a temperatura é considerada constante. Tem-se assim o fator de aceleração de envelhecimento, descrito pela equação 2.3:

$$F_{AA} = EXP^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\Theta_H+273}\right]} \quad (2.3)$$

onde,

F_{AA} é o fator de aceleração do envelhecimento para um determinado intervalo de tempo.

Com isto, para o cálculo da perda de vida útil total tem-se a equação 2.4:

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \cdot \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (2.4)$$

onde,

F_{EQA} , é o fator total de envelhecimento no período de tempo

n , é o índice do intervalo de tempo, t ,

N , número total de intervalos de tempo

F_{AA_n} , é o fator de aceleração do envelhecimento devido a temperatura existente no intervalo de tempo Δt_n ;

Δt_n , intervalo de tempo em horas;

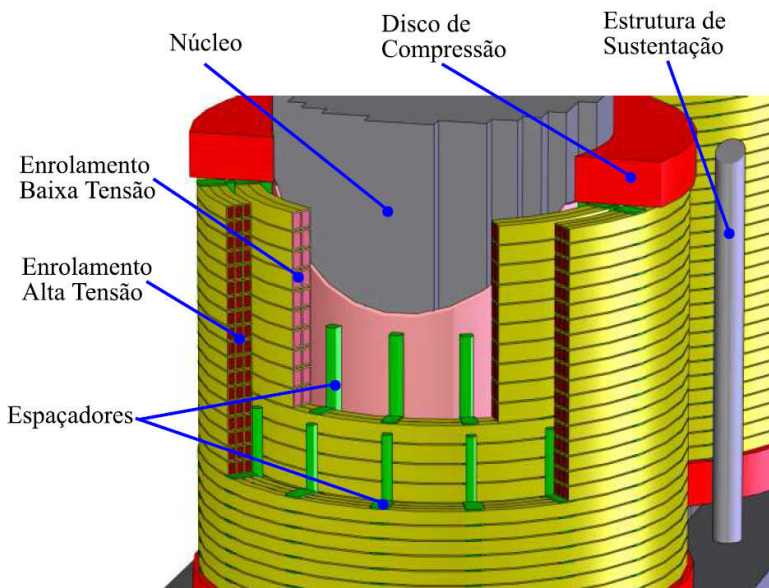
Acumulando o fator total de envelhecimento pode-se obter a quantidade de perda de vida para cada ciclo de carga.

Com base nessas equações, observa-se que a grandeza física que influencia na perda da vida útil é a temperatura do ponto quente do enrolamento (Θ_H), conforme a equação 2.3. Por exemplo, se tivermos o valor de $\Theta_H = 110^\circ\text{C}$, o valor do fator de aceleração do envelhecimento será de 1, ou seja, para 1h trabalhada tem-se a redução de 1h na vida útil do equipamento. No caso de $\Theta_H = 100^\circ\text{C}$, o valor do fator de aceleração do envelhecimento será de 0,90 e cada 1h trabalhada corresponderá a 54min de redução na sua vida útil.

2.4 Problema de troca de calor analisado

Nesta etapa, restringe-se o problema a ser analisado como sendo o de trocas de calor existentes no interior do enrolamento para que seja possível determinar qual o valor da temperatura do ponto mais quente e se possa estimar o envelhecimento do transformador. Nesse momento analisa-se um modelo de equipamento que possui os enrolamentos de baixa tensão com configuração do tipo “Layer” e os enrolamentos de alta tensão com configuração do tipo “disco”, com fluxo de óleo direcionado por barreiras em ambos enrolamentos. A configuração do núcleo é do tipo “core-type”. A figura 2.8 mostra uma vista em corte esquemática dos componentes do enrolamento.

Figura 2.8 - Vista em corte de um enrolamento de transformador



Fonte: Aguiar (2007)

Para se obter os valores de elevação de temperatura deve-se caracterizar as fontes de calor existentes no interior do transformador. Lopez-Fernandes, Ertan e Turowski (2013), fazem uma análise detalhada das fontes de existentes no transformador e sua influência no aquecimento, Elmoudi (2006) faz a avaliação de perdas nas colunas do transformador e nas chapas estruturais de sustentação, para diferentes configurações de equipamentos e enrolamentos. Para aplicação neste trabalho, descreve-se a seguir as grandezas de interesse e como são levantadas.

2.5 Fontes de geração de calor no interior do transformador

Considera-se que a geração da energia térmica é alimentada exclusivamente pelas perdas internas do equipamento. Com isso não foi considerada a parcela de energia térmica proveniente do ambiente, no caso da incidência da radiação solar. Esta simplificação é aceitável, pois o ensaio de elevação de temperatura é realizado em ambiente abrigado e a radiação solar não possui influência sobre o conjunto. Assim, as perdas consideradas com influência na elevação de temperatura do transformador são as seguintes:

- Perdas devido à corrente nos enrolamentos (P_J)
- Perdas no núcleo (P_h)
- Perdas adicionais, produzidas pelas correntes induzidas nas diversas partes metálicas que compõem o transformador, devido ao fluxo disperso (P_a).

Assim a perda total (P_T) no transformador pode ser dada pela equação 2.5:

$$P_T = P_J + P_h + P_a \quad (2.5)$$

2.5.1 Perdas Joule devido à corrente nos enrolamentos

Para o cálculo das perdas nos enrolamentos, parte-se da premissa de que a geração de perdas nos enrolamentos devido a correntes induzidas pelo campo transversal que atravessa a bobina é relativamente pequena em relação à corrente de condução principal. Assim, o principal efeito responsável pelo aquecimento no enrolamento dos transformadores é devido à circulação das correntes pelo enrolamento e a dissipação de calor pelo efeito Joule, a avaliação dessas perdas é feita pela equação 2.6:

$$P_J(t) = r [I(t)]^2 \quad (2.6)$$

onde,

$P_J(t)$ - perdas Joule (W)

r - resistência efetiva do enrolamento (ohms)

$I(t)$ - corrente circulante pelo enrolamento (A)

A equação 2.6 fornece o valor da perda para um determinado instante de tempo. Considerando a corrente na forma senoidal que é a utilizada em equipamentos de transformação, na forma $I(t) = I_0 \text{ sen } \omega t$ (com I_0 sendo a amplitude em Amperes e ω a sua pulsação em rad/s), tem-se que a média da potência da perda é dada por $P_m = r I_0^2 / 2$, observando que o valor médio de sen^2 é $1/2$.

2.5.2 Perdas no núcleo

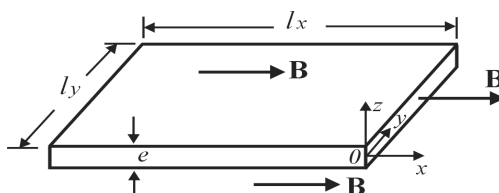
Existem dois tipos de perdas presentes no núcleo dos equipamentos elétricos. Uma parcela é devido às perdas geradas pelas correntes de Foucault, que são transformadas em calor por efeito Joule em cada chapa do núcleo e outra parcela devido ao ciclo de histerese do material.

2.5.2.1 Perdas no ferro: correntes de Foucault em lâminas (BASTOS, 2004)

Em um núcleo de material ferromagnético, submetido a campos variáveis, há formação de anéis de correntes induzidas. Normalmente, o núcleo é laminado com o objetivo de impedir a circulação totalmente livre dessas correntes e as chapas recebem um revestimento de material isolante, geralmente com espessura de alguns microns, para evitar a formação de caminhos de corrente entre as chapas. Mesmo essa técnica não garante que tenha-se a extinção da corrente Foucault e haverá uma parcela de perdas devido a corrente induzida na chapa, propiciando perdas pelo efeito Joule (BASTOS, 2004).

Considere o caso da Fig. 2.9, onde temos uma fina chapa ou lâmina de material ferromagnético na qual existe uma indução variável B , paralela à chapa na direção O_x .

Figura 2.9 - Lâmina de material ferromagnético com indução magnética variável



Fonte: Bastos (2004)

Será feita a suposição que a chapa é muito fina, ou seja largura l_x e l_y são muito maiores que a espessura e , assim, as correntes induzidas não afetarão o fluxo B imposto. Com alguns desenvolvimentos matemáticos e considerações chega-se na equação das perdas (ou potência dissipada por efeito Joule) (BASTOS, 2004).

$$P_f(t) = \frac{\sigma}{2} \omega^2 B_m^2 (\text{sen} \omega t)^2 e^2 V \quad (2.7)$$

Lembrando novamente que o valor médio de sen^2 é $\frac{1}{2}$, obtem-se a perda volumétrica $p_f = P_f/V$ (dada em W/m^3)

$$p_f = \frac{1}{24} \sigma \omega^2 e^2 B_m^2 \quad (2.8)$$

Desta expressão deve-se observar alguns aspectos de importantes no que diz respeito a este tipo de perda:

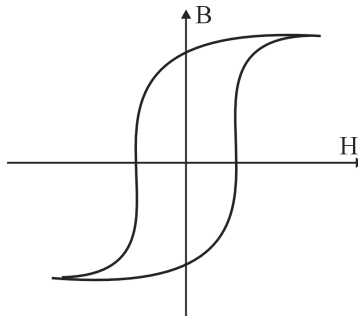
- p_f depende de e^2 , ou seja, a espessura da chapa modifica quadraticamente as perdas;
- P_f depende de ω^2 , idem para a frequência;
- os materiais apresentando baixa condutividade possuem perdas menores; a propósito, a ferrite doce, sendo um material cerâmico e isolante, é seguidamente utilizada em dispositivos que trabalham em frequências elevadas.

Como em geral a frequência é imposta pelo funcionamento do dispositivo, deve-se escolher adequadamente a espessura da chapa e o tipo de material para mitigar as perdas.

2.5.2.2 Perdas no ferro: histerese (BASTOS, 2004)

Supondo que um material ferromagnético esteja submetido a um campo magnético H , variável no tempo e periódico de frequência f (e período $T=1/f$). Como já visto, este tipo de material possui uma curva $B(H)$ que, por sua vez, tem um ciclo de histerese mais ou menos pronunciado dependendo do material. Esta curva é mostrada na Fig. 2.10.

Figura 2.10 - Ciclo de histerese de uma lâmina de material ferromagnético



Fonte: Bastos (2004)

A curva possui uma área interna relativamente grande para materiais duros (ímãs permanentes), enquanto materiais doces, como as chapas de ferro-silício, têm ciclos de pequena área. Sendo H variável (admitamos valores positivos e negativos), o material percorrerá o ciclo de histerese. Percorrer este ciclo significa fazer com que os domínios de Weiss troquem suas polaridades magnéticas, o que exige o dispêndio de uma certa quantidade de energia. A área do ciclo representa a energia

volumétrica que deve ser fornecida ao material. Isto nada mais é do que a perda por histerese, aqui dada em Joules/m^3 mas que devemos transformar em potência volumétrica, que caracteriza um dispositivo independentemente do fato de estar funcionando ou não.

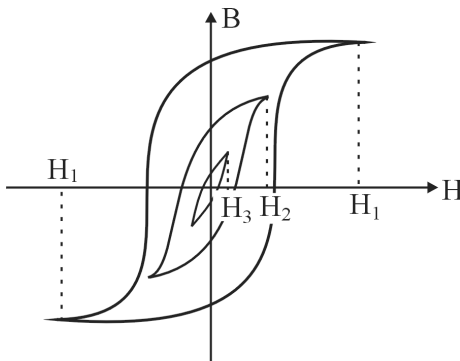
Chamando de p_h a potência volumétrica associada a um ciclo de histerese, a energia volumétrica consumida num ciclo é dada por

$$w_h = p_h T \quad \text{ou} \quad w_h = p_h / f \quad \text{o que dá}$$

$$p_h = w_h f$$

A potência total é dada pelo produto $P_h = p_h V = w_h f V$, sendo V o volume de material ferromagnético, o que, em geral, corresponde ao volume de chapas de ferro. Observa-se na Fig. 2.11 que a perda por histerese depende fortemente do valor de campo magnético e, portanto, do nível de saturação da chapa.

Figura 2.11 - Diferentes curvas de histerese para diferentes níveis de tensão



Fonte: Bastos (2004)

Se chamarmos A a área do ciclo de histerese, a expressão acima se torna

$$P_h = w_h f V = A f V \quad (2.9)$$

Para avaliar a área do ciclo de histerese pode-se utilizar o cálculo exato através de integradores gráficos de curvas, por exemplo. Existe também uma lei empírica, obtida por Steinmetz, que fornece com boa

precisão essa área. Essa expressão, conhecida como equação de Steinmetz, é válida para valores de indução magnética entre 0,2 e 1,8 Tesla. Ela fornece, de forma aproximada, a área do ciclo (em Joule/m³) e se escreve:

$$W_h = \eta B^{1,6} \quad (2.10)$$

em que η é uma constante que depende do material. Alguns valores típicos são:

- $\eta = 30$ para ligas de ferro-silício
- $\eta = 250 \sim 300$ para ligas ordinárias de ferro
- $\eta = 3,8 \sim 8,5 \times 10^3$ para materiais duros

Esta expressão continua sendo bastante utilizada por industriais sempre que uma avaliação rápida deste tipo de perdas é necessária. Os fabricantes de chapas de aço para transformadores podem também fornecer o valor de η .

2.5.3 Utilização do quadro de Epstein para obtenção das perdas nas chapas de aço silício

Para facilitar a obtenção das perdas no núcleo utiliza-se o dispositivo denominado quadro de Epstein, realizando a medição sobre uma amostra do material. A desvantagem desse método é que se obtém a perda total do núcleo para uma determinada frequência, e não as perdas individualmente discriminadas. A separação das perdas deve ser realizada utilizando algum método específico para esse fim (BATISTELA, 2001).

2.5.4 Perdas adicionais Pa

As perdas adicionais são aquelas existentes nos demais componentes do transformador que não estão considerados nos cálculos no núcleo e enrolamentos. Essas perdas são causadas quando o fluxo disperso do núcleo encontra materiais metálicos, que são passíveis de geração de correntes de Foucault. Esses materiais podem ser as chapas do tanque do transformador, parafusos de fixação, etc. A influência desse tipo de perdas tende a ser minimizada com a utilização, por parte do fabricante, de chapas de aço silício presas na parte interna do tanque

do transformador para funcionar como uma espécie de blindagem, fazendo com que o fluxo disperso se concentre nas chapas da blindagem por possuírem permeabilidade maior que a das chapas de construção do tanque, evitando a geração de perdas e calor em demasia.

2.6 Avaliação das perdas – Levantamento dos parâmetros elétricos

Conforme visto no item anterior, as perdas geradas no transformador estão concentradas na parte ativa, que inclui o núcleo ferromagnético e os enrolamentos. Essas perdas são responsáveis pelo aquecimento do transformador e variam de acordo com o nível de carregamento, excitação do transformador e frequência de funcionamento. Com base nisso é necessário se avaliar as grandezas elétricas do transformador para que seja possível avaliar suas perdas.

2.6.1 Avaliação do fluxo magnético para cálculo das perdas

A avaliação do fluxo magnético existente no transformador é necessária para, entre outros motivos, se analisar os valores de fluxo disperso e os valores de indutância presentes nos diversos componentes do transformador. Com o valor da dispersão é possível verificar os valores das perdas nas carcaças e outras estruturas. O cálculo do fluxo magnético é feito utilizando-se as equações de Maxwell. As grandezas vetoriais que caracterizam estes os fenômenos eletromagnéticos envolvidos são as seguintes: o campo elétrico \mathbf{E} , o campo magnético \mathbf{H} , a indução magnética \mathbf{B} e a densidade de fluxo elétrico \mathbf{D} . Para baixas frequências, que é o caso dos transformadores de potência, as equações de Maxwell se resumem às mostradas abaixo.

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.14)$$

onde,

t – tempo;

\mathbf{J} – densidade de corrente elétrica;

ρ - densidade de carga elétrica;

Em conjunto com as equações de Maxwell, utilizam-se as equação constitutivas abaixo.

$$\mathbf{B} = [\mu] \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (2.15)$$

$$\mathbf{D} = [\varepsilon] \mathbf{E} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{J} = [\sigma] \mathbf{E} \quad (2.17)$$

em que,

\mathbf{B}_r – Indução magnética remanente de íma permanente;

$[\varepsilon]$ – Tensor de permissividade elétrica do meio;

$[\mu]$ – Tensor de permeabilidade magnética do meio;

$[\sigma]$ – Tensor de condutividade elétrica do meio.

A partir das equações de Maxwell solucionadas, analiticamente ou com a utilização de métodos numéricos, obtêm-se os valores da indução magnética no núcleo do transformador. Para a solução desse problema em duas dimensões será utilizado o programa EFCAD.

2.6.2 Determinação das perdas no núcleo

A determinação das perdas do núcleo é uma tarefa trabalhosa e de extrema importância. Diversos autores desenvolvem algoritmos e métodos de cálculo para estimar as perdas provenientes do núcleo. A principal dificuldade é a de se obter os fluxos individuais nas chapas de aço silício laminadas e a distribuição desse fluxo. Para baixas frequências o método de Steinmetz traz bons resultados que podem ser utilizados como referência. Este método pode ser aplicado para obter as perdas e realizar a separação em perda por histerese, por correntes induzidas nas chapas (Foucault) e as perdas chamadas Anômalas, que completam o modelo de Steinmetz, conforme mostrado por Batistela (2001).

O modelo descrito no parágrafo anterior somente discrimina as perdas devido ao fluxo conhecido no interior do núcleo. Essa abordagem deixa de considerar que uma parte do fluxo magnético é disperso e alguns circuitos magnéticos são fechados no ar ou pelas paredes do tanque e blindagens do transformador. Para esse fluxo, algumas chapas estão submetidas a correntes perpendiculares e há uma geração extra de calor devido a criação de correntes Foucault nesses locais. Essa análise necessita de modelos que considerem o material e a anisotropia tanto de permeabilidade quanto de resistividade da chapa existente nas diversas direções, devido à laminação das chapas em grão orientado.

Nota-se que, para a situação descrita, a análise baseada somente no quadro de Epstein não nos permite uma análise completa das perdas, pois não contempla a geometria presente no transformador.

2.6.3 Determinação das perdas nos enrolamentos

A maior dificuldade para a determinação das perdas nos enrolamentos está no fato de que a resistência do cobre varia de acordo com a temperatura de trabalho, e como todo o conjunto sofre aquecimento, esse parâmetro deve ser atualizado diversas vezes. A equação 2.17 mostra o procedimento para atualização da resistência do cobre de acordo com a temperatura estimada.

A variação da resistividade do cobre é dada por:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.18)$$

ρ = resistividade na temperatura de interesse; ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

ρ_0 = resistividade a 0°C (para o cobre 17×10^{-7}) ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

α = coeficiente de temperatura (para o cobre 0,0040) ($^\circ\text{C}^{-1}$)

T = temperatura de interesse ($^\circ\text{C}$)

T_0 = temperatura de referência de ρ_0 (neste caso 0°C)

Assim basta-se obter a temperatura de trabalho no enrolamento para se obter a resistividade do cobre e por consequência as perdas nos enrolamentos.

2.7 Transferência de calor entre os materiais no interior do transformador

Para o cálculo das temperaturas no interior do transformador de potência é necessário avaliar os fenômenos de mecânica dos fluídos e de transferência de calor que existe no equipamento, sendo eles:

- Geração de calor nos enrolamentos, devido à existência das perdas pela circulação de correntes nos mesmos;
- Transferência de calor entre os enrolamentos e o óleo nos canais internos ao enrolamento;
- Geração de calor no núcleo, devido a perda no ferro;
- Transferência de calor entre o núcleo e o óleo circulante no interior do enrolamento;

- Transferência de calor entre o óleo e o ar exterior nos radiadores para a refrigeração do equipamento.

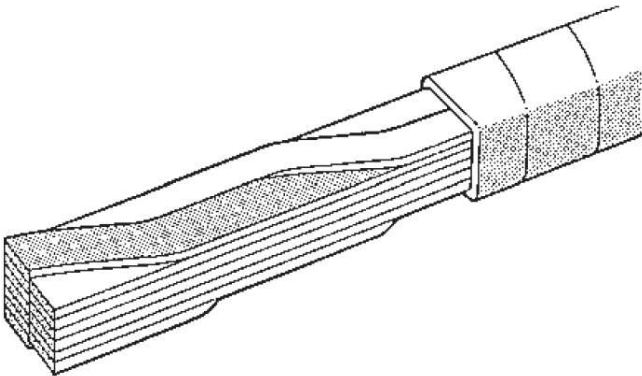
Cada um desses problemas deve ser resolvido para que se obtenha os valores de elevação de temperatura no transformador.

Nos itens seguintes serão mostradas as formas de resolução tanto para a utilização dos métodos numéricos quanto para a utilização do método analítico e como pode-se utilizar as duas metodologias para criar um modelo que possua as vantagens de cada método de solução.

2.7.1 Geração de calor nos enrolamentos

Nos enrolamentos a geração de calor ocorre principalmente pela energia dissipada por efeito Joule nos condutores de cobre. Pela necessidade de diminuir a geração de correntes parasitas devido ao campo transversal que atravessa o condutor, os mesmos são compostos de pacotes de fios em paralelo isolados entre si com a utilização de papel ou resina, de modo a se obter um conjunto de condutores que possuam capacidade de escoamento de corrente nominal do enrolamento. A figura 2.12 mostra o aspecto desse conjunto:

Figura 2.12 - Empilhamento de condutores em paralelo formando um único cabo



Fonte: Harlow (2004)

Cada um dos condutores representados na figura 2.12 possui uma parcela de geração de calor. Devido à condutividade térmica do cobre possuir um valor muito elevado e variar com a temperatura de trabalho, pode-se assumir que a temperatura em cada condutor é distribuída de

forma homogênea. Como cada condutor possui uma pequena camada de material isolante, a distribuição de temperatura pode então ser calculada pelo conceito de condução de calor, considerando a resistência térmica efetiva de cada material e realizando as associações série e paralelas necessárias.

Devido à forma geométrica do conjunto de condutores, tem-se diferentes condutividades térmicas para as direções x , y e z , resultando em uma anisotropia para o conjunto e consequentemente coeficientes de transmissão de calor diferentes nas três direções. Apesar dessa condição, nesse trabalho não será considerada a anisotropia já que é suficiente, para esta análise, considerar que todo o calor gerado no enrolamento será dissipado e retirado pelo óleo que isola e refrigera o transformador.

2.7.2 Transferência de calor entre os enrolamentos e o óleo nos seus canais internos

A distribuição das temperaturas em regime permanente do sistema pode ser determinada resolvendo a equação de Fourier-Kirchhoff (ZIELENKIEWICZ, 2002):

$$\nabla(k\nabla T) + Qv = \rho c W \cdot \nabla T \quad (2.19)$$

em que,

k é a condutividade térmica dos materiais

T representa as temperaturas

Qv representa as fontes de energia por volume

ρ representa a densidade do material

c representa o calor específico do material

W representa o vetor de velocidade do material.

Na equação (2.18), o lado direito considera o movimento de matéria. Para o caso de problemas envolvendo materiais sólidos na qual a transferência de calor se dá por condução, tem-se que o termo do lado direito da equação é igual a zero e a equação 2.18 passa a ser (INCROPERA, 2003):

$$\nabla(k\nabla T) + Qv = 0 \quad (2.20)$$

Como equações complementares à equação de Fourier-Kirchhoff, tem-se as equações da continuidade (eq. 2.20) e do momento (Navier-

Stokes) (eq. 2.21), que para fluidos Newtonianos, como no caso do óleo no interior do transformador, assumem a seguinte forma (INCROPERA, 2003):

$$\nabla W = 0 \quad (2.21)$$

$$\rho W \nabla W = F - \nabla P + \mu \nabla^2 W \quad (2.22)$$

em que,

F representa o vetor de densidade de força;

P representa a pressão;

μ representa a viscosidade dinâmica.

Para resolver o problema da troca de calor por convecção no interior do enrolamento deve-se resolver as seguintes situações:

– A equação de Fourier-Kirchhoff resolvida em sólidos e fluidos para determinada distribuição de temperaturas (combinada com a equação da continuidade e equação de Navier-Stokes);

– A equação de Navier-Stokes resolvida nos fluídos para a velocidade e pressão (combinada com a equação da continuidade);

– A equação da continuidade resolvida em fluidos para o vetor de velocidade e pressão (combinada com a equação de Navier-Stokes).

Segundo Incropera (2003), a aplicação direta dessas equações só é permitida no caso do fluxo do fluído ser considerado laminar, com baixo número de Reynolds abaixo de 2000, como na circulação natural de óleo no interior do transformador.

A solução analítica dessas equações para geometrias complexas é de difícil obtenção. Para facilitar a solução se utilizam métodos numéricos que são implementados em programas computacionais, denominados CFD (“Computational Fluid Dynamics”), que consistem em programas que obtêm a solução dos problemas envolvendo escoamento. Neste trabalho o programa utilizado será o ANSYS para a solução dos campos de concentração, velocidades, pressão, temperaturas e propriedades de escoamento.

2.7.3 Geração de calor no núcleo

A geração de calor no núcleo pode ser obtida a partir do cálculo das perdas devido à condição de operação do equipamento. Assume-se que todo calor gerado no núcleo será transmitido ao óleo por meio de convecção. Internamente ao núcleo pode-se assumir que a sua

temperatura é proporcional à indução magnética na região considerada e ao coeficiente de transmissão de calor do conjunto de chapas.

2.7.4 Transferência de calor entre o núcleo e o óleo circulante

Os conceitos aplicados para a transferência de calor entre os enrolamentos e o óleo nos dutos podem ser aplicados da mesma forma, como mostrado na seção 2.7.2.

2.7.5 Transferência de calor entre o óleo e o ar exterior nos radiadores

Na transferência de calor entre o óleo e o ar circulante entre os radiadores, podem ser considerados os mesmos conceitos aplicados transferência de calor entre os enrolamentos e o óleo nos dutos, sendo que aqui o meio refrigerante é o ar e não o óleo.

2.8 Acoplamento entre as soluções do problema eletromagnético e do problema térmico

No transformador, os problemas térmicos e eletromagnéticos possuem dependência já que os parâmetros elétricos dependem da temperatura de trabalho do material e a temperatura depende dos valores de perdas elétricas no equipamento.

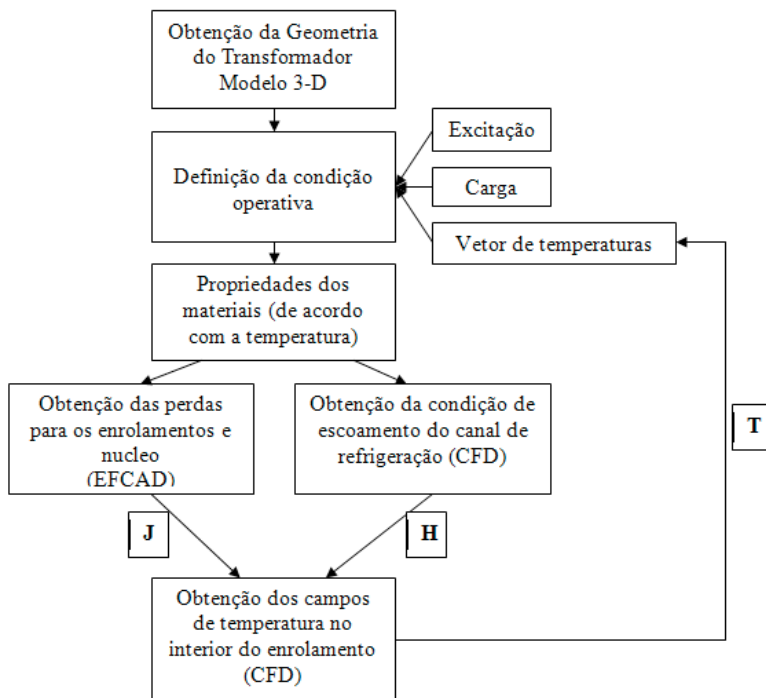
O fluxograma da figura 2.13 mostra a interação entre os cálculos. As caixas representam os seguintes passos:

- Obtenção da Geometria do Transformador (Modelo 3-D): Inicialmente deve-se obter a geometria do equipamento a ser analisado;
- Definição da condição operativa do transformador: deve considerar a condição de excitação do transformador, carga e valores das temperaturas internas iniciais do equipamento;
- Definição das propriedades dos materiais (em função da temperatura): consiste na atualização dos parâmetros dos materiais que compõem o transformador em função da temperatura inicial informada;
- Obtenção das perdas para os enrolamentos e núcleo: com a utilização do EFCAD deve-se simular a condição de operação do transformador e avaliar as perdas tanto no núcleo quanto nos enrolamentos, verificando inclusive se existe a necessidade de considerar as perdas geradas pelo campo disperso nos

enrolamentos. As perdas identificadas na simulação estão representadas por **J**;

- Obtenção da condição de escoamento do canal de refrigeração dos enrolamentos (CFD): deve-se avaliar as condições de escoamento dos canais de refrigeração para que seja possível avaliar os regimes de fluxo laminar ou turbulento, números de Nusselt e Prandt, permitindo o cálculo dos valores de velocidade e direção do óleo no interior dos canais; esse cálculo permite obter os valores dos coeficientes de transmissão de calor, representado por **H**;
- Obtenção dos campos de temperatura no interior do enrolamento (CFD): com os valores de velocidade e direção do óleo e com os valores de perdas geradas é possível calcular os valores de temperatura de regime para os diversos componentes do transformador, realimentando o modelo para a nova condição de temperatura, representado por **T**.

Figura 2.13 - Fluxograma de cálculo



Fonte: do autor (2015)

O processo de cálculo deve continuar até que os valores de temperatura encontrados não variem de uma iteração a outra de tal forma que possa ser considerado como regime permanente.

2.9 Conclusões

Neste capítulo foram abordadas algumas partes que constituem os transformadores de potência e que estão relacionadas ao problema a ser tratado no trabalho. As características de refrigeração e o problema de envelhecimento da isolamento sólida do transformador estão intimamente ligados já que a vida útil do transformador está relacionada as temperaturas de trabalho do material isolante sólida (neste caso o papel que cobre os condutores dos enrolamentos).

A definição das perdas e fontes de geração de calor no interior do transformador é um problema que depende da caracterização dos

materiais utilizados na sua fabricação e é motivo de estudo de trabalhos na área. Para o presente estudo será utilizada a medição das perdas e caracterização das chapas de aço silício que compõem o núcleo com a utilização do quadro de Epstein. Para o levantamento das perdas nos enrolamentos deve-se considerar que a resistividade do cobre varia com a temperatura o que influencia no aquecimento do transformador, pois faz variar uma importante fonte de calor.

Por fim, verificou-se que o problema térmico a ser resolvido é composto de subproblemas que foram descritos no item 2.7, levando à tentativa de solução apresentada no fluxograma do item 2.8. Os conceitos abordados no Capítulo 2 serão utilizados para obtenção das perdas e condições de troca de calor analisados no Capítulo 4 e 5.

O Capítulo 3 mostra os testes realizados no transformador de potência e que serão utilizados para a validação das temperaturas obtidas nas simulações numéricas.

3 REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO TRANSFORMADOR

3.1 Introdução

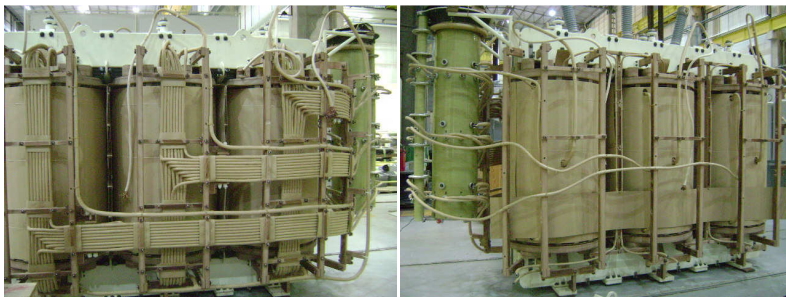
Para a comprovação dos resultados utilizando os programas EFCAD e ANSYS, é necessário realizar a comparação entre os valores obtidos para medições reais em transformadores com os valores obtidos pela simulação. As medições realizadas serão utilizadas para validar os cálculos numéricos realizados no Capítulo 8.

Neste trabalho foram realizadas as medições em um transformador de potência, com as seguintes características:

- Tensão Primária: 145kV
- Tensão Secundária: 66kV
- Potência Nominal: 80MVA
- Frequência: 50Hz
- Grupo de Ligação: Yna0d1
- Polaridade: Subtrativa

Este transformador foi escolhido por possuir níveis de tensão elevados para os quais a medição direta de temperatura já não pode ser realizada com sensores convencionais do tipo termopares. Isto encarece esse tipo de monitoramento. Outro fator importante é que para realizar as simulações é necessário que se possua o projeto completo do transformador, o que foi disponibilizado pelo fabricante para o modelo descrito. A figura 3.1 mostra a parte ativa do transformador utilizado para ensaio.

Figura 3.1 - Parte Ativa do transformador



Fonte: do autor (2015)

3.2 Procedimento de ensaio

No transformador selecionado foram realizados todos os ensaios de rotina descritos na norma ABNT NBR 5356. Entretanto, alguns dos ensaios não são de interesse para o trabalho realizado. Os que foram selecionados e acompanhados são os seguintes:

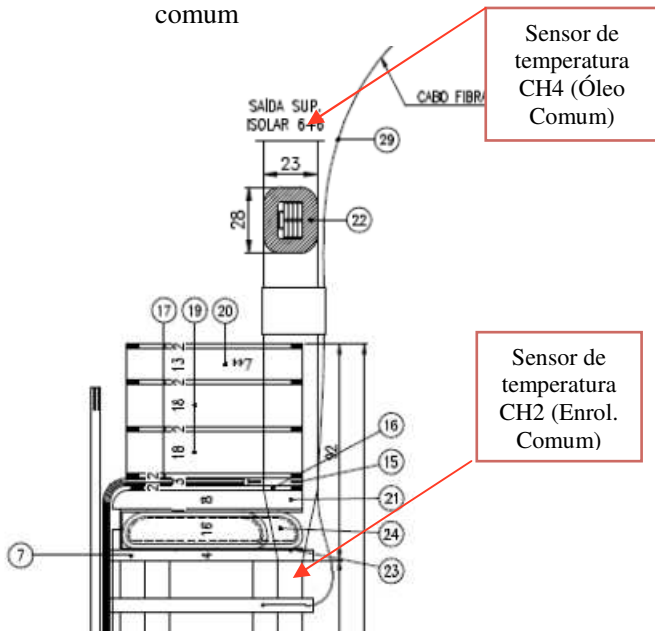
- Ensaios de perdas em carga e perdas a vazio;
- Verificação da resistência ôhmica dos enrolamentos;
- Ensaio de polaridade;
- Ensaio de elevação de temperatura.

Todos os ensaios foram realizados conforme os procedimentos indicados na norma acima, com exceção do ensaio de elevação de temperatura, que contou com a adição de 04 sensores de fibra ótica posicionados próximo ao topo da bobina da Fase B (fase central) e utilizados para a obtenção direta dos valores de temperatura. Os pontos de medição foram definidos de acordo com sugestões do fabricante e do comprador do transformador e estão descritos a seguir:

- Temperatura do óleo instalado na saída do canal AT;
- Temperatura do óleo instalado na saída do canal BT;
- Temperatura do enrolamento AT, instalado na fase central próximo ao topo do enrolamento;
- Temperatura do enrolamento BT, instalado na fase central próximo ao topo do enrolamento;
- Temperatura ambiente (sensores do tipo PT100).

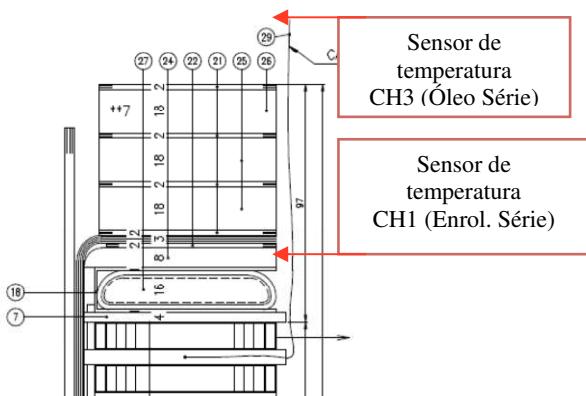
O monitoramento de fibra ótica foi instalado na parte superior do enrolamento da fase central do autotransformador, entre o último e penúltimo pacote de enrolamentos. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram o posicionamento dos sensores.

Figura 3.2 - Vista em corte da parte superior do enrolamento comum



Fonte: do autor (2015)

Figura 3.3 - Vista em corte da parte superior do enrolamento série



Fonte: do autor (2015)

O procedimento adotado no ensaio de elevação de temperatura realizado foi o seguinte:

- Passo 1: aplicação das perdas nominais do transformador, obtidas no ensaio de perdas em carga e perdas em vazio;
- Passo 2: caso as temperaturas no topo do óleo tenham variação menor que 0,5°C para a última hora, deve-se manter o transformador alimentado, com as perdas nominais, por pelo menos mais duas horas;
- Passo 3: elevar as perdas em 30% e aguardar a elevação de temperatura, por períodos não inferior a duas horas;
- As leituras de temperatura devem ser realizadas a cada 15min e valores da corrente e tensão devem ser anotados em todas as medições de temperatura.

3.3 Resultados

A tabela 3.1 mostra os valores obtidos no ensaio de elevação de temperatura na condição de todos os conjuntos de motoventiladores desligados (ONAN). Nesse caso o transformador foi alimentado com perdas totais de 155kW que corresponde a potência de trabalho de 56MVA:

Tabela 3.1 – Resultados do ensaios de elevação de temperatura na condição ONAN

Horário	CH1 (enrol. série)	CH2 (enrol. comum)	CH3 (óleo série)	CH4 (óleo comum)	Temperatura de óleo no fundo do tanque
18:30	30,9	27,2	26,8	26,8	26,8
18:45	33,1	30,2	27,0	27,2	26,8
19:00	35,4	32,8	27,1	27,3	27,6
19:15	38,3	34,1	27,5	27,6	28,0
19:30	42,2	38,1	28,0	28,2	28,5
19:45	45,0	43,2	28,0	28,1	29,4
20:00	48,3	46,2	29,5	29,9	30,2
20:15	51,8	49,7	32,9	33,2	33,5
20:30	54,7	52,1	35,8	36,2	36,3
20:45	58,4	55,8	39,7	40,1	37,6
21:00	63,4	60,1	44,1	44,6	38,5

21:15	67,5	65,6	49,8	50,1	39,4
21:30	70,2	68,1	52,3	52,6	40,1
21:45	73,1	71,0	54,6	54,9	40,7
22:00	75,3	73,4	57,1	57,4	41,7
22:15	77,5	75,4	59,3	60,2	42,5
22:30	79,2	76,9	60,7	61,0	43,2
22:45	81,1	77,8	61,8	62,4	43,2
23:45	82,6	80,1	64,7	64,8	43,9
0:45	83,0	80,7	63,8	64,2	44,1

Observa-se que a temperatura atingiu a condição de estabilização em aproximadamente 4 horas de ensaio. Os valores de elevação de temperatura dos pontos monitorados para os enrolamentos série e comum alcançaram valores de 83 e 80,7°C respectivamente e as saídas de óleo dos canais atingiram 63,8 e 64,2°C. Esses valores são condizentes com o esperado e poderão ser utilizados para a validação das simulação.

A segunda etapa do ensaio de elevação de temperatura consistiu na simulação da condição para o transformador operando com os motoventiladores ligados (ONAF). Nesse caso o transformador foi alimentado com perdas totais de 224kW, o que corresponde a condição de operação com potência de 80MVA. A tabela 3.2 mostra os resultados do ensaio:

Tabela 3.2 – Resultados do ensaios de elevação de temperatura na condição ONAF e sobrecarga de 30%

Horário	CH1 (enrol. série)	CH2 (enrol. comum)	CH3 (óleo série)	CH4 (óleo comum)	Temperatur a de óleo no fundo do tanque
5:00	88,6	84,9	62,4	62,8	37,5
5:15	89,2	85,1	62,7	63,0	37,9
6:15	90,5	86,4	64,2	64,8	38,9
7:15	90,2	86,0	64,4	64,8	38,6
8:15	90,2	86,0	64,8	64,1	38,7
9:15	87,7	83,6	63,2	63,6	38,6
10:15	87,1	82,1	62,2	63,0	38,3
11:15	86,6	81,7	61,2	62,0	37,9

12:30	86,8	82,5	62,1	62,3	38,5
13:30	87,3	83,3	62,7	63,3	39,4
Sobrecarga de 30%					
14:30	100,8	96,8	67,4	67,5	40,5
14:45	102,5	97,4	69,1	68,8	42,1
15:00	104,1	99,1	70,7	70,0	43,8
15:15	105,2	101,9	73,2	72,4	45,0
15:30	106,3	103,0	74,0	73,6	45,8

Nas duas últimas horas do ensaio de elevação de temperatura fez-se a comprovação da condição especificada, segundo a qual o transformador poderia ser sobrecarregado em até 30% sem que houvesse a ultrapassagem dos valores especificados de temperatura (no caso 110°C) no período, partindo da condição de carga nominal. Neste caso a temperatura dos enrolamentos série e comum atingiram 106,3 e 103°C respectivamente, obtidos pela medição direta em fibra ótica.

3.4 Conclusões

A inserção da fibra ótica para a medição dos valores de temperatura nos enrolamentos e nos canais de óleo é importante para a caracterização e verificação do comportamento das diversas partes componentes do transformador. Cuidados especiais devem ser tomados no manuseio da fibra, já que se trata de material frágil e de fácil danificação. Para evitar que um ponto de medição seja inviabilizado pelo dano da fibra recomenda-se que sejam colocados ao menos dois sensores para monitorar cada grandeza desejada.

A medição das temperaturas do óleo na parte superior dos canais e no fundo do tanque do transformador possibilita calcular a eficiência da troca de calor que ocorre no interior do enrolamento. Esses pontos são obtidos facilmente por meio de medição utilizando sensores do tipo termopares, já que não são necessários cuidados especiais quanto à isolamento do componente.

Os dados obtidos com os ensaios realizados possibilitarão a comparação com os valores obtidos por meio da simulação numérica no Capítulo 8. Deve-se considerar que os pontos de medição foram escolhidos com base na experiência do fabricante e dos especialistas envolvidos. Para essa escolha optou-se, no caso dos enrolamentos, pelo conjunto de condutores localizados na parte mais superior da bobina que está em contato com a porção de óleo mais aquecida e que se presume

ser o ponto com menor eficiência de troca. Deve-se lembrar que, internamente ao enrolamento, podem existir pontos com maior aquecimento devido a duas hipóteses:

1 - deficiências ou erros de montagem, provocando o estrangulamento de canais ou obstruções que são próprias do processo de fabricação artesanal do transformador e que não são identificadas por meio de análises ou simulações;

2 - condições de geometria desfavoráveis à troca de calor, que podem ser analisadas por meio de simulações numéricas ou analíticas.

Esta segunda condição pode ser identificada no processo de simulação e pode ser corrigida ou levada em consideração para a aplicação de carga no transformador. Já a primeira condição deve ser evitada adotando-se um controle de qualidade rigoroso nas etapas de fabricação.

4 ANÁLISE DO FLUXO MAGNÉTICO EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO O MEF - EFCAD

4.1 Introdução

A distribuição de campos elétricos e magnéticos, bem como vários fenômenos de Física e Mecânica obedecem a equações diferenciais parciais de segunda ordem, cuja solução analítica é, em casos práticos, de difícil obtenção. Desta forma, ao longo de muitas décadas, os engenheiros e projetistas utilizaram métodos empíricos, aproximações e experiência adquirida previamente para conhecer o comportamento elétrico e/ou magnético de uma estrutura eletromagnética. No entanto, os desafios tecnológicos que se apresentaram a partir dos anos 40 e, em particular, a partir do final da Segunda Guerra Mundial (estruturas mecânicas de centrais nucleares, aeronáutica, pesquisa espacial, escoamento hidrodinâmico e aerodinâmico, aquecimento, etc...) careciam de um método preciso para análise de campos.

O Método de Elementos Finitos – MEF, que surgiu durante a década dos anos 50 para uma aplicação aeronáutica, é uma ferramenta de grande flexibilidade e eficiência em problemas de difusão de campos. A teoria e técnica do método foram estabelecidas e aprimoradas nos anos 60 fazendo com que praticamente toda a bibliografia fosse, na época, baseada em problemas de Mecânica. Somente a partir dos anos 70 o MEF passou a ser empregado em Eletromagnetismo de forma ampla.

Atualmente, o MEF é bastante utilizado em Eletromagnetismo, e softwares bastante amigáveis encontram-se à disposição de engenheiros, projetistas e estudantes. A consolidação do MEF como um instrumento de trabalho fez com que a evolução e a criatividade na área de dispositivos tomassem nova impulsão a partir dos anos 80. Assim, um novo projeto é concebido, aprimorado e otimizado de forma computacional, sem que a construção de inúmeros protótipos, longa e onerosa, fosse necessária. De fato, o comportamento de um dispositivo depende fundamentalmente do seu comportamento magnético/elétrico e este, por sua vez, da distribuição de campos magnéticos/elétricos no seu interior.

Desta forma, parece-nos procedente que no contexto deste trabalho apresentemos o MEF da mesma forma em que livros de EM mais antigos apresentavam os métodos aproximados/empíricos que eram

utilizados na época. No entanto, o conhecimento aprofundado desta técnica requer um estudo específico, o que pode ser feito com o apoio de livros especializados no assunto. Os itens 4.2 a 4.4 possuem informações gerais sobre o método de elementos finitos, EFCAD e o processo de simulação, os itens 4.5 a 4.10 mostram as simulações eletromagnéticas realizadas, as considerações e conclusões sobre o problema.

4.2 Breve introdução ao método de elementos finitos (MEF)

O Método de Elementos Finitos tem como conceito básico a sistematização e automação do processo de cálculo de geometrias complexas, dividindo essa geometria em elementos menores nos quais são efetuados os cálculos para a determinação das grandezas de interesse.

Esses elementos menores são denominados “elementos finitos”, que são interconectados por meio dos “nós”. O agrupamento desses elementos forma a “malha” de elementos finitos. Na verdade o valor das grandezas são obtidas nos “nós” e interpoladas no interior do elemento por meio das “funções de interpolação”.

Essa estrutura de “nós” e “elementos finitos” gera um sistema finito de equações que deve ser resolvido. A resolução desse sistema numérico geralmente utiliza um dentre dois métodos, o de Galerkin ou o Método Variacional.

Neste trabalho utiliza-se o sistema para a solução das equações de Maxwell denominado EFCAD.

4.3 Apresentação do EFCAD

O EFCAD (“Electromagnetic Fields Computer Aided Design”) foi desenvolvido pelo GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos para resolver equações diferenciais parciais em 2D relacionadas aos fenômenos Eletromagnéticos e Térmicos. A primeira versão do programa já estava operacional em 1986 e atualmente encontra-se na versão 6.0 [EFCAD, Manual].

O programa é dividido nos seguintes blocos:

- Pré-processamento: é a etapa na qual a geometria do problema é tratada; deve-se adicionar as propriedades físicas dos materiais, as dimensões da malha e as condições de contorno;

- **Processamento:** é a etapa na qual define-se quais grandezas serão obtidas da malha gerada, nela podem ser inseridas os valores das fontes, escolhida a precisão do cálculo e definidas as equações que serão utilizadas para a resolução dos problemas;
- **Pós-Processamento:** é a etapa em que os resultados podem ser tratados por meio de programas específicos para esse fim; pode-se gerar visualizações de linhas, contornos e nuvens de densidade, além de obter valores pontuais ou em forma de gráficos.

O sistema possui os seguintes códigos de processamento:

- **EFCS:** Para Cálculos Electromagneticos em regime permanente;
- **EFCC:** Para Cálculos Eletromagnéticos utilizando a formulação Complexa;
- **EFCJ:** Para problemas electromagneticos transitórios, utilizando procedimento passo a passo no tempo; além disso podem ser tratadas não-linearidades e problemas de correntes parasitas. As fontes são dadas em corrente;
- **EFCT:** Similar ao EFCJ, porém as fontes são dadas em tensão;
- **EFCV:** Cálculos eletromagnéticos considerando movimento de parte;
- **EFCTS:** Para cálculo térmico em regime permanente;
- **EFCTT:** Para cálculo de transitório térmico.

4.4 Simulação do transformador de potência utilizando o EFCAD

A simulação envolvendo equipamentos eletromagnéticos utilizando programas de resolução pelo método de elementos finitos envolve uma série de considerações que implicam diretamente na obtenção dos resultados, precisão e tempo de simulação. Neste tópico será detalhado o processo de simulação do modelo de transformador utilizado para que se possa obter os resultados descritos nessa tese.

Os passos consistem em:

- Levantamento da geometria do transformador e montagem da estrutura em 2D;

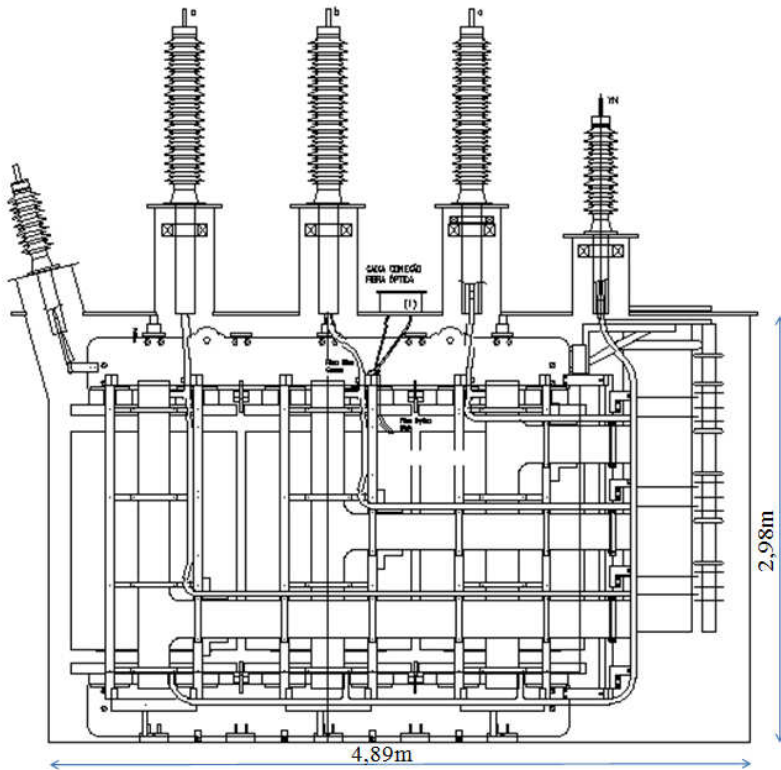
- Levantamento dos parâmetros elétricos dos materiais utilizados no transformador, como a curvas B-H, condutividade, permeabilidade, posterior inserção dos parâmetros no programa, definição das fontes, condições de contorno, etc;
- Escolha do tipo malhador e refinamento da malha utilizada para a estrutura;
- Escolha do processador e entrada dos dados de fontes, com posterior verificação da convergência do modelo simulado;
- Pós-processamento e visualização dos resultados.

4.5 Levantamento da Geometria do Transformador e montagem da estrutura 2D

O levantamento da estrutura do transformador é uma tarefa difícil pois envolve a medição das dimensões em um modelo já construído ou a disponibilização do projeto pelo fabricante. Na primeira situação o objetivo da simulação é geralmente verificar o funcionamento do equipamento já que o mesmo já foi fabricado. Na segunda situação, geralmente faz-se a simulação visando verificar possíveis melhorias que podem ser implementadas no projeto. Neste caso deve haver a concordância do fabricante do transformador, pois o mesmo deve disponibilizar as plantas de projeto do equipamento, que possuem todos os detalhes de fabricação e montagem.

Nesse estudo, como um dos objetivos é o de simular o comportamento de um equipamento desde a etapa de projeto, tornou-se necessário a obtenção com um fabricante de um projeto completo de equipamento. Isto foi conseguido mediante a comprovação de que não seriam divulgadas as plantas do equipamento, então, somente será mostrado o esquema do modelo simulado, contendo o posicionamento das bobinas sobre o núcleo, mostrado na figura 4.1.

Figura 4.1 - Dimensional do transformador analisado



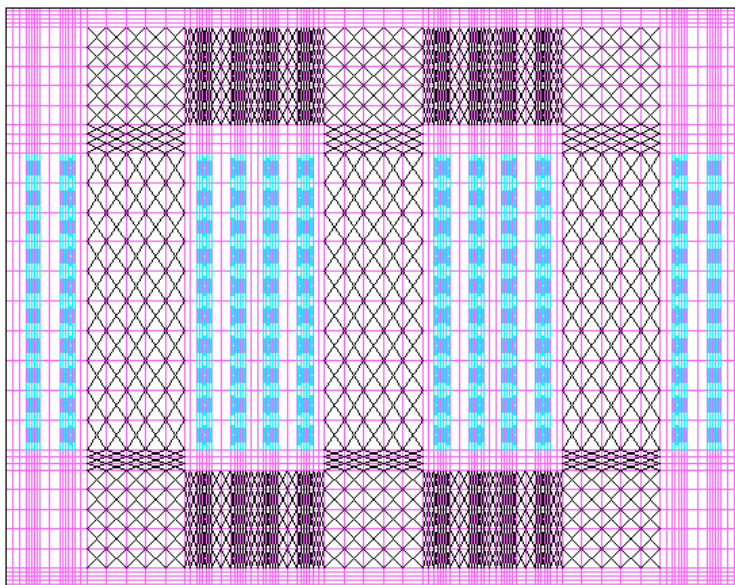
Fonte: do autor (2015)

Para a montagem desse modelo, de posse do projeto completo, deve-se realizar algumas simplificações, eliminando elementos que tornem a simulação mais complexa e retornem pouca melhora nos resultados. No caso do transformador em análise somente foi representada a parte ativa do transformador, sem elementos de fixação, cilindros isoladores, calços, isolamento, óleo, etc; pois os mesmos possuem permeabilidade muito próxima a do ar e possuem pouca influência na simulação quando os resultados necessários são o fluxo magnético e indutância. Também não foram considerados os condutores que não pertencem ao corpo principal dos enrolamentos, que interligam bobinas e comutador, buchas, aterramentos, etc. Essa simplificação facilita a análise do equipamento já que esses condutores possuem formato irregular e sua consideração para a simulação necessitaria muito

tempo e os resultados não seriam alterados em valores significativos já que esses condutores representam pouca quantidade de material.

Para montagem do modelo do transformador foi utilizado o programa do pacote do EFCAD, denominado EFR – “Regular Mesh Pre-Processor”, o qual cria uma malha com estrutura regular, de acordo com a definição do número de divisões e valores de coordenadas e abscissas informados ao programa. A malha informada é mostrada na figura 4.2.

Figura 4.2 - Malha gerada utilizando o EFR



Fonte: do autor (2015)

Depois de gerada a malha são definidos os materiais e as suas características, como abaixo:

Tabela 4.1 - Características dos materiais utilizados na simulação

Componente	Material	Permeabilidade Relativa	Condutividade elétrica
Enrolamento AT	Cobre	0,99	0,0
Enrolamento BT	Cobre	0,99	0,0
Núcleo	Aço	Curva B-H	0,0
Demais locais	Ar	1,0	0,0

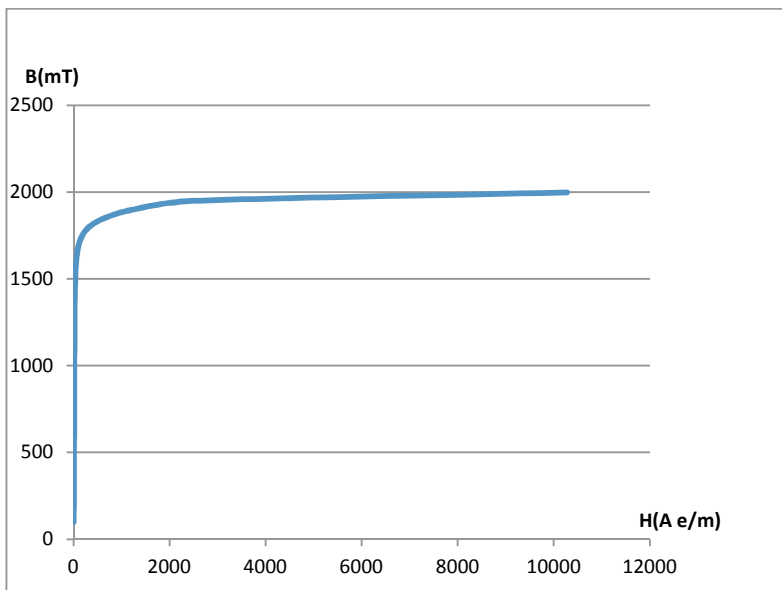
4.6 Caracterização dos materiais empregados na simulação eletromagnética

Para o núcleo, de modo a melhor representar o material utilizado, utilizou-se o levantamento da curva B-H para uma amostra das chapas de aço de grão orientado. No caso desse transformador o modelo de chapas é a M-4. Esse levantamento foi realizado no GRUCAD com a bancada com quadro de EPSTEIN integrado. Os valores obtidos para a amostra estão mostrados na tabela 4.2 e na figura 4.3:

Tabela 4.2– Valores Obtidos com o Quadro de Epstein

B_{\max} (mT)	H_{\max} (A/m)
99,87	5,87
199,88	9,39
299,98	12,40
399,95	13,86
499,99	15,15
599,99	16,32
699,92	17,53
799,67	18,83
899,85	20,04
999,69	21,34
1099,60	22,80
1299,60	26,42
1399,40	30,74
1499,50	39,79
1599,80	59,99
1699,70	115,65
1799,10	327,72
1899,40	1248,60
1998,00	10280,00

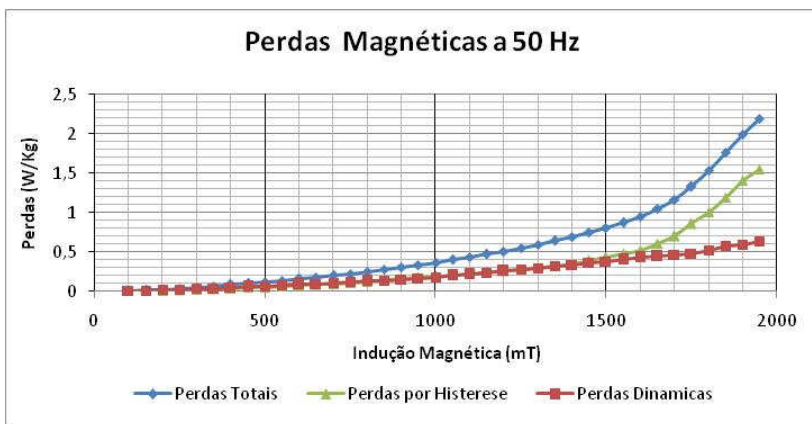
Figura 4.3 - Curva B-H da chapa M-4 obtida em laboratório



Fonte: do autor (2015)

Observa-se que os valores obtidos no quadro de EPSTEIN possuem limite superior para B de 2,0T para o campo máximo de 10000 [A/m].

Figura 4.4 - Perdas magnéticas do material do núcleo



Fonte: do autor (2015)

A Figura 4.4 mostra as perdas obtidas no ensaio. Nota-se que os valores de perdas no material possuem uma taxa de incremento maior quando os valores de indução no material ultrapassam o valor de 1,7T, correspondente a faixa de não linearidade do material. Geralmente o fabricante de transformadores trabalha em seu projeto com valores de indução próximos a 1,80T, de modo a controlar as perdas no núcleo do equipamento. Valores de indução abaixo desse valor levam a núcleos com diâmetros maiores e conseqüentemente, utiliza-se mais material para a construção do transformador, tornando-o mais caro.

Outro material que possui importância na caracterização das perdas é o cobre, utilizado na fabricação dos enrolamentos. As perdas nesse material dependem basicamente da sua resistência, já que a parcela de aquecimento devido depende do quadrado da corrente. Sabendo-se que a resistência elétrica do cobre varia com o aumento da temperatura e pode-se utilizar a equação 4.1 para essa representação (NBR 5356-2, 2007):

$$\rho_c = 1.709 \times 10^{-8} + 0.00393 \cdot (t - 20) \quad (4.1)$$

em que,

ρ_c – resistividade absoluta do cobre
 t – temperatura do cobre

4.7 Definição das fontes de corrente para simulação

Para a simulação do transformador trifásico é necessário realizar a aplicação das fontes nas fases de modo a considerar a sua defasagem e as polaridades que são obtidas no projeto do transformador. Para isso é necessário se obter os valores de densidade de correntes circulantes nos enrolamentos do transformador.

Os dados nominais do equipamento são os seguintes:

Tensão nominal do primário: 145kV

Tensão nominal do secundário: 66kV

Potência nominal: 80.000kVA

Frequência nominal: 50Hz

Os valores das fontes que são utilizadas como entrada no programa e são calculadas em função das dimensões pré-definidas dos enrolamentos, da seguinte forma:

Enrolamento Série (Alta-Tensão):

Corrente por espira = $80000 / 2 \times (145 \times \sqrt{3}) = 159,26A$

Número de espiras do enrolamento: 464 espiras

Corrente por espira x número de espiras =
 $464 \times 159,26 = 147.801 \text{ A.e}$

Altura do enrolamento: 1520mm

Largura do enrolamento: 74mm

Densidade de corrente $J_s = 147801 / (1520 \times 74) = 1,314 \text{ A.e/mm}^2$

Enrolamento Comum (Baixa Tensão)

Corrente por espira = $80000 / (66 \times \sqrt{3}) = 381,3 \text{ A}$

Número de espiras do enrolamento: 516 espiras

Corrente por espira x número de espiras = $516 \times 381,3 = 196.750$

Altura do enrolamento: 1520mm

Largura do enrolamento: 78mm

$J_s = 196.750 / (1520 \times 78) = 1,666 \text{ A.e/mm}^2$

Com base nesses resultados, e considerando que as fontes estão defasadas de 120° elétricos os valores utilizados como entrada no programa foram os seguintes:

Tabela 4.3 – Valores das fontes utilizadas na simulação do EFCJ

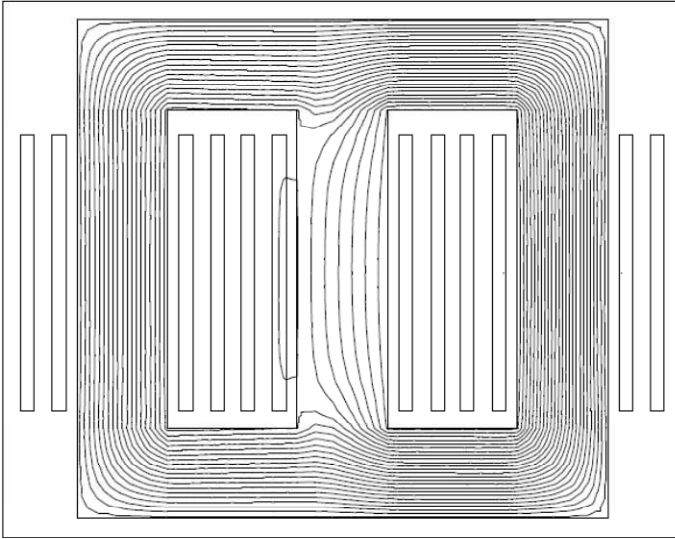
Enrolamento	Valor da densidade de corrente (A/mm^2)	Polaridade
AT coluna 1	1,314, $\theta=0^\circ$	Positiva
BT coluna 1	1,666, $\theta=0^\circ$	Negativa
AT coluna 2	1,314, $\theta=120^\circ$	Positiva
BT coluna 2	1,666, $\theta=120^\circ$	Negativa
AT coluna 3	1,314, $\theta=240^\circ$	Positiva
BT coluna 3	1,666, $\theta=240^\circ$	Negativa

Como o processo de cálculo no EFCJ é passo-à-passo no tempo, define-se ainda o tempo total da simulação e o valor dos passos no tempo. Neste caso foi utilizado o tempo total de simulação de 20ms, que corresponde ao um ciclo para o sistema em 50Hz.

4.8 Resultados obtidos com a simulação do transformador de potência utilizando o EFCAD

Os resultados das simulações são mostrados nesse item. Através da utilização da interface gráfica disponível no EFCAD, foram geradas as figuras mostradas. A figura 4.4 mostra as linhas de campo no transformador no tempo de 1,67ms. Nesta condição a coluna 3 é a responsável pela geração da maior parcela do fluxo magnético concatenado no núcleo.

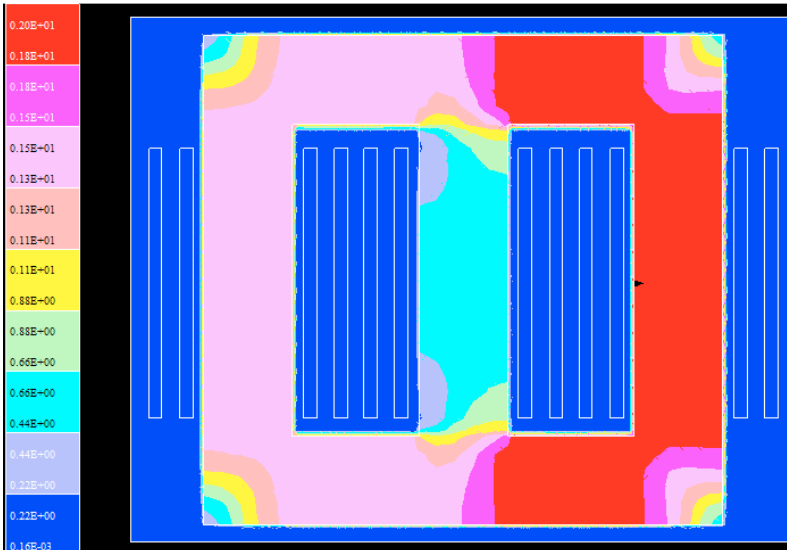
Figura 4.5 - Linhas de fluxo no tempo de 1,67ms



Fonte: do autor (2015)

A figura 4.6 mostra os valores de módulo de indução (B).

Figura 4.6 - Indução no tempo de 1,67ms

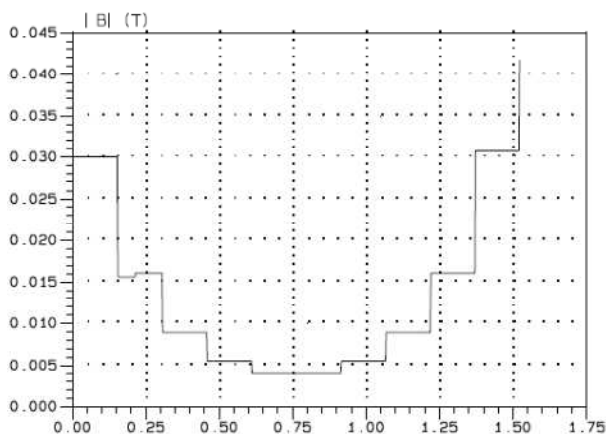


Fonte: do autor (2015)

Nota-se que a indução é maior na coluna 3 mais a direita; o valor máximo da indução obtido na simulação é de 1,83T.

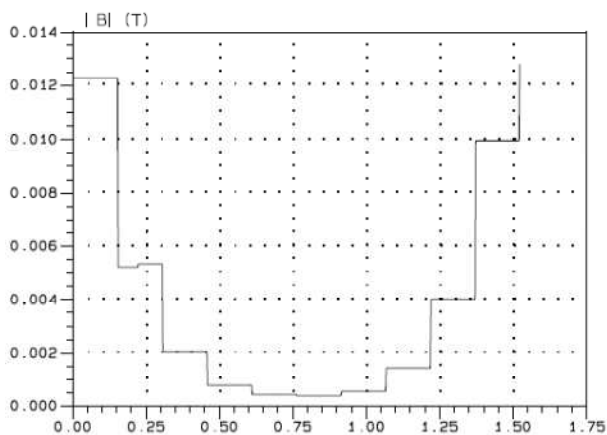
As figura 4.7, 4.8 e 4.9 mostram o valor da indução para uma linha traçada ao longo de linhas axiais traçadas ao longo das bobinas da coluna 1, coluna 2 e coluna 3 respectivamente.

Figura 4.7 - Indução ao longo dos enrolamentos coluna 1



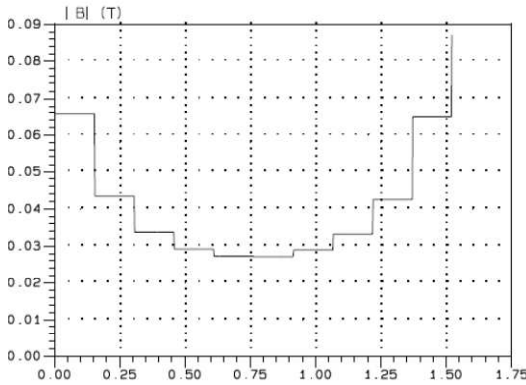
Fonte: do autor (2015)

Figura 4.8 - Indução ao longo dos enrolamentos coluna 2



Fonte: do autor (2015)

Figura 4.9 - Indução ao longo dos enrolamentos coluna 3

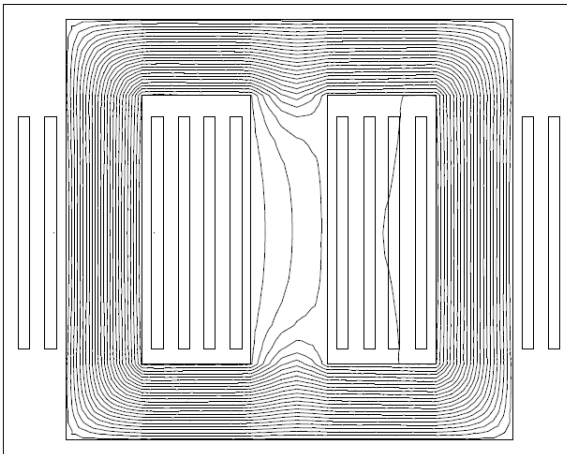


Fonte: do autor (2015)

Os gráficos representam a dispersão sobre a linha; os valores percentuais máximos de dispersão obtidos, com relação à indução máxima no núcleo, foram de 1,9%, 0,65% e 3,7% nas colunas 1, 2 e 3 respectivamente.

A figura 4.10 mostra as linhas de fluxo magnético para a o tempo de 3,33ms. Nessa condição a coluna 1 é a maior responsável pela geração do fluxo magnético que está concatenado no núcleo.

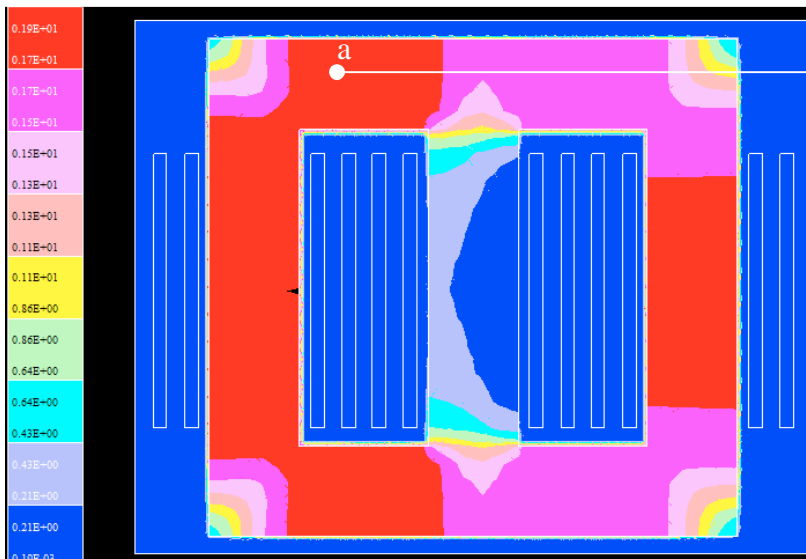
Figura 4.10 - Linhas de fluxo para o tempo de 3,33ms



Fonte: do autor (2015)

A figura 4.11 mostra os valores de indução para a condição acima. Nota-se que a indução é maior na coluna 1 e 3, o valor máximo de B é de 1,83T na coluna 1.

Figura 4.11 - Valores de campo para o tempo de 3,33ms

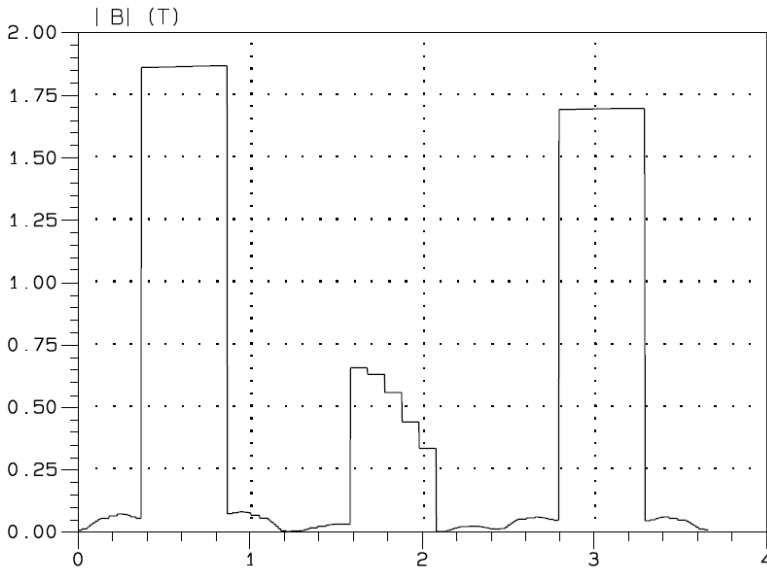


Fonte: do autor (2015)

Fig. 4.11– Valores de campo para o tempo de 3,33ms

A figura 4.12 mostra o valor da Indução para a linha a-b traçada longitudinalmente na altura da parte superior dos enrolamentos conforme a figura 4.11. Na figura 4.12 nota-se que há dispersão nas proximidades das colunas do núcleo e os valores de indução permanecem em torno de 0,07T nas proximidades da coluna 1, 0,05T nas proximidades da coluna 2 e 0,08T nas proximidades da coluna 3, sendo, no pior caso, na ordem de 5% do total.

Figura 4.12 - Valores de indução, sobre a linha longitudinal a-b da figura 4.11



Fonte: do autor (2015)

4.9 Levantamento e utilização das grandezas obtidas com a simulação eletromagnética

A simulação eletromagnética fornece os valores de fluxo magnético utilizados no projeto do transformador analisado e consequentemente os valores de indução. Além dessa grandeza podem-se obter os valores de campo disperso próximos às bobinas ou outras grandezas de interesse.

Para a aplicação neste trabalho utilizam-se os valores de indução obtidos no núcleo e, com base nesses valores, calculam-se as perdas no núcleo do transformador. As perdas do núcleo representam aproximadamente 15% da energia total de perdas do transformador para a potência nominal e sua consideração deve ser feita para obter-se o aquecimento de todo o conjunto de componentes do transformador.

Adicionalmente à simulação, avaliam-se os valores de campo disperso nas proximidades da parte superior e inferior da bobina. Caso esses valores sejam muito elevados deve-se considerar um incremento de geração de calor nessas regiões, já que as linhas de fluxo atravessam os condutores do enrolamento de forma transversal, podendo gerar

correntes parasitas e conseqüentemente maior aquecimento nessa região. Para o projeto analisado, a porcentagem do campo disperso calculada ficou em torno de 5% e não serão consideradas para a simulação de aquecimento. Além disso, os enrolamentos são constituídos de condutores finos, isolados entre si e empacotados em grupo, conforme descrito no capítulo 2, visando diminuir ainda mais esse efeito.

4.10 Conclusões

O capítulo abordou a aplicação do MEF, especificamente o programa EFCAD, para a simulação do transformador de potência. Mostrou ainda os resultados das simulações e algumas das funcionalidades do recurso de pós-processamento do programa.

A principal vantagem na utilização dessa ferramenta é a padronização do processo de análise e a rapidez com que as grandezas podem ser obtidas, podendo ser aplicado a todos os equipamentos ainda na fase de projeto. Isto pode ter algum reflexo no custo envolvido já que não é necessária a construção de um modelo para a realização de medições.

As simulações apresentadas mostram que os valores de indução obtidos, próximos a $1,8T$, estão coerentes com os valores usualmente utilizados para transformadores de potência. Esses valores de indução são necessários para o levantamento do valor das perdas no núcleo do equipamento, utilizando a curva da figura 4.4 juntamente com os valores de indução obtidos. O valor das perdas estimadas o transformador será realizada no Capítulo 5 com base nas simulações e considerações realizadas no Capítulo 4.

Como descrito no item 4.9, com base na simulação optou-se por descartar os efeitos do campo disperso na parte superior e inferior das bobinas devido ao seu valor representar em torno de 5% do total obtido. O cálculo das perdas nos enrolamentos será realizada somente considerando os valores das correntes circulantes nos enrolamentos e será apresentado no capítulo 5. Como o valor da resistência do cobre varia com a temperatura, deve-se atualizar o valor das perdas nos enrolamentos para os diferentes valores de temperatura do conjunto.

5 ANÁLISE TERMODINÂMICA DA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM TRANSFORMADORES

5.1 Introdução

A solução de problemas relacionados à transferência de calor, massa, problemas de escoamento, dentre outros, é uma área de pesquisa da mecânica, denominada como Mecânica Computacional. Diversas pesquisas foram e vem sendo realizadas nessa área, elaborando-se ferramentas capazes de auxiliarem na solução de problemas com geometrias complexas e multidisciplinares. Alguns códigos computacionais foram desenvolvidos para auxiliar na solução desses problemas, sendo que um bastante conhecido e utilizado trata-se do CFD (Computational Fluid Dynamics). Desta forma, assim como no capítulo anterior, parece-nos procedente que no contexto deste trabalho apresente-se o CFD, que será abordado nos itens 5.2 a 5.4, incluindo a ferramenta utilizada e o procedimento de cálculo. Nos itens 5.5 a 5.9 estão mostrados os parâmetros geométricos e físicos utilizados para a elaboração do problema e também, considerações e conclusões sobre a abordagem aplicada.

5.2 CFD (Computational Fluid Dynamics)

O CFD (Computational Fluid Dynamics) é uma vertente da Mecânica dos Fluidos que estuda problemas relacionados com fluxos de um fluido. Abrange fenômenos de escoamentos, aerodinâmica, reações químicas, combustão, etc. Utiliza-se de métodos matemáticos e algoritmos baseado nas leis de conservação de massa, momento e energia em conjunto com condições predefinidas do entorno, gerando valores de suas variáveis como pressão, velocidades e temperatura, dentro de um domínio, em regimes estacionários ou transientes.

Os métodos CFD foram inicialmente desenvolvidos na década de 1960 para resolver equações lineares e com interface bidimensional. No decorrer dos anos, a potência dos computadores possibilitou o desenvolvimento de métodos tridimensionais e posteriormente, na década de 1970, resolução de equações de comportamento não linear. Simulações com CFD eram restritas ao uso em marinha, aeronáutica e apenas supercomputadores tinham capacidade de resolver o método de equações. Graças à evolução da informática e desenvolvimento de

softwares com interface mais amigáveis, hoje, a dinâmica de fluido computacional é difundida em diversas outras áreas.

Dentre as vantagens da utilização de ferramentas de CFD estão:

- Baixo custo de aquisição e operação, já que as tecnologias computacionais vêm se tornando cada vez mais acessíveis ao longo dos anos;
- Oferecem informações detalhadas sobre o fluxo estudado, com fácil acesso aos dados de saída;
- Permitem a rápida mudança de parâmetros, otimizando a análise do escoamento;
- Podem simular fluxos com detalhamento realístico da geometria em estudo;
- Permitem o estudo de fenômenos de risco, como explosões e vazamentos de fluidos radioativos.

5.3 Breve introdução sobre o ANSYS WorkBench

O Pacote Comercial ANSYS Workbench foi desenvolvido para proporcionar um ambiente no qual vários tipos simulações possam ser realizadas. Atende uma gama de tecnologias, tais como CFD, FEA (método dos elementos finitos) e ferramentas de otimização de Design. O pacote é organizado usando guias e etapas para deixar a interface mais familiar ao usuário. Segundo a empresa, o sistema foi construído para proporcionar ao usuário fácil orientação no âmbito da sua interface e com acesso rápido às tarefas, onde cada etapa realizada é salva em extensões distintas. É possível que sejam mostradas várias etapas feitas, as tarefas empregadas e como proceder em etapas futuras.

A estrutura básica do programa é semelhante à mostrada para o EFCAD no Capítulo 4, possuindo as mesmas funcionalidades, e está listada a seguir:

- Pré-processamento
- Processamento
- Pós-Processamento

5.4 Análise do transformador de potência utilizando CFD

A simulação de CFD para o transformador de potência requer um grande esforço para a preparação do modelo do transformador. Para tentar diminuir essa dificuldade, existe a necessidade de realizar uma

pré-análise com respeito às simplificações inevitáveis que serão adotadas na geometria. Neste tópico será abordado o processo de simulação do modelo de transformador para que se obtenha os resultados de forma correta.

Os passos consistem em:

- Levantamento da geometria do transformador e montagem da estrutura em 3D: para o levantamento da estrutura é necessário o projeto completo do transformador. Os enrolamentos, núcleo e estruturas devem ser representados e ao contrário da simulação eletromagnética, deve-se representar o fluido e os materiais isolantes presentes no equipamento. Esse processo é extremamente importante para a obtenção de resultados coerentes;
- Levantamento dos parâmetros térmicos dos materiais utilizados no transformador, como condutividade térmica, calor específico, etc e posterior inserção dos parâmetros no programa, definição das fontes de calor, condições de contorno, etc;
- Escolha do tipo malhador e refinamento da malha utilizada para a estrutura;
- Escolha do processador e entrada dos dados de fontes, com posterior verificação da convergência do modelo analisado;
- Pós-processamento e visualização dos resultados: Com a simulação realizada deve-se obter os valores de das grandezas de interesse. A visualização dessa etapa é realizada em ambiente gráfico de pós-processamento, de modo a facilitar a compreensão do modelo e resultados.

5.5 Levantamento da Estrutura do transformador e obtenção da geometria 3D

Inicialmente deve-se obter o projeto detalhado do transformador em mãos, o que não é de fácil obtenção já que pertence aos fabricantes e possuem os detalhes conforme a experiência dos mesmos. Deve-se então levantar as dimensões do equipamento para ao elaboração da geometria em 3D.

A ferramenta utilizada para o desenho da estrutura permite a montagem de peças, fazendo-se o levantamento em separado para os enrolamentos de AT, BT, núcleo, espaçadores, cilindros isolantes e calços de suporte. Todos esses componentes são montados para formar a parte ativa completa como será simulada.

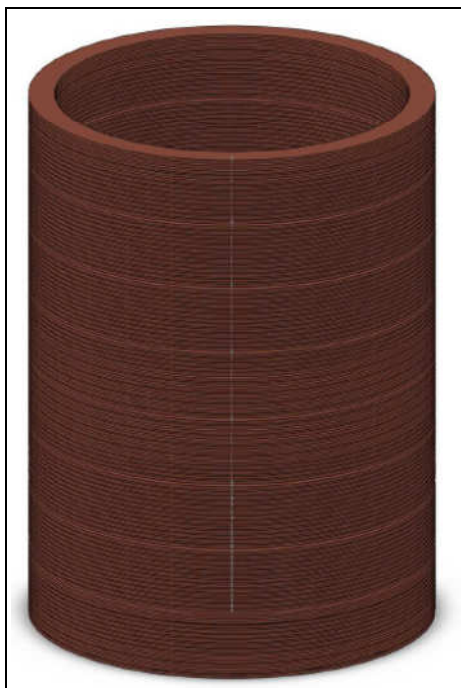
Para simplificação do modelo foram suprimidos alguns elementos construtivos do equipamento, já que o interesse principal estudo é o de obter os valores de temperatura no interior do transformador e dos enrolamentos, e principalmente os valores de temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Com base nisso não foram representados os seguintes componentes do equipamento:

- Elementos de fixação em madeira compactada;
- Condutores que não pertencem ao corpo principal dos enrolamentos;
- Condutores que interligam enrolamentos e comutador;
- Comutador e suas interligações;
- Interligação entre bucha e enrolamento;
- Buchas;
- Condutores e cordoalhas de aterramento.

5.5.1 Modelagem dos componentes internos do transformador

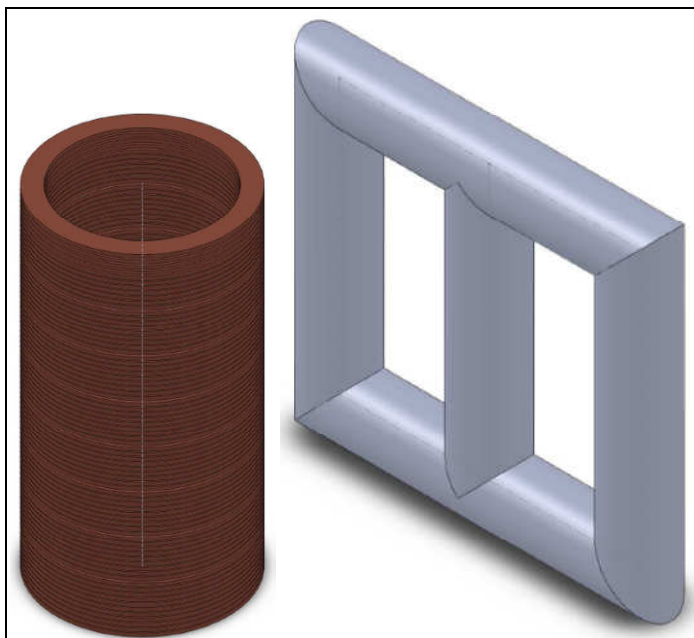
Os componentes internos do transformador foram modelados utilizando o Programa Comercial SolidWorks. Esse programa é utilizado para produzir estruturas em 3D no qual pode-se modelar peças separadas e proceder a montagem das estruturas compostas por diversas peças. No caso de haver a necessidade de modificação dessas peças, as modificações são atualizadas diretamente na montagem. Existe também a possibilidade de verificar se as estruturas possuem interferências entre si, o que facilita a análise da estrutura modelada. Com a geometria pronta, faz-se a exportação dos dados para o programa ANSYS WorkBench, que possui uma interface para esse fim. Abaixo estão mostradas as estruturas modeladas.

Figura 5.1 - Enrolamento AT completo



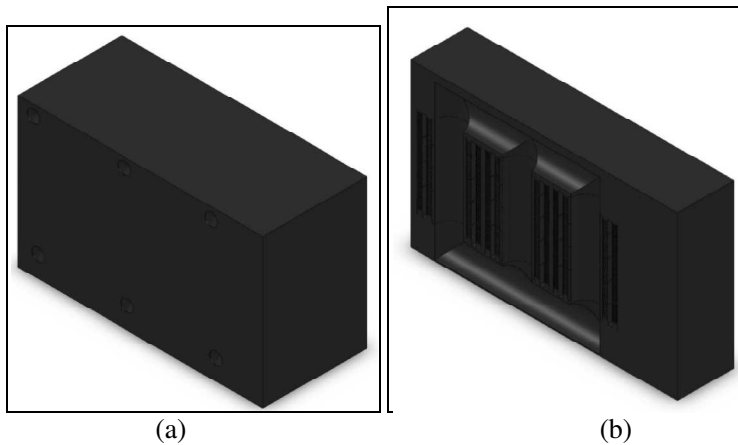
Fonte: do autor (2015)

Figura 5.2 - Enrolamento BT completo e Núcleo ferromagnético



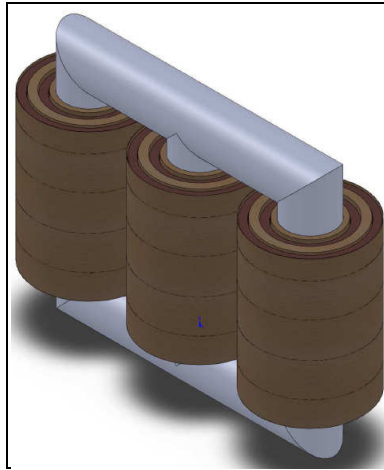
Fonte: do autor (2015)

Figura 5.3 - (a) tanque do transformador, (b) seção mostrando a modelagem dos volumes sem óleo



Fonte: do autor (2015)

Figura 5.4 - Parte Ativa



Fonte: do autor (2015)

Com o modelo geométrico finalizado, torna-se necessário realizar o levantamento das propriedades térmicas dos materiais que compõem o equipamento e estão presentes no modelo além das fontes e seus valores, como será descrito a seguir.

5.5.2 Levantamento dos parâmetros térmicos dos materiais utilizados em transformadores

Como já dito, a obtenção de parâmetros de componentes utilizados em equipamentos especializados geralmente não é uma tarefa fácil. No caso dos transformadores de potência isso fica mais evidente, pois alguns materiais são desenvolvidos especialmente para essa aplicação. Como exemplo pode-se citar o papel isolante termoestabilizado e as chapas aço-silício de grãos orientados. Nas literaturas convencionais que tratam dos fenômenos térmicos como condutividade, convecção, etc., dificilmente encontram-se os valores dos parâmetros térmicos desses materiais. A seguir serão descritos alguns elementos necessários para a simulação:

Óleo isolante:

No transformador de potência o óleo isolante é responsável tanto por auxiliar a isolamento elétrica do equipamento quanto por garantir a refrigeração dos materiais utilizados na sua construção. Como o óleo é o meio utilizado para retirar o calor gerado pela parte ativa, o mesmo está sujeito a constantes variações de temperatura. Por isso torna-se

necessário conhecer como se comportam seus parâmetros com essa variação. A tabela 5.1 mostra a variação das propriedades do óleo. Essa tabela foi extraída de Susa (2005), que utilizou como referência Grubb (1981):

Tabela 5.1 – Propriedades do óleo isolante com a variação da temperatura (GRUBB,1981)

Temperatura Θ , °C	Densidade ρ , kg/m ³	Calor Específico $C_{\text{óleo}}$, Ws/kg°C	Condutividade Térmica k , W/(m°C)	Coefficiente cúbico de expansão térmica β , 1/°C	Viscosidade μ , kg/(ms)
-15	896.885	1900	0.1262	8.6×10^{-4}	0.0694
-5	890.295	1940	0.1247	8.6×10^{-4}	0.0463
5	883.705	1980	0.1232	8.6×10^{-4}	0.0318
15	877.115	2020	0.1217	8.6×10^{-4}	0.0224
25	870.525	2060	0.1201	8.6×10^{-4}	0.0162
35	863.935	2100	0.1186	8.6×10^{-4}	0.0119
45	857.345	2140	0.1171	8.6×10^{-4}	0.0089
55	850.755	2180	0.1156	8.6×10^{-4}	0.0068
65	844.165	2220	0.1140	8.6×10^{-4}	0.0053
75	837.575	2260	0.1125	8.6×10^{-4}	0.0042
85	830.985	2300	0.1110	8.6×10^{-4}	0.0033
100	821.100	2360	0.1087	8.6×10^{-4}	0.0024

Fonte: Grubb (1981)

Materiais Sólidos:

Para os materiais sólidos, a propriedade mais importante é o valor da condutividade térmica, que foi obtido na literatura clássica de transferência de calor (INCROPERA, 2003) e diretamente com os fabricantes dos materiais; e estão listadas na tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Propriedades dos materiais sólidos do transformador

Material	Condutividade térmica (W/m.K)
Cobre 99,9% puro	385
Papel Isolante	0,13 a 0,5
Papelão denso (Presphan)	0,13 a 0,20
Aço para núcleo magnético	40 a 50
Isolamento do núcleo (verniz)	0,44
Aço carbono (tanque e outras partes metálicas)	35

5.5.3 Cálculos das fontes de calor existentes no transformador

As fontes de calor existentes no transformador são obtidas com base na simulação eletromagnética, que fornece os valores de indução existentes no equipamento. Essa é uma importante fase do cálculo, pois a estimativa de temperatura está diretamente correlacionada com esses valores. Para diferentes condições de carregamento tem-se diferentes condições de aquecimento para o transformador. Considerando que inicialmente realiza-se a comparação dos valores do ensaio de elevação de temperatura faz-se o cálculo para as condições nominais do equipamento.

Os valores de fonte de calor são calculados a seguir utilizando os valores de indução encontrados:

Geração de calor no núcleo:

A geração de calor no núcleo do equipamento é obtida utilizando-se os valores de perdas medidas para as chapas de aço conforme ensaio e os valores de indução máxima do núcleo obtida na simulação mostrada no capítulo 4.

Assim os valores ficam os seguintes:

$B_{\text{máx}} = 1,83$ (T)

Perdas estimadas = 1,7 (W por quilograma)

Peso específico das chapas de aço do núcleo: $7,65$ (g/cm³)

Volume estimado do núcleo: $2,17 \times 10^6$ (cm³)

Massa estimada do núcleo: 16.620 (kg)

Perdas estimadas no núcleo: $16.620 \times 1,7 = 28,26$ (kW)

Geração de calor nos enrolamentos:

A geração de calor nos enrolamentos é calculada em função da corrente que percorre o mesmo. No caso do transformador em análise cada enrolamento possui um valor característico de perdas médias. O cálculo está mostrado a seguir:

Para o enrolamento Comum:

As perdas para o enrolamento comum são baseadas na corrente do enrolamento e na resistência do mesmo. O condutor utilizado possui as seguintes características:

Constituído de 1 condutor retangular de 3mmx9mm.

$\rho = 0,152 \times 10^{-6}$ [Ω /mm]

Diâmetro médio do enrolamento = 728 [mm]

Comprimento total = 1.180.133 [mm]

Resistência total do enrolamento: 0,179 [Ω]

Como a corrente eficaz do enrolamento comum calculada para a potência nominal e tap nominal é de 288,5A , tem-se:

$$P=RI^2=0,179 \times (288,5)^2=14,9 \text{ [kW]}$$

Para o enrolamento Série:

Constituído de 9 condutores retangulares empilhados de 1,8mmx7,3mm cada, formando um único empacotamento.

$$\rho=0,178 \times 10^{-6} \text{ [}\Omega/\text{mm]}$$

Diâmetro médio do enrolamento= 1078 [mm]

Comprimento total = 1.571.399 [mm]

Resistência total do enrolamento: 0,279 [Ω]

Como a corrente eficaz do enrolamento comum calculada para a potência nominal e posição do comutador nominal é de 411,66A , tem-se:

$$P=RI^2=0,279 \times (411,66)^2=47,29 \text{ [kW]}$$

Perdas Totais do Transformador:

De forma simplificada , as perdas totais do transformador podem ser obtidas pela soma das perdas no núcleo e dos enrolamentos conforme a seguir:

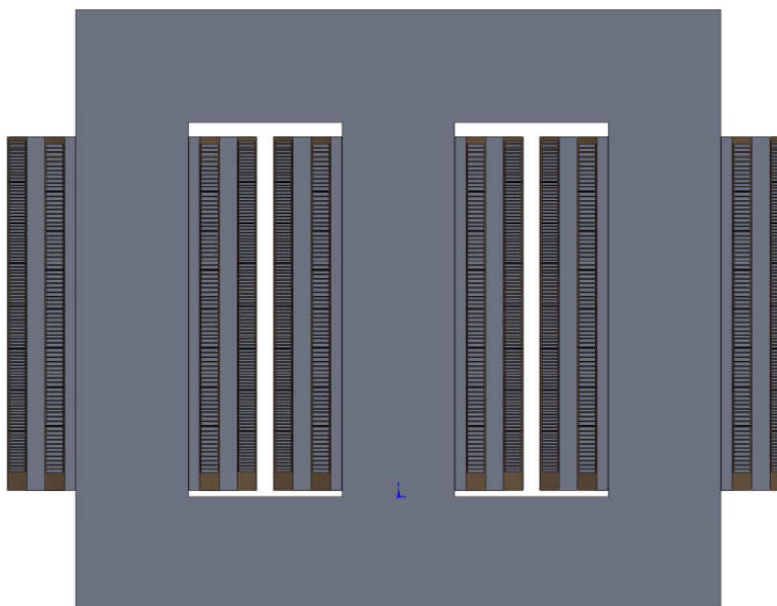
$$Pt=28,26+3 \times 47,29+3 \times 14,9=214,83 \text{ [kW]}$$

No caso simulado, as perdas individuais são alocadas para a geração de calor nos respectivos locais de geração, ou seja, núcleo e enrolamentos AT e BT.

5.6 Resultados obtidos com a simulação do transformador de potência utilizando a simulação 3D ANSYS-CFX

Com o levantamento das perdas do transformador é possível realizar a simulação de aquecimento do transformador. A figura 5.5 mostra a seção transversal da parte ativa do transformador. Conforme pode ser visto na figura os três enrolamentos possuem as mesmas dimensões e por conseqüência, possuem as mesmas características elétricas e de perdas. Para uma investigação inicial será analisado um dos enrolamentos em separado, principalmente devido as restrições de processamento da simulação numérica e a capacidade do equipamento computacional utilizado nesse estudo.

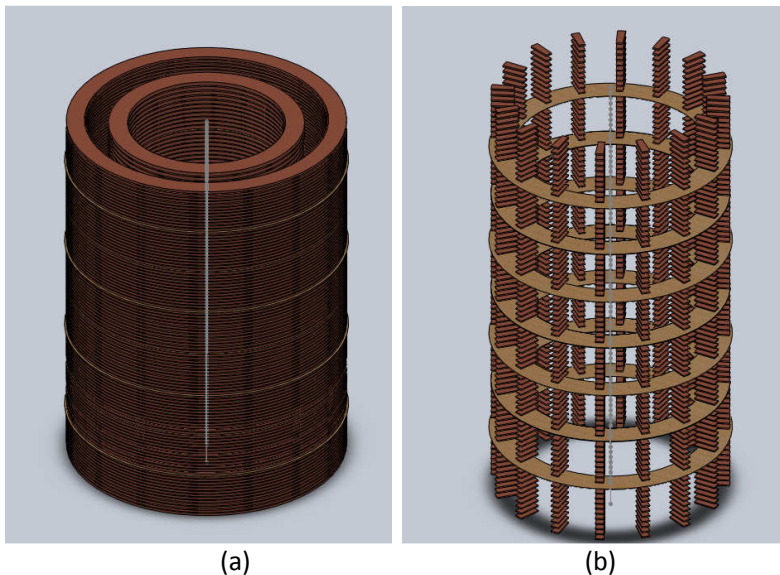
Figura 5.5 - Corte seção Parte Ativa



Fonte: do autor (2015)

A Figura 5.6 (a) mostra o detalhe dos enrolamentos de AT e BT posicionados de forma concêntrica e que são montados em uma das colunas do núcleo ferromagnético. A figura 5.6(b) mostra a estrutura de calços e desviadores de fluxo que são utilizados na montagem do enrolamento e que devem ser considerados na simulação.

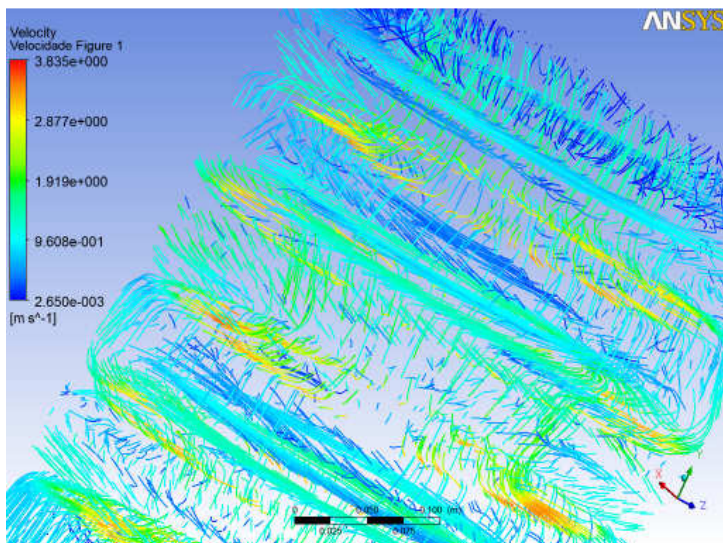
Figura 5.6 - (a) Coluna de enrolamento AT e BT;
(b) espaçadores entre os discos de enrolamentos



Fonte: do autor (2015)

Para a simulação mostrada, considera-se o escoamento interno ao enrolamento estando em regime laminar, já que não há bombas forçando a circulação de óleo pelo circuito hidráulico. Nos enrolamentos as perdas foram inseridas como sendo distribuídas por todos os discos de forma proporcional. A figura 5.7 mostra as linhas de fluxo de óleo no interior do enrolamento; nota-se que o fluxo de óleo é desviado a cada conjunto de seções e isso se dá devido à utilização de desviadores (chicanas) instalados para esse fim.

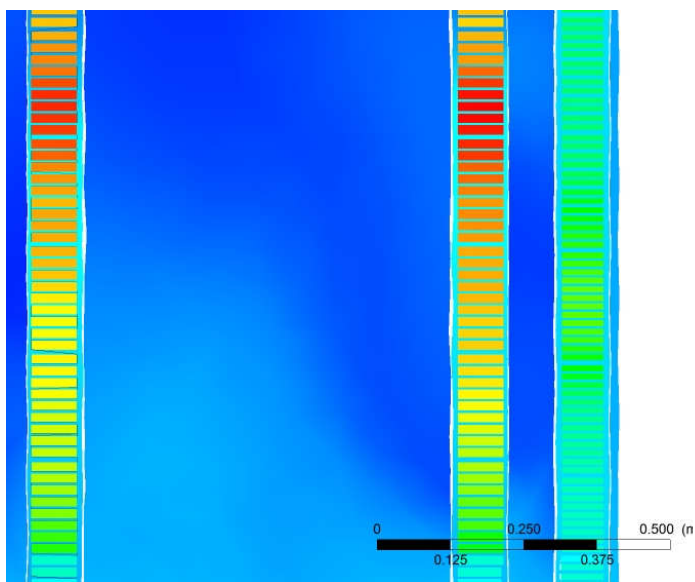
Figura 5.7 - Linhas de Fluxo de óleo no enrolamento



Fonte: do autor (2015)

O óleo passando pelos enrolamentos tem como principal função a retirada de calor gerado. A figura 5.8 mostra a temperatura em um plano transversal nos enrolamentos. Nota-se que na parte próxima ao topo do enrolamento existe uma região com maior aquecimento, sendo esse o resultado esperado.

Figura 5.8 - Temperatura no enrolamento



Fonte: do autor (2015)

5.7 Validação dos resultados obtidos na simulação

Com a simulação das condições de aquecimento do transformador concluída, faz-se necessária a validação quando comparado ao transformador real. Para isso será feita a comparação com os resultados obtidos no ensaio de elevação de temperatura descrito no capítulo 4. A validação do modelo se dará com a comprovação dos valores medidos com a fibra ótica instalada e os valores obtidos pela simulação no mesmo ponto.

5.8 Levantamento das grandezas de interesse

Com a simulação finalizada pode-se obter algumas grandezas de interesse a serem utilizadas para a aplicação da metodologia de cálculo em tempo real, que será discutida no capítulo 7:

- Localização do ponto mais quente do enrolamento;
- Levantamento dos coeficientes de transferência de calor do enrolamento para diversas condições de carregamento;

- Levantamento do perfil de temperatura dos enrolamentos;
- Levantamento dos valores de vazão do óleo no interior do enrolamento.

5.9 Conclusões

A modelagem em 3D fornece subsídios para a simulação tanto do fluido quanto da troca de calor entre os elementos. Essa abordagem, com a evolução das ferramentas de cálculo, deve ter maior participação no desenvolvimento de equipamentos como os transformadores, pois pode facilitar e diminuir os custos envolvidos no processo de aprimoramento e refinamento de projeto, além de diminuir o tempo para análise das melhorias.

Na simulação realizada nesse capítulo as maiores dificuldades foram referentes a montagem do modelo geométrico. Mesmo sendo bastante detalhado, o modelo ainda não contemplou todos os elementos do transformador, assim como os calços, tirantes, conexões entre bobinas, buchas e comutador. Outra dificuldade é referente à simulação, na qual optou-se por tratar todos os cilindros de papelão, espaçadores e desviadores de fluxo de óleo como sendo termicamente isolantes. Isso possibilitou a diminuição elementos utilizado na simulação.

Para avaliar os resultados da simulação numérica, optou-se por modelar somente um conjunto de enrolamentos, isso demonstrou a correta utilização dos parâmetros de geometria e dos materiais utilizados, levando a resultados condizentes com os esperados. Por outro lado, para obter todos os valores de temperatura no interior do transformador deve-se realizar a simulação com todos os elementos que o compõem, incluindo núcleo, elementos de fixação, óleo, enrolamentos, etc. Essa simulação, além de necessitar de grande capacidade computacional, necessita também de grande tempo de simulação devido à dimensão do modelo, além de ser de difícil controle e elaboração pois existem elementos da ordem de alguns milímetros e elementos da ordem de dezenas de centímetros. Para contornar esse problema e visando atender a necessidade de obtenção de resultados condizentes com a realidade, optou-se por limitar o modelo simulado para a obtenção da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, utilizando as condições de contorno de forma correta. A geometria utilizada e os valores numéricos obtidos nas simulações estão mostrados e discutidos no Capítulo 8.

O Capítulo 6, mostra a forma de obtenção da temperatura do ponto mais quente do enrolamento utilizando o cálculo proposto pela norma IEEE C57.91. Os valores são necessários para se entender a forma convencional de cálculo e as considerações realizadas para sua obtenção.

6 RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DA NORMA IEEE C57.91

6.1 Introdução

O problema de carregamento de transformadores em condições acima das especificadas em placa tem sido bastante discutido nas últimas décadas. Esta necessidade começou a ocorrer devido à falta de investimentos no Setor Elétrico e as políticas operacionais, que foram modificadas devido a restrições impostas pelos órgãos reguladores do sistema. A resolução 191 de dezembro de 2005 da ANEEL e o Procedimento de Rede Submódulo 2.3 de 2012 da ONS evidenciam a necessidade do monitoramento da temperatura para o controle e aplicação de cargas ao equipamento.

A norma brasileira que define a forma do carregamento de transformadores é a NBR 5416 que adota procedimento similar ao da IEEE C57.91 (1995).

Este é o modelo de cálculo empregado para a análise e acompanhamento das temperaturas utilizado nos sistemas de monitoramento de transformadores. Com base nessas condições, será analisada nesse capítulo a forma de realização dos cálculos proposta pela norma, citando as principais dificuldades na sua aplicação prática.

Os valores de temperatura obtidos por esta norma também serão utilizados para comparação com os valores de temperatura obtidos pelo método de cálculo proposto no capítulo 7.

6.2 Definições e conceitos

Algumas definições são apresentadas abaixo para auxiliar a compreensão do texto:

Fator de aceleração de envelhecimento: quando se opera o transformador com temperaturas do ponto mais quente (“hot-spot”) acima das estipuladas como nominais (p.e. para a classe de 65°C a temperatura do ponto quente é 110°C), o fator de aceleração de envelhecimento é maior que 1. Para temperaturas do ponto mais quente menores que as especificadas em norma o fator de aceleração de envelhecimento é menor que 1. Este fator é aplicado para o cálculo da estimação de vida útil do transformador.

Fluxo dirigido: Indica que a maior parte do fluxo de óleo de retorno dos trocadores de calor ou radiadores é direcionado de forma a

passar diretamente entre os enrolamentos do equipamento, por meio dos dutos de refrigeração e canaletas, previamente construídas para este fim.

Fluxo não-dirigido: Indica que o óleo dos trocadores de calor não é forçado através dos enrolamentos, ou seja, o retorno é feito livremente no tanque. Este equipamento não possui os dutos forçando o óleo sobre o enrolamento como no caso do de fluxo dirigido.

Percentual de perda de vida útil: Envelhecimento equivalente em horas na temperatura do ponto mais quente de referência sobre um período de tempo (normalmente 24 horas) multiplicado por 100, dividida pelo envelhecimento normal em horas na temperatura do ponto mais quente de referência.

Vida da isolação do Transformador: é o tempo total entre o estado inicial em que a isolação é considerada nova e o estado final, causado tanto por desgaste do dielétrico, desgaste por curto-circuito ou movimentos mecânicos, que podem ocorrer em operação normal e que causem uma falha elétrica.

6.3 Cálculo da temperatura do ponto mais quente de acordo com a IEEE C57.91

As equações 6.1 e 6.2 se referem ao equacionamento proposto pelo Anexo G da recomendação C57.91 (1995), adotadas a partir do trabalho de Pierce (1994). Esse método é mostrado aqui pois seu entendimento, conforme descrito na referida norma, não é simples e algumas explicações na adoção das grandezas são necessárias.

Para o acompanhamento da operação do transformador é importante conhecer o valor do ponto mais quente do enrolamento, e que pode ser obtido por:

$$\Theta_H = \Theta_A + \Theta_{BO} + \Delta\Theta_{WO/BO} + \Delta\Theta_{H/WO} \quad (6.1)$$

onde,

Θ_H , Temperatura do ponto mais quente do enrolamento, [°C].

Θ_A , Temperatura ambiente, [°C].

Θ_{BO} , Temperatura do fluido no fundo do tanque do equipamento, [°C].

$\Delta\Theta_{WO/BO}$, Diferença entre a temperatura do ponto mais quente no óleo e a temperatura do óleo no fundo do tanque, [°C].

$\Delta\Theta_{H/WO}$, Diferença entre a temperatura do ponto mais quente nos enrolamentos e o ponto mais quente no óleo, [°C].

Observa-se que a norma considera para o cálculo da temperatura do ponto quente do enrolamento três parcelas somados à temperatura ambiente. Pode-se estudar a influência de todos estes parâmetros separadamente. A seguir será mostrado como se pode obter cada um deles:

- Temperatura do fluido no fundo do tanque do equipamento (Θ_{BO})

Pode ser obtida por meio da medição direta de temperatura na parte inferior do tanque.

- Diferença entre a temperatura do ponto mais quente no óleo e a temperatura do óleo no fundo do tanque ($\Delta\Theta_{WO/BO}$)

É obtida pela equação 6.2:

$$\Delta\Theta_{WO/BO} = H_{HS}(\Theta_{TDO} - \Theta_{BO}) \quad (6.2)$$

onde,

H_{HS} , proporção da altura de localização do ponto quente sobre a altura do enrolamento;

Θ_{TDO} , Temperatura do fluido no topo do duto, [°C].

Para a obtenção de $\Delta\Theta_{WO/BO}$ supõe-se conhecer a localização do ponto mais quente do enrolamento que se refere à H_{HS} . Outra suposição é que a temperatura do fluido no topo do duto é conhecida e é calculada com base somente na diferença de calor gerado pelas perdas devido à mudança da condição de operação do transformador. Essas duas condições nem sempre são reais já que não se considera a geometria, canais internos dos enrolamentos e possíveis problemas de projeto na estimação desse termo da equação.

- Diferença entre a temperatura do ponto mais quente nos enrolamentos e o ponto mais quente no óleo ($\Delta\Theta_{H/WO}$) [°C]

A norma indica que deve-se conhecer o fator de ponto mais quente utilizado pelo fabricante para ser aplicado sobre o cálculo da temperatura média do enrolamento. Da mesma forma que para o item acima, essa suposição não considera a geometria, complexidade dos canais de refrigeração, etc. De posse desse fator, basta multiplicá-lo pela

temperatura média do enrolamento para obter o valor da temperatura do ponto mais quente.

6.4 Resultados para as temperaturas do transformador a partir do método proposto pela IEEE

Utilizando-se a rotina de cálculo proposta na norma IEEE C57.91 fez-se a estimativa de temperatura do ponto mais quente. Os valores de temperatura estimada estão mostrados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados para as temperaturas utilizando a norma IEEE C57.91

Carga	Temperatur a do topo do óleo (°C)	Temperatur a de fundo do óleo (°C)	Temperatur a média do enrolament o (°C)	Gradiente de ponto quente (°C)
100%	62,20	43,20	46,44	19,84

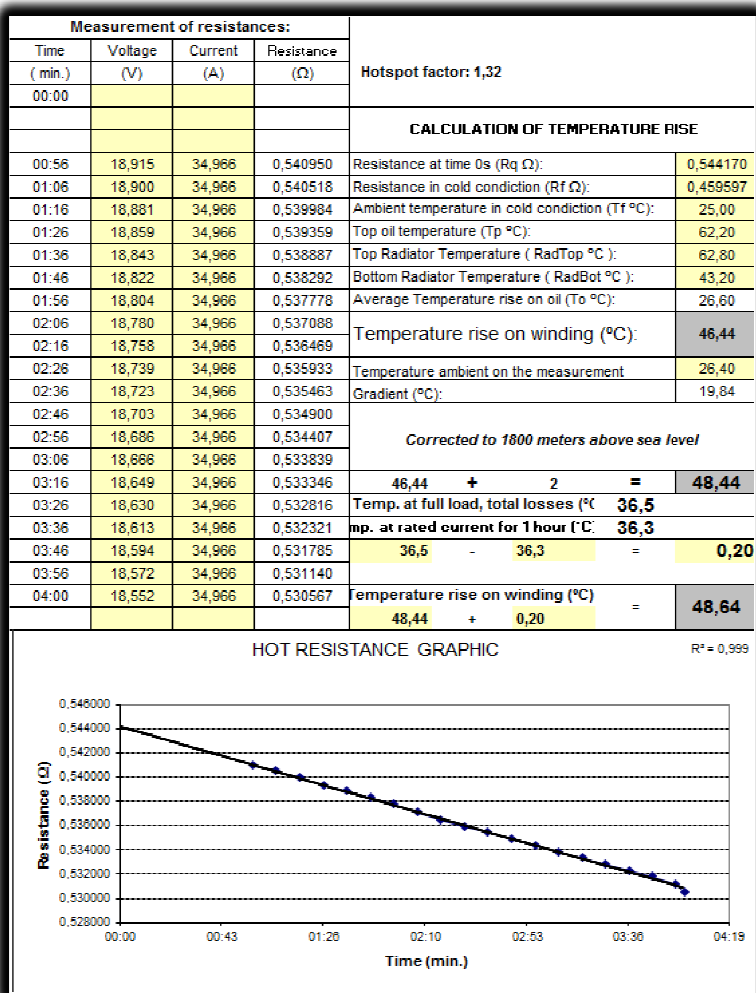
Os dados para cálculo das estimativas apresentados na tabela 6 foram obtidos do ensaio de aquecimento do transformador de potência (figura 6.1).

6.5 Conclusões

Os resultados observados por Peterchuck & Pahwa (2002) demonstraram a grande influência de parâmetros empíricos no resultado da estimação de temperaturas e que uma escolha inapropriada destes parâmetros pode fazer com que o resultado se desvie em demasia do real.

Outra demonstração da fragilidade dos métodos propostos na recomendação IEEE C57.91 (1995), foi obtida por Dupont & Chaves (1999), que quantificaram o erro para um determinado equipamento analisado, através da modelagem proposta na recomendação e obtiveram um desvio de até 20°C na temperatura de topo de óleo para condições de carga pouco acima das nominais.

Figura 6.1 - Ficha do ensaio de aquecimento do transformador



O desenvolvimento de métodos que reflitam melhor as condições de temperatura internas ao transformador é essencial já que a limitação da carga dos transformadores ocorre simplesmente pela limitação térmica do ponto quente do mesmo (se for a classe de 65 $^{\circ}\text{C}$ a temperatura limite é 110 $^{\circ}\text{C}$ no ponto quente e se for para a classe de 55 $^{\circ}\text{C}$ a temperatura limite é de 95 $^{\circ}\text{C}$ no ponto quente de acordo com a IEEE C57.91 de 1995). Assim, a limitação de carregamento pode ser

modificada se houver um melhor acompanhamento da temperatura do transformador, podendo em alguns casos haver o aumento na aplicação da carga sobre o equipamento respeitando os limites dos materiais.

A utilização desta metodologia para a estimação das temperaturas nos sistemas de monitoramento em tempo real dos transformadores pode levar ao subcarregamento do equipamento e conseqüente elevação de custos de fornecimento de energia, já que para o atendimento de cargas adicionais devem ser previstos novos transformadores.

7 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO “ON-LINE” DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR ATRAVÉS DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

7.1 Introdução

Alguns métodos desenvolvidos para a estimação de temperaturas no interior dos transformadores têm como principal limitação à necessidade de se realizar os ensaios de elevação de temperatura e demais ensaios no transformador de potência, conforme discutido nos Capítulos 1 e 6.

Na tentativa da aplicação da estimação das temperaturas para os transformadores, pode-se deparar com situações para as quais se subestime a capacidade de carregamento do equipamento devido ao fato de se obter uma condição de criticidade para os valores de temperatura interna do transformador. Para que se evitem situações como estas, neste capítulo está apresentado um método para cálculo de aquecimento do transformador e estimação das temperaturas no interior do transformador de potência. Esta estimação foca a aplicação no monitoramento em tempo real da elevação de temperatura do transformador e conseqüentemente, das condições de sobrecarga às quais pode-se submetê-lo. O item 7.2 mostra a forma convencional de se realizar o cálculo de elevação de temperatura e aborda as principais dificuldades para essa análise. No item 7.3 está mostrada a metodologia de cálculo utilizando os resultados da simulação numérica proposta no Capítulo 5 e mostrada no Capítulo 8.

7.2 Cálculo analítico convencional da condição de aquecimento do transformador

A simulação numérica requer um grande e demorado esforço computacional para obtenção dos resultados. Portanto, quando é necessário se obter estimativas de valores em tempo real, visando acompanhar a operação do equipamento, esse método de análise possui aplicação restrita. Visando atender ao monitoramento, será mostrada uma forma de aprimorar o cálculo convencional da elevação de temperatura no ponto mais quente, utilizando para isso os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas na etapa de projeto do equipamento.

7.2.1 Cálculo da convecção para o caso do enrolamento utilizando o método analítico

No transformador, o problema da troca de calor por convecção é tradicionalmente tratado com a utilização do termo de troca de calor por convecção adicionado à equação geral de balanço de energia; esse termo é definido como:

$$Q_r = hA(T_s^i - T_f^i) \quad (7.1)$$

em que,

Q_r – energia térmica transferida do enrolamento, em (J)

h – coeficiente de transmissão de calor por convecção, em ($W/m^2 K$);

A – área de contato, em (m^2);

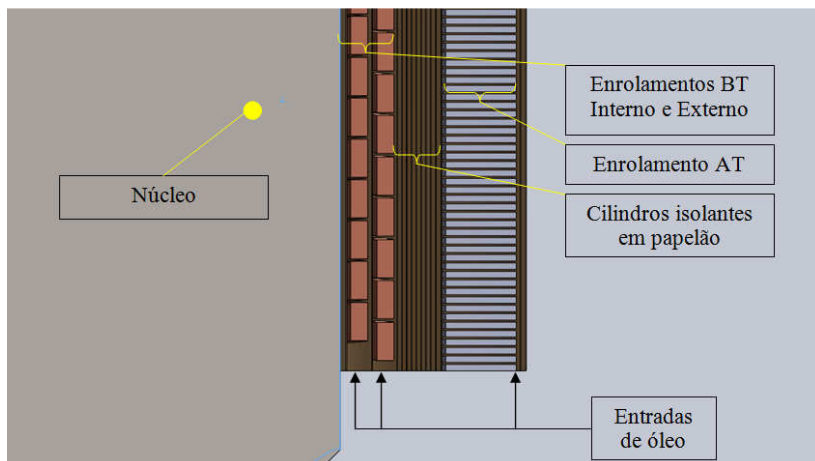
T_s^i – temperatura da superfície de contato, em (K);

T_f^i – temperatura média do fluido de contato, em (K).

A dificuldade prática da utilização desta abordagem está no fato de não se conhecer o valor do coeficiente h e da temperatura do fluido. Além disso, os valores desses parâmetros dependem dos níveis de troca de calor entre o sólido e o fluido, da geometria do problema e das características do fluido. A modelagem desses parâmetros deve ser realizada considerando as suas variações de acordo com a temperatura.

A figura 7.1 mostra um detalhe de uma seção em corte de parte ativa do transformador. Nessa figura as setas indicam o local da entrada do óleo mais frio nos enrolamentos de baixa tensão e de alta tensão.

Figura 7.1 - Detalhe de seção do transformador



Fonte: do autor (2015)

No interior do enrolamento o escoamento do fluido vai desde a base até a parte mais superior do enrolamento, passando no entorno dos condutores e retirando o calor gerado pela circulação de corrente. Como existem barreiras e desviadores e somente uma entrada e uma saída, pode-se considerar que o escoamento é do tipo confinado, podendo a análise física do fenômeno ser tratada desta forma.

7.2.2 Cálculo da elevação de temperatura do óleo nos dutos de refrigeração do enrolamento.

Além do cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção ser muito complexo, o cálculo da temperatura do óleo no interior do enrolamento também possui dificuldades para sua obtenção.

Para que se possa calcular em toda a extensão do enrolamento o valor das temperaturas dentro dos pacotes das bobinas é necessário que se conheça como aumenta o valor da temperatura do óleo que escoar no interior dos dutos de refrigeração. Esse cálculo influencia na consideração da troca de calor por convecção no interior dos dutos. Segundo Incropera (2003), a equação 7.2 pode ser utilizada para se obter a diferença média da temperatura de um fluido para escoamento em regime permanente, que no caso deste trabalho, considera-se sendo o óleo:

$$Q = mc\Delta T_o \quad (7.2)$$

Q – Quantidade de calor absorvida pelo óleo [J/s]

m – massa de óleo [kg]

c – calor específico do óleo [J/(kg.K)]

ΔT_o – diferença da temperatura entre a entrada e a saída de óleo, para cada segmento [K]

O valor da massa de óleo que atravessa o duto em regime permanente, também obtido de Incropera (2003), pode ser calculada utilizando-se a equação 7.3:

$$m_o = v\rho \quad (7.3)$$

v – vazão de óleo [m³/s]

ρ – densidade [kg/m³]

A quantidade de calor transferida do enrolamento para o óleo, em regime permanente, pode ser calculada pela equação 7.1, reescrita abaixo:

$$Q_r = hA(T_S^i - T_f^i)$$

Considerando o regime permanente, pode-se calcular a elevação de temperatura de uma parte qualquer do óleo escoando pelos dutos, com a utilização da equação 7.4:

$$\Delta T = \frac{Ah}{v\rho c} \quad (7.4)$$

7.2.3 Comentários sobre o método analítico

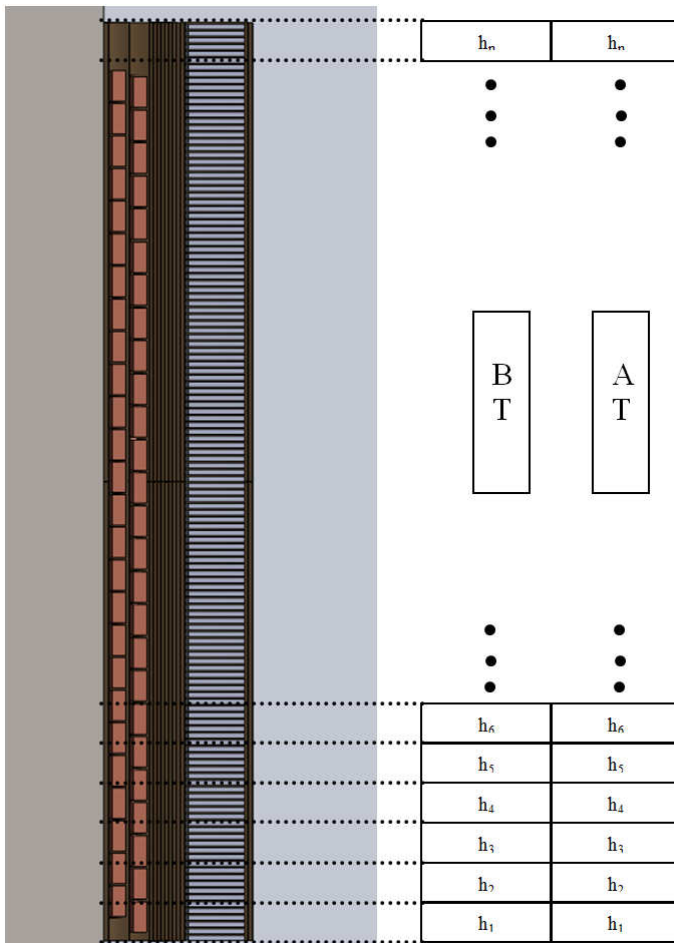
Utilizando o método analítico convencional para a obtenção das temperaturas no interior do transformador depara-se com a dificuldade da obtenção de h e são inseridos erros para a sua obtenção conforme descrito no item anterior. Na prática esses erros são cumulativos e levam a uma estimativa conservadora para esse parâmetro, fazendo com que o projeto seja conservador e atenda aos requisitos de refrigeração pretendida.

Caso os valores desse coeficiente sejam mais precisos, é possível se estimar melhor os valores de temperatura, controlando-os na condição de operação do transformador. O item a seguir mostra uma forma de se obter os valores de h utilizando a simulação numérica e aplicando-os a um cálculo analítico.

7.3 Modelagem das condições de aquecimento para cálculo em tempo real utilizando os parâmetros obtidos com a simulação numérica

A estimativa do coeficiente de transferência de calor (h) é importante pois, a partir dessa estimativa, tem-se a possibilidade de realizar o cálculo analítico de forma mais precisa. Como já citado, a estimativa desse parâmetro é de extrema dificuldade utilizando o cálculo analítico já que esse coeficiente é fortemente influenciado pela geometria do problema, propriedades do fluido e temperaturas do sólido e fluido. A utilização da simulação numérica traz como vantagem a obtenção do coeficiente de transferência de calor para toda a geometria do problema, de forma distribuída.

A figura 7.3 mostra a proposição para o cálculo do aquecimento do transformador utilizando os coeficientes distribuídos para a seção do enrolamento. Os valores de h_1, h_2, \dots, h_n , representam os valores dos coeficientes para cada uma das seções transversais do enrolamento e são diferentes para a BT e AT. No caso de enrolamentos com múltiplas camadas deve ser utilizado um conjunto de coeficientes h para cada conjunto de bobinas que estejam separados fisicamente por cilindros, que tenham a função de confinar o fluxo de óleo, caracterizando canais de refrigeração independentes.

Figura 7.2 - Distribuição dos coeficientes h para o enrolamento

Fonte: do autor (2015)

Com a consideração de que o escoamento no interior do enrolamento é confinado, assume-se que o óleo possui somente um caminho a seguir e pode-se tratar o problema discretizando-o em segmentos transversais, reduzindo o problema ao cálculo de elevação de temperatura para cada segmento.

Para se obter a temperatura do óleo que entra no segmento subsequente a ser utilizada como segmento seguinte, soma-se a diferença de temperatura calculada pela equação 7.5 com a temperatura de entrada do segmento atualmente calculado. Assim, a equação para a

elevação de temperatura do óleo no enrolamento pode ser descrita substituindo-se as temperaturas de entrada e saída do óleo, da seguinte forma:

$$T_f = T_i + \frac{Ah}{v\rho c} \quad (7.5)$$

T_f – Temperatura do fluído no final do segmento considerado (°C)

T_i – temperatura do fluído no início do segmento considerado (°C)

Agrupando-se os parâmetros que representam as características de escoamento e dos materiais envolvidos, que serão obtidos com a simulação numérica, tem-se a seguinte representação para a equação 7.6:

$$T_f = T_i + AK \quad (7.6)$$

K – Coeficiente de elevação de temperatura (°C/m²)

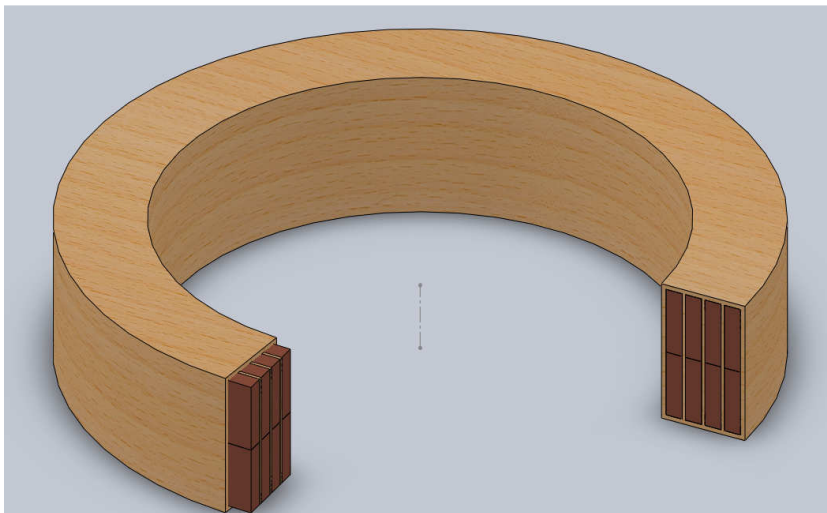
O coeficiente K representa a condição de elevação de temperatura da área A, considerada para cada segmento e agrupa os dados extraídos da simulação numérica.

7.3.1 Cálculo do ponto mais quente do enrolamento

Como o cálculo de maior interesse é o do ponto mais quente para o enrolamento, deve-se identificar, com a simulação numérica, o posicionamento desse ponto. A partir dessa identificação a estimativa de temperatura é feita com a análise simplificada do empacotamento dos condutores.

A figura 7.4 mostra o aspecto de um disco de condutores do enrolamento, a quantidade de condutores de cobre empilhados e dispostos lado a lado depende das características do projeto do transformador. Independente da geometria, o posicionamento do ponto mais quente do enrolamento está situado na parte mais interna do pacote de condutores. Com a simulação numérica pode-se obter a localização desse ponto e extrair também seu gradiente de elevação de temperatura em relação ao óleo.

Figura 7.3 - Vista típica de um disco de enrolamento



Fonte: do autor (2015)

7.4 Comentários sobre o método proposto

A eliminação da necessidade de aproximar a geometria do transformador e as condições de fluxo de óleo para a obtenção do coeficiente de transmissão de calor (h) possibilita a utilização do cálculo analítico para estimar os valores de temperatura no interior do transformador com maior precisão.

De forma ideal é interessante utilizar a simulação numérica para a estimativa da temperatura para a aplicação em tempo real. Entretanto essa condição é inviável pois necessita de grande tempo e esforço computacional para a obtenção dos resultados.

Alternativamente a essa condição, propõe-se um método que utiliza valores de alguns parâmetros obtidos na simulação numérica para a complementação do cálculo analítico, aumentando a confiabilidade nos resultados e tratando o problema de forma objetiva, que é a obtenção do ponto mais quente do enrolamento para o monitoramento em tempo real.

Um processo iterativo de cálculo pode ser montado com base nas equações 7.4 a 7.8 utilizando os valores de velocidade, vazão e entalpia,

obtidos com ajuda da simulação numérica. Para cada condição de carregamento do transformador, tem-se uma condição de regime permanente para esses parâmetros, que serão utilizados no cálculo iterativo. O cálculo pode ser implementado no computador utilizado como servidor do sistema de monitoramento em tempo real do transformador, que já possui as demais informações do equipamento como corrente de carga, tensão de funcionamento e temperaturas de trabalho do óleo em um ou mais pontos.

Com a utilização dos valores obtidos na simulação numérica espera-se obter melhores estimativas de temperatura do que as obtidas por meio dos métodos descritos nas normas técnicas, levando à melhor utilização da capacidade de transformação na operação dos equipamentos.

Os resultados de cálculo do ponto mais quente, utilizando o método proposto no item 7.3, estão mostrados no Capítulo 9, incluindo as comparações e discussões sobre os resultados.

No Capítulo 8, estão mostradas as simulações numéricas realizadas e como são obtidos os valores dos parâmetros utilizados no método apresentado no item 7.3.

8 RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

8.1 Introdução

Nesse capítulo estão mostradas as simulações numéricas realizadas, além da sintetização e extração dos parâmetros mostrados no Capítulo 7, necessários ao cálculo analítico para a aplicação em tempo real.

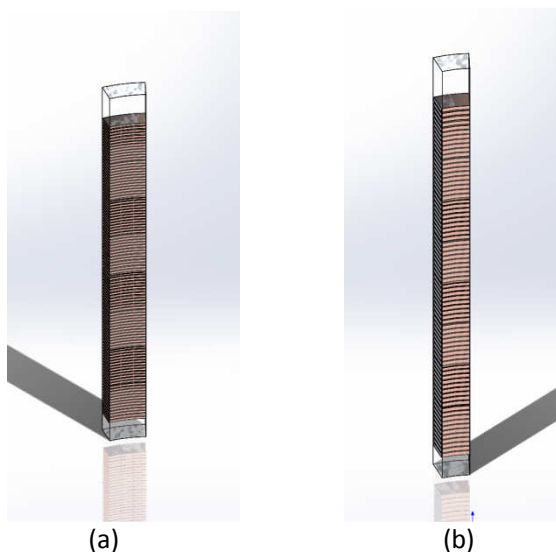
No item 8.2 estão mostradas as geometrias utilizadas para a simulação numérica dos enrolamentos de AT e BT. No item 8.3 estão mostradas as condições de carregamento simuladas, juntamente com os resultados numéricos obtidos. Procurou-se simular as condições de carregamento realizadas para o ensaio de elevação de temperatura mostrado no Capítulo 3 de modo a possibilitar a validação da simulação, além disso, realizou-se mais uma simulação, com valor de carregamento intermediário.

Os parâmetros retirados das simulações estão sintetizados e avaliados nos itens 8.3 a 8.6, com relação a sua aplicação e comportamento em relação às medidas reais. Os conceitos e valores abordados no Capítulo 8 serão utilizados para os cálculos mostrados no Capítulo 9.

8.2 Geometria do transformador

Os dados da geometria do transformador são importantes, pois influenciam diretamente nos resultados obtidos. O principal componente a ser analisado é o enrolamento do equipamento, que no caso estudado, é composto por enrolamento de baixa tensão e de alta tensão. Para a análise proposta, optou-se por avaliar a seção mostrada 8.1 para os enrolamentos de alta e baixa tensão. Essa escolha baseia-se na condição de interesse que é a dinâmica no interior de cada enrolamento. A simplificação da geometria está fundamentada na existência de canais longitudinais com isolamento térmica realizada pelos cilindros de suporte, calços e os espaçadores em papel, mostrados nos Capítulos 2 e 5. Assim, analisaram-se os enrolamentos de modo a se obter os valores de elevação de temperatura em cada canal de óleo longitudinal existente, conforme mostrado nas figuras 8.1(a) para o enrolamento de AT e (b) para o enrolamento de BT.

Figura 8.1 - (a) Canal enrolamento de AT; (b) Canal do enrolamento de BT



Fonte: do autor (2015)

Para as duas geometrias da figura 8.1 obtêm-se os perfis de temperatura em regime permanente e condições de escoamento do óleo que circunda as parcelas dos enrolamentos consideradas. Esses dados estão mostrados no item 8.3.

8.3 Casos analisados

Os casos analisados para os enrolamentos de AT e BT estão mostrados nos itens 8.3.1 a 8.3.6, optou-se por simular as seguintes condições de carregamento:

- Enrolamento AT – Carregamentos de 100%, 105% e 130%;
- Enrolamento de BT – Carregamentos de 100%, 115% e 130%.

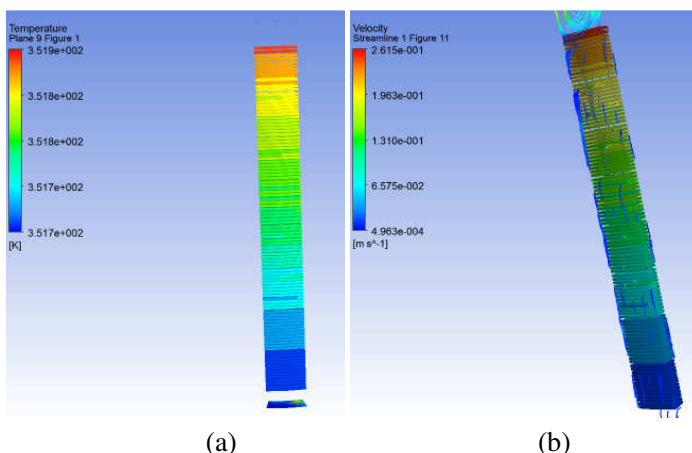
Para todas as simulações mostram-se os resultados para as temperaturas em regime permanente do enrolamento e do óleo nas seções transversais do final do segmento considerado nos dutos de

refrigeração, que nesse caso, coincidiram com as posições dos desviadores de fluxo de óleo existentes nos enrolamentos de AT e BT.

8.3.1 Enrolamento de AT – carregamento 100%

As figuras 8.2 a 8.7 mostram os valores de temperatura obtidos na condição de 100% de carga aplicada ao transformador para o enrolamento de alta tensão. A figura 8.2(a) mostra a condição de aquecimento da seção analisada do enrolamento. Na figura observa-se que o valor máximo obtido para o aquecimento dos enrolamentos é de 89°C, situado na parte superior dos enrolamentos. A figura 8.2(b) mostra as linhas de fluxo de óleo isolante escoando pelos canais internos do enrolamento de baixa tensão.

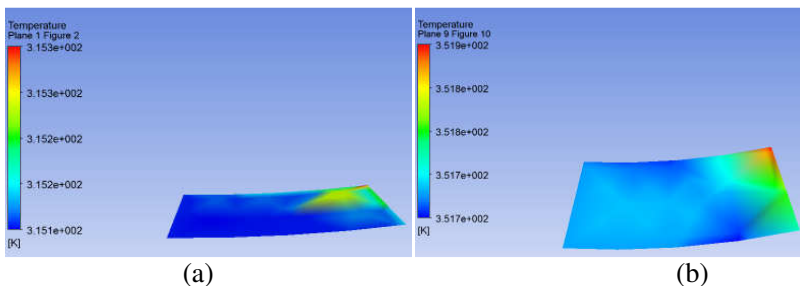
Figura 8.2 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 100%



Fonte: do autor (2015)

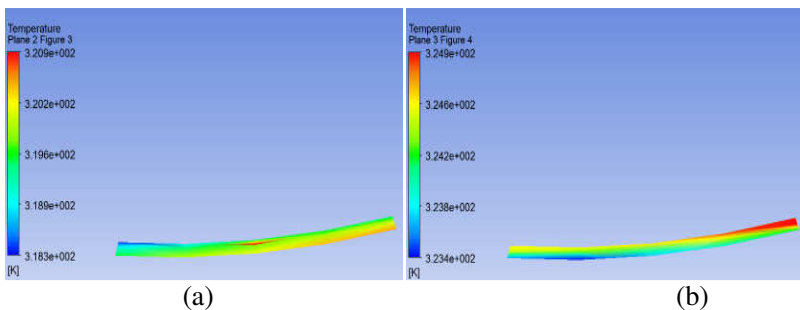
As figuras 8.3 a 8.7 mostram os perfis de temperatura do óleo nos dutos de circulação interna ao enrolamento na condição de 100% de carga. A figura 8.3(a) e (b) mostram os valores de temperatura obtidos na entrada e na saída do enrolamento, localizadas na parte inferior e superior respectivamente.

Figura 8.3 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento



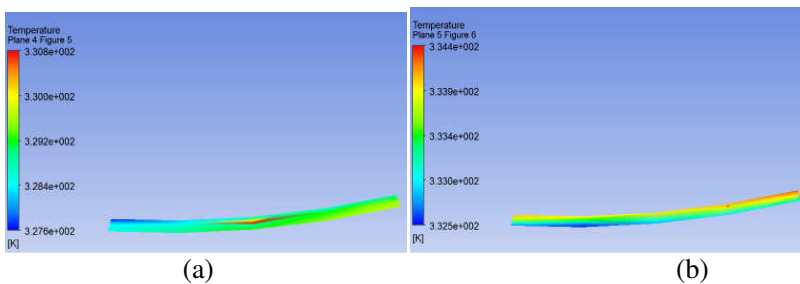
As figuras 8.4 a 8.7 mostram os valores de temperatura do óleo para a seção final dos segmentos considerados.

Figura 8.4 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2



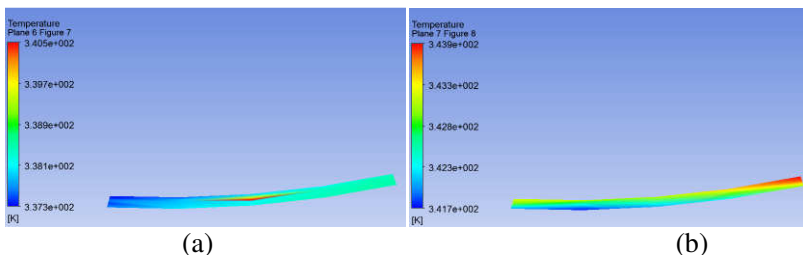
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.5 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4



Fonte: do autor (2015)

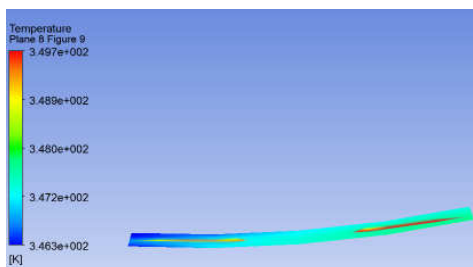
Figura 8.6 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6



(a) Fonte: do autor (2015)

(b)

Figura 8.7 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7



Fonte: do autor (2015)

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação considerando a condição de carregamento em 100% estão descritos na tabela 8.1.

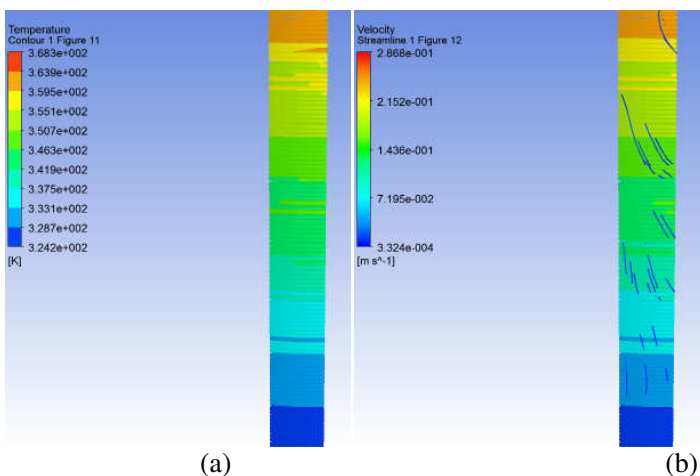
Tabela 8.1 – Dados obtidos para o enrolamento de AT , considerando a condição de carregamento de 100%

Temperatura média no final do segmento (°C)	Vazão Total (kg/s)	Área da Seção Transversal do (m ²)
41,19	-	0,01567
45,54	0,0273	0,00150
50,26	0,0269	0,00129
54,89	0,0265	0,00150
59,38	0,0267	0,00129
64,10	0,0267	0,00150
68,82	0,0267	0,00129
73,20	0,0269	0,01567
77,73	0,0271	0,01567

8.3.2 Enrolamento de AT – carregamento de 105%

As figuras 8.8 a 8.13 mostram os valores de temperatura obtidos na condição de 105% de carga aplicada ao transformador para o enrolamento de alta tensão. A figura 8.8(a) mostra a condição de aquecimento da seção analisada do enrolamento. Na figura observa-se que o valor máximo obtido para o aquecimento dos enrolamentos é de 94,3°C, situado na parte superior dos enrolamentos. A figura 8.8(b) mostra as linhas de fluxo de óleo isolante escoando pelos canais internos do enrolamento de baixa tensão.

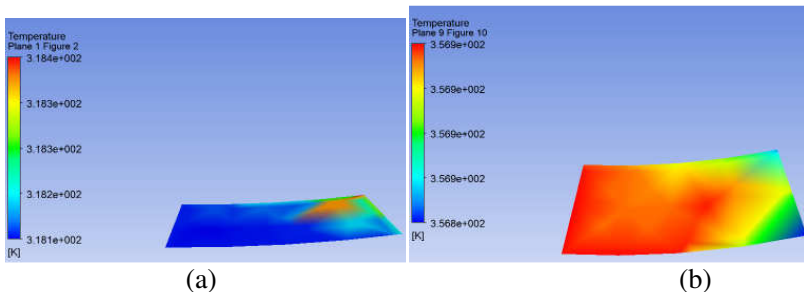
Figura 8.8 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 105%



Fonte: do autor (2015)

As figuras 8.9 a 8.13 mostram os perfis de temperatura do óleo nos dutos de circulação interna ao enrolamento na condição de 105% de carga. A figura 8.9(a) e (b) mostram os valores de temperatura obtidos na entrada e na saída do enrolamento, localizadas na parte inferior e superior respectivamente.

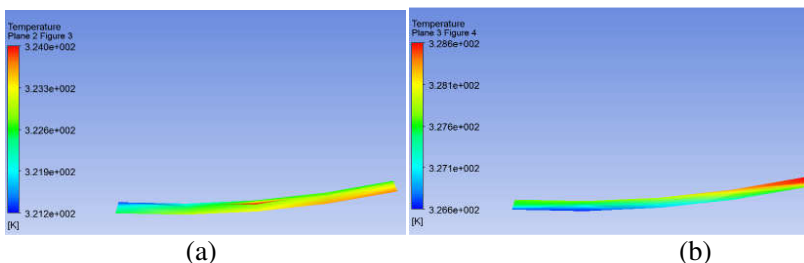
Figura 8.9 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento



Fonte: do autor (2015)

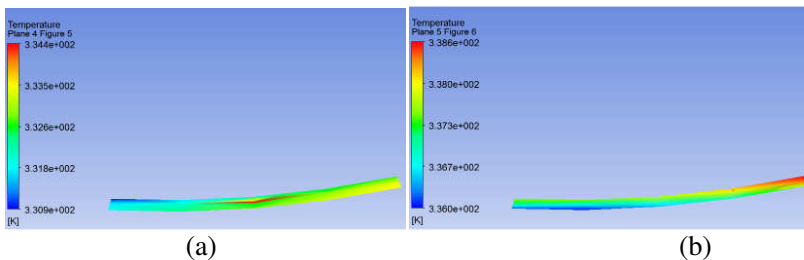
As figuras 8.10 a 8.13 mostram os valores de temperatura do óleo para a seção final dos segmentos considerados.

Figura 8.10 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2



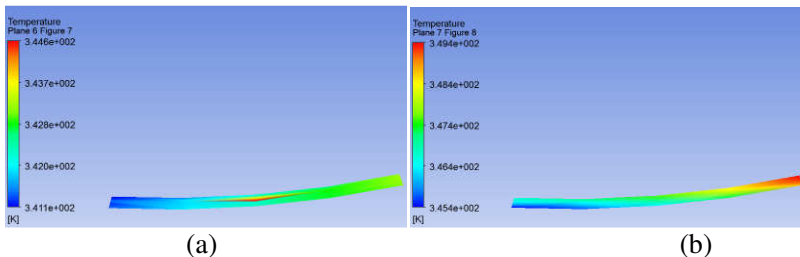
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.11- Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4



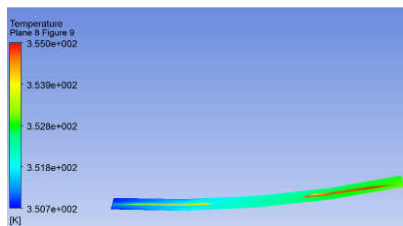
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.12 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6



Fonte: do autor (2015)

Figura 8.13 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7



Fonte: do autor (2015)

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação considerando a condição de carregamento em 105% estão descritos na tabela 8.2.

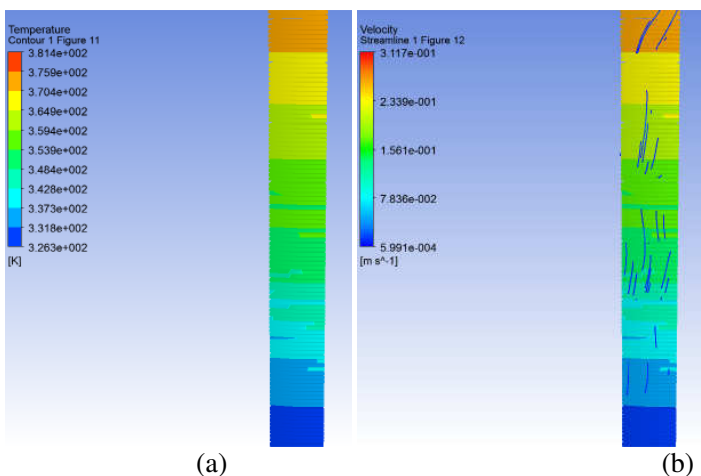
Tabela 8.2 – Dados obtidos para o enrolamento de AT, considerando a condição de carregamento de 105%

Temperatura média no final do segmento (°C)	Vazão Total (kg/s)	Área da Seção Transversal do (m ²)
44,00	-	0,01567
48,64	0,0273	0,00150
53,62	0,0269	0,00129
58,60	0,0265	0,00150
63,52	0,0267	0,00129
68,60	0,0267	0,00150
73,70	0,0267	0,00129
78,30	0,0269	0,01567
82,91	0,0271	0,01567

8.3.3 Enrolamento de AT – carregamento de 130%

As figuras 8.14 a 8.19 mostram os valores de temperatura obtidos na condição de 130% de carga aplicada ao transformador para o enrolamento de alta tensão. A figura 8.14(a) mostra a condição de aquecimento da seção analisada do enrolamento. Na figura observa-se que o valor máximo obtido para o aquecimento dos enrolamentos é de 107,4°C, situado na parte superior dos enrolamentos. A figura 8.14(b) mostra as linhas de fluxo de óleo isolante escoando pelos canais internos do enrolamento de baixa tensão.

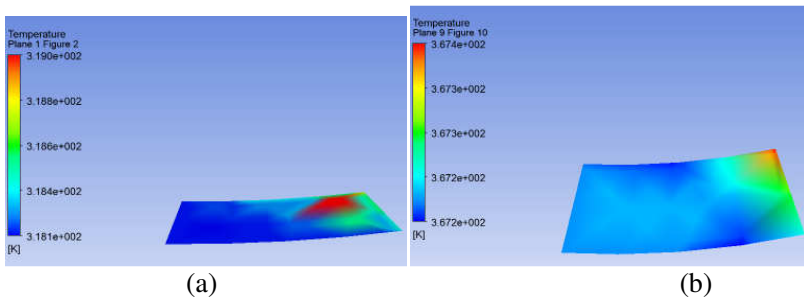
Figura 8.14 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 100%



Fonte: do autor (2015)

As figuras 8.15 a 8.19 mostram os perfis de temperatura do óleo nos dutos de circulação interna ao enrolamento na condição de 130% de carga. A figura 8.15(a) e (b) mostram os valores de temperatura obtidos na entrada e na saída do enrolamento, localizadas na parte inferior e superior respectivamente.

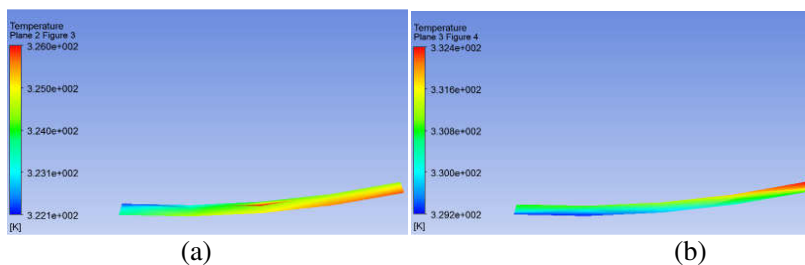
Figura 8.15 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento



Fonte: do autor (2015)

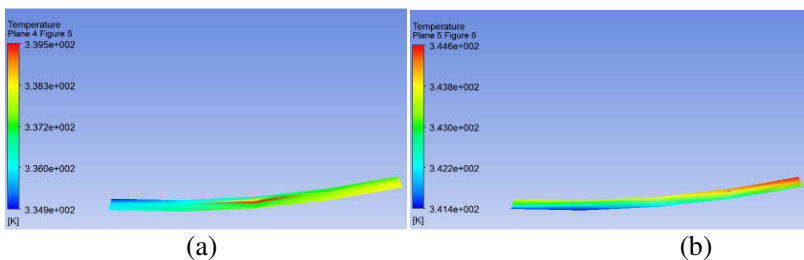
As figuras 8.16 a 8.19 mostram os valores de temperatura do óleo para a seção final dos segmentos considerados.

Figura 8.16 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2



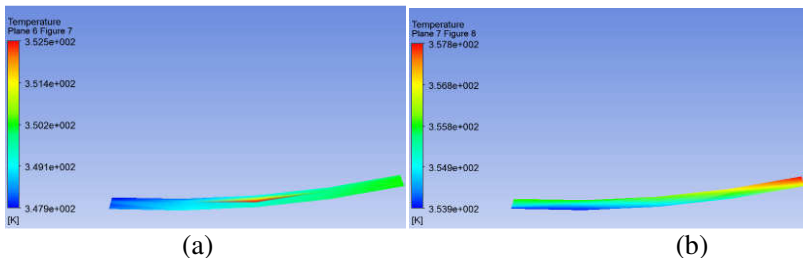
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.17 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4



Fonte: do autor (2015)

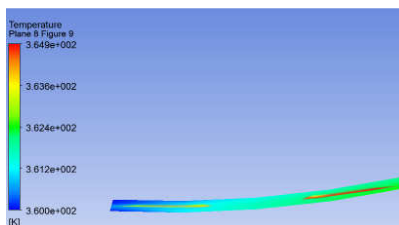
Figura 8.18 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6



(a) Fonte: do autor (2015)

(b)

Figura 8.19 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7



Fonte: do autor (2015)

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação considerando a condição de carregamento em 130% estão descritos na tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Dados obtidos para o enrolamento de AT , considerando a condição de carregamento de 130%

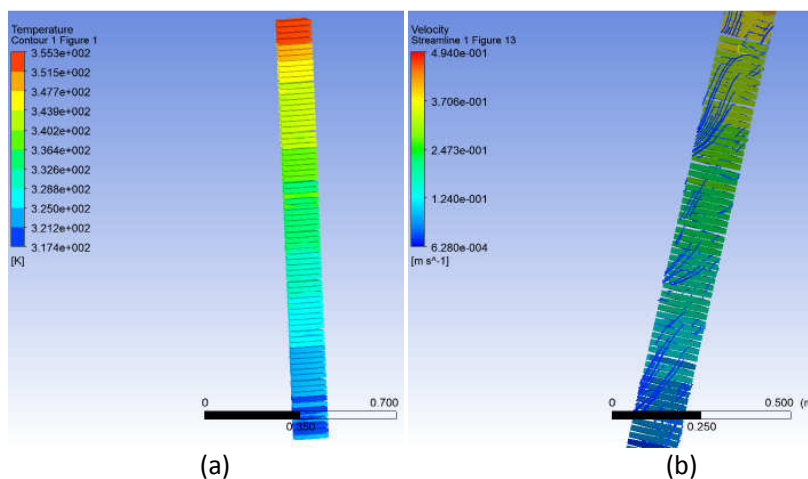
Temperatura média no final do segmento (°C)	Vazão Total (kg/s)	Área da Seção Transversal do (m ²)
44,40	-	0,01567
50,15	0,0273	0,00150
56,65	0,0269	0,00129
62,94	0,0265	0,00150
69,02	0,0267	0,00129
75,29	0,0267	0,00150
81,57	0,0267	0,00129
87,47	0,0269	0,01567
93,25	0,0271	0,01567

8.3.4 Enrolamento de BT – carregamento de 100%

As figuras 8.20 a 8.25 mostram os valores de temperatura obtidos na condição de 100% de carga aplicada ao transformador.

A figura 8.20(a) mostra a condição de aquecimento da seção analisada do enrolamento. Na figura observa-se que o valor máximo obtido para o aquecimento dos enrolamentos é de 81°C, situado na parte superior dos enrolamentos. A figura 8.20(b) mostra as linhas de fluxo de óleo isolante escoando pelos canais internos do enrolamento de baixa tensão.

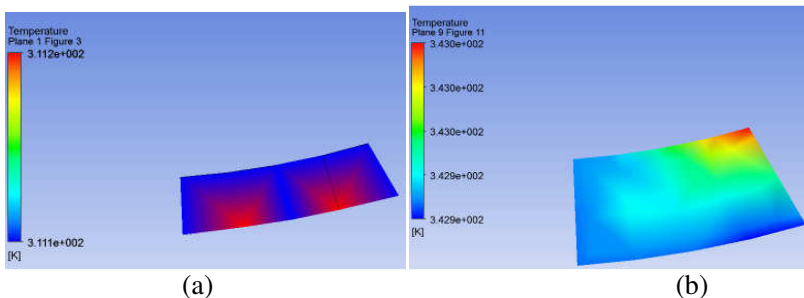
Figura 8.20 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 100%



Fonte: do autor (2015)

As figuras 8.21 a 8.21 mostram os perfis de temperatura do óleo nos dutos de circulação interna ao enrolamento na condição de 100% de carga. A figura 8.21(a) e (b) mostram os valores de temperatura obtidos na entrada e na saída do enrolamento, localizadas na parte inferior e superior respectivamente.

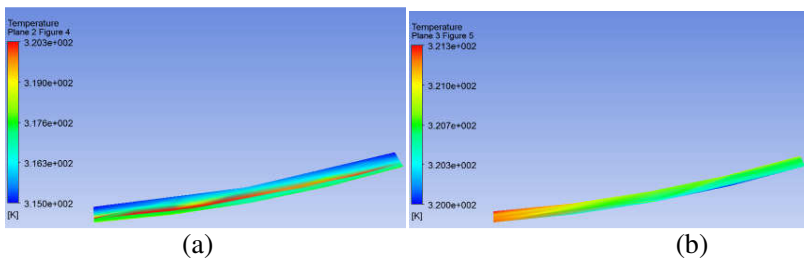
Figura 8.21 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento



Fonte: do autor (2015)

As figuras 8.21 a 8.24 mostram os valores de temperatura do óleo para a seção final dos segmentos considerados.

Figura 8.22 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2



Fonte: do autor (2015)

Figura 8.23 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4

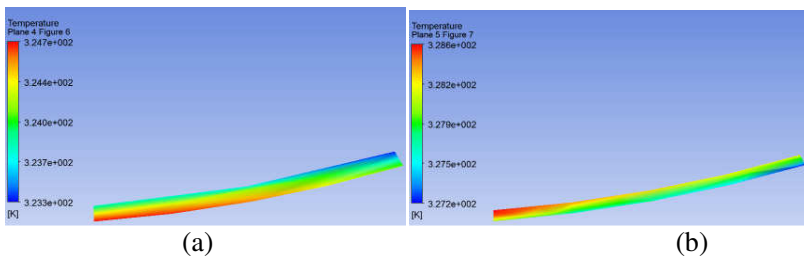
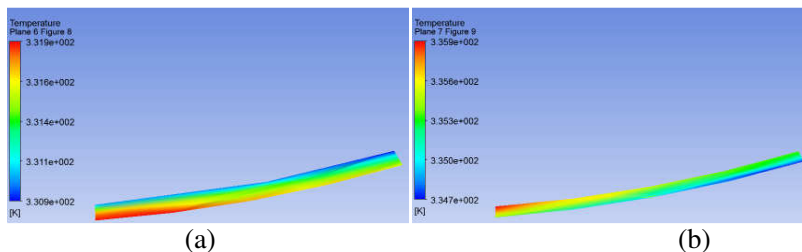
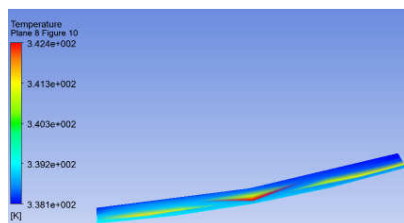


Figura 8.24 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6



Fonte: do autor (2015)

Figura 8.25 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7



Fonte: do autor (2015)

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação considerando a condição de carregamento em 100% estão descritos na tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Dados obtidos para o enrolamento de BT , considerando a condição de 100% da carga

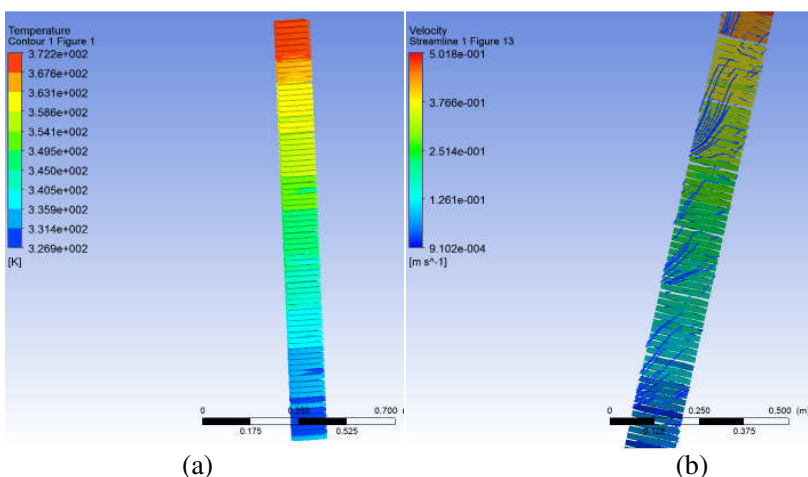
Temperatura média no final do segmento (°C)	Vazão Total (kg/s)	Area da Secao Transversal do (m ²)
38,00	-	-
42,71	0,0195	0,00088
46,72	0,01967	0,00092
49,92	0,01942	0,00088
53,87	0,02044	0,00092
57,27	0,02022	0,00088
61,26	0,02035	0,00092
64,70	0,02131	0,00088
68,98	0,01908	0,01088

8.3.5 Enrolamento de BT – carregamento de 115%

As figuras 8.26 a 8.31 mostram os valores de temperatura obtidos na condição de 115% de carga aplicada ao transformador.

A figura 8.26(a) mostra a condição de aquecimento da seção analisada do enrolamento. Na figura observa-se que o valor máximo obtido para o aquecimento dos enrolamentos é de 98°C, situado na parte superior dos enrolamentos. A figura 8.26(b) mostra as linhas de fluxo de óleo isolante escoando pelos canais internos do enrolamento de baixa tensão.

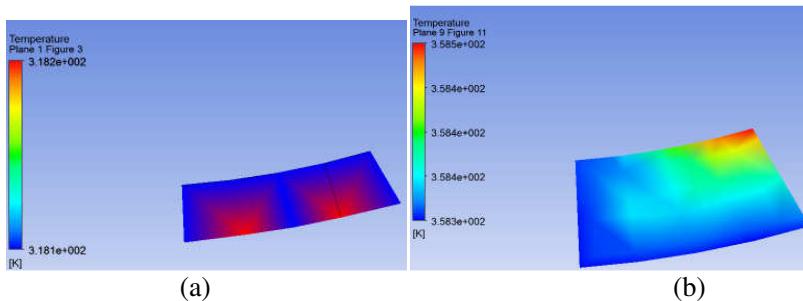
Figura 8.26 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) linhas de fluxo de óleo; para carga 115%



Fonte: do autor (2015)

As figuras 8.27 a 8.31 mostram os perfis de temperatura do óleo nos dutos de circulação interna ao enrolamento na condição de 115% de carga. A figura 8.27(a) e (b) mostram os valores de temperatura obtidos na entrada e na saída do enrolamento, localizadas na parte inferior e superior respectivamente.

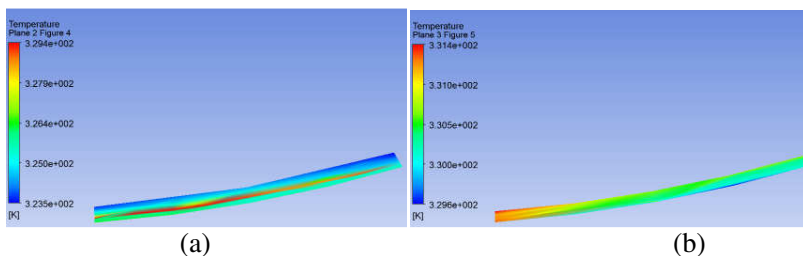
Figura 8.27 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento



Fonte: do autor (2015)

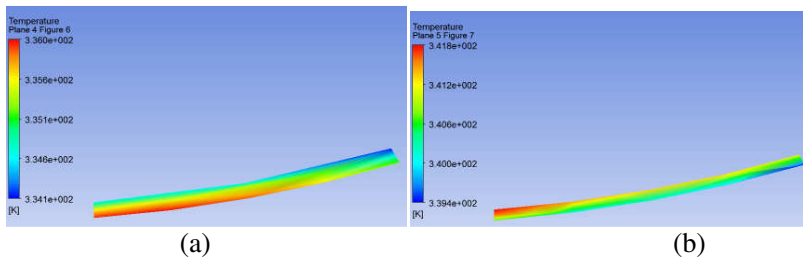
As figuras 8.28 a 8.31 mostram os valores de temperatura do óleo para a seção final dos segmentos considerados.

Figura 8.28 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2



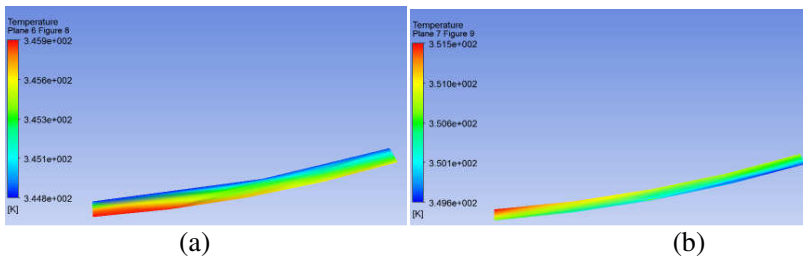
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.29 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4



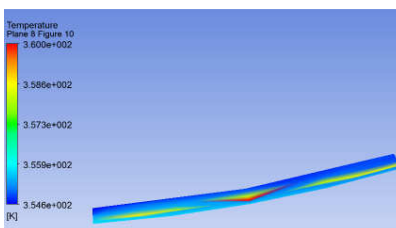
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.30 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6



Fonte: do autor (2015)

Figura 8.31 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7



Fonte: do autor (2015)

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação considerando a condição de carregamento em 115% estão descritos na tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Dados obtidos para o enrolamento de BT , considerando a condição de 115% da carga

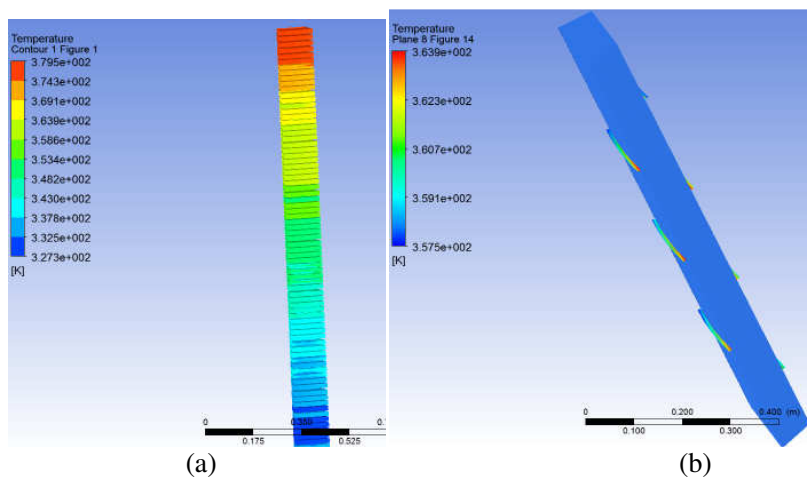
Temperatura média no final do segmento (°C)	Vazão Total (kg/s)	Área da Seção Transversal do segmento (m ²)
45,00	-	-
50,43	0,0197	0,00088
55,38	0,02036	0,00092
59,52	0,0201	0,00088
64,39	0,0205	0,00092
68,82	0,0199	0,00088
73,91	0,0199	0,00092
78,42	0,0206	0,00088
83,93	0,019	0,01088

8.3.6 Enrolamento de baixa tensão – carregamento de 130%

As figuras 8.32 a 8.37 mostram os valores de temperatura obtidos na condição de 115% de carga aplicada ao transformador.

A figura 8.32(a) mostra a condição de aquecimento da seção analisada do enrolamento. Na figura observa-se que o valor máximo obtido para o aquecimento dos enrolamentos é de 105°C, situado na parte superior dos enrolamentos. A figura 8.32 (b) mostra as posições consideradas sendo o final de cada segmento para cálculo da elevação de temperatura do enrolamento de baixa tensão.

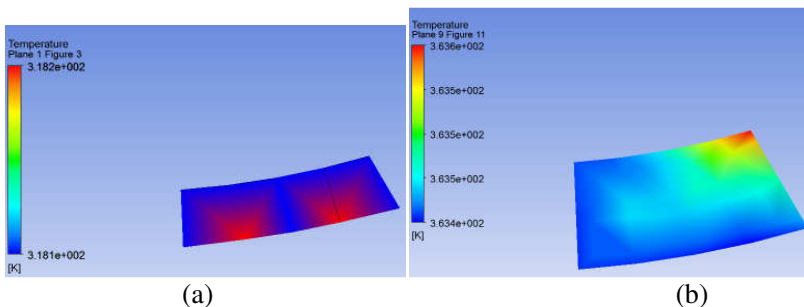
Figura 8.32 - (a) Temperaturas do enrolamento; (b) posicionamento das seções finais dos segmentos; para carga 130%



Fonte: do autor (2015)

As figuras 8.33 a 8.36 mostram os perfis de temperatura do óleo nos dutos de circulação interna ao enrolamento na condição de 130% de carga. A figura 8.33(a) e (b) mostram os valores de temperatura obtidos na entrada e na saída do enrolamento, localizadas na parte inferior e superior respectivamente.

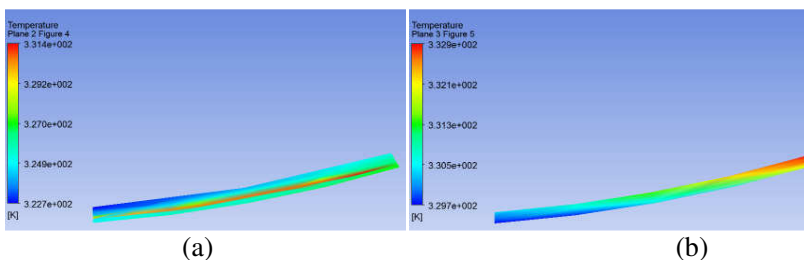
Figura 8.33 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) entrada do enrolamento; (b) saída do enrolamento



Fonte: do autor (2015)

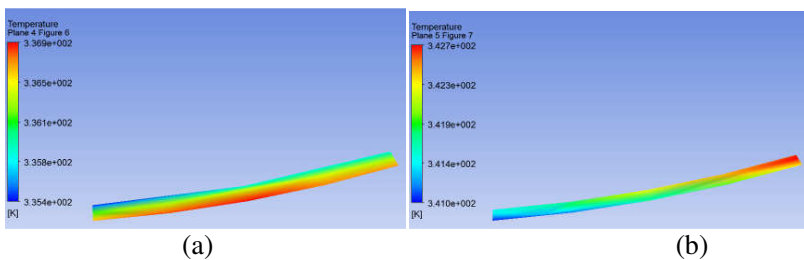
As figuras 8.34 a 8.37 mostram os valores de temperatura do óleo para a seção final dos segmentos considerados.

Figura 8.34 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 1; (b) final do segmento 2



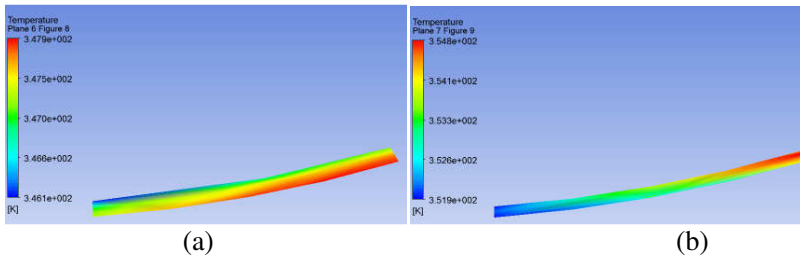
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.35 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 3; (b) final do segmento 4



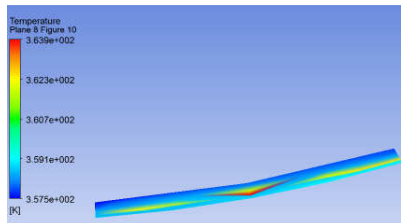
Fonte: do autor (2015)

Figura 8.36 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração; (a) final do segmento 5; (b) final do segmento 6



(a) Fonte: do autor (2015)

Figura 8.37 - Temperatura do óleo no canal de refrigeração no final do segmento 7



(b) Fonte: do autor (2015)

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação considerando a condição de carregamento em 130% estão descritos na tabela 8.6.

Tabela 8.6 – Dados obtidos para o enrolamento de BT, considerando a condição de carregamento de 130%

Temperatura média no segmento (°C)	Vazão Total (kg/s)	Área da Seção Transversal do segmento (m ²)
45,00	-	-
51,35	0,0195	0,00088
57,06	0,02036	0,00092
61,98	0,0198	0,00088
67,67	0,0204	0,00092
72,85	0,0196	0,00088
78,80	0,0197	0,00092
84,20	0,0205	0,00088
90,20	0,0188	0,01088

8.3.7 Áreas de contato entre óleo e enrolamentos no duto de refrigeração

Com base na geometria do transformador é necessário dividir cada enrolamento em seções distintas para que se obtenham os valores do coeficiente para cada seção, além disso é necessário se obter as áreas de contato molhadas, ou seja, as áreas de contato entre o óleo que circula pelos dutos e os enrolamentos. Os valores dessas áreas de contato estão mostradas nas tabelas 8.7 e 8.8.

Tabela 8.7 - Enrolamento de Alta Tensão

Número do Segmento	Área de contato entre enrolamentos e óleo nos dutos (m ²), por segmento
1	0,3826
2	0,3826
3	0,3826
4	0,3826
5	0,3826
6	0,3826
7	0,3826
8	0,3826

Tabela 8.8 - Enrolamento de Baixa Tensão

Número do segmento	Área de contato entre enrolamentos e óleo nos dutos (m ²), por segmento
1	0,2424
2	0,1983
3	0,1983
4	0,1983
5	0,1983
6	0,1983
7	0,1983
8	0, 2424

Para o caso avaliado optou-se por dividir longitudinalmente os canais de óleo dos dois enrolamentos em oito partes, coincidentes com

as chicanas que servem para realizar o direcionamento do óleo dentro do enrolamento. Essa consideração não é uma regra e deve ser avaliada para cada equipamento analisado.

8.4 Coeficiente de elevação de temperatura (K)

O coeficiente de elevação de temperatura (K), descrito no Capítulo 7, permite avaliar a intensidade de troca térmica entre o fluido e os enrolamentos para todas as seções dos enrolamentos. O valor desse coeficiente é diferente para cada ponto dentro do enrolamento, então, para aplicação do método proposto, calcula-se seu valor por segmento escolhido e tem-se um coeficiente (K) associado. O cálculo desse coeficiente é realizado a partir da simulação termodinâmica de fluxo e aquecimento que ocorre no interior do enrolamento. Devem ser realizadas simulações com o intuito de se obter os valores para as diferentes condições de carregamento, pois a eficiência de troca térmica depende dos valores de temperatura associados. As tabelas 8.9 e 8.10 apresentam os valores dos coeficientes para as simulações realizadas para os enrolamentos de AT e BT.

Tabela 8.9 - Coeficiente (K) para Enrolamento de Alta Tensão

Coeficiente de elevação de temperatura K ($^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$)			
Número do segmento	Carregamento 100%	Carregamento 105%	Carregamento 130%
1	11,37	12,13	15,03
2	12,34	13,02	16,99
3	12,10	13,02	16,44
4	11,74	12,86	15,89
5	12,34	13,28	16,39
6	12,34	13,33	16,41
7	11,45	12,02	15,42
8	11,84	12,05	15,11

Tabela 8.10 - Coeficiente (K) para Enrolamento de Baixa Tensão

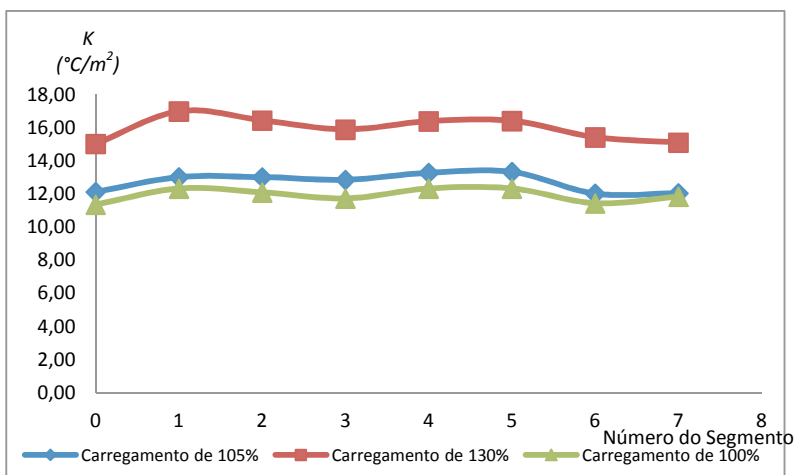
Coeficiente de elevação de temperatura K ($^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$)			
Número do segmento	Carregamento 100%	Carregamento 115%	Carregamento 130%
1	20,54	22,63	26,20

2	20,22	25,84	29,83
3	16,14	21,50	25,28
4	19,92	24,63	28,64
5	17,15	21,99	25,32
6	20,12	25,10	29,05
7	17,35	21,99	26,20
8	17,66	22,64	24,39

Os gráficos da figura 8.38 e 8.39 mostram o comportamento do coeficiente K dos enrolamentos de AT e BT para as simulações.

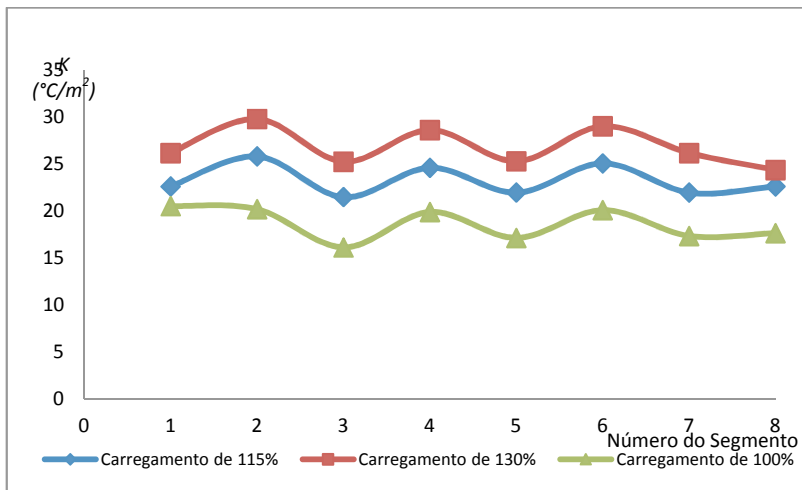
Pode-se notar a correlação entre os parâmetros obtidos para os casos simulados.

Figura 8.38 - Valor do Coeficiente K por segmento, para as simulações do enrolamento de AT



Fonte: do autor (2015)

Figura 8.39 - Valor do Coeficiente K por segmento, para as simulações do enrolamento de BT



Fonte: do autor (2015)

8.5 Localização do ponto de maior aquecimento e gradientes de temperatura para cálculo do ponto de maior aquecimento

A análise das simulações numéricas permite identificar o posicionamento dos enrolamentos que possuem o maior valor de temperatura e possibilita também realizar o cálculo do gradiente de elevação para cada situação de carregamento. A tabela 8.11 mostra os valores obtidos para o enrolamento de AT e a tabela 8.12 mostra os valores obtidos para o enrolamento de BT.

Tabela 8.11 - Enrolamento de AT

Carregamento	Segmento de localização do ponto de maior aquecimento	Gradiente entre a temperatura do enrolamento e o óleo na saída do duto (°C)
100%	Segmento 8	11,47
105%	Segmento 8	11,39
130%	Segmento 8	14,15

Tabela 8.12 - Enrolamento de BT

Carregamento	Segmento de localização do ponto de maior aquecimento	Gradiente entre a temperatura do enrolamento e o óleo na saída do duto (°C)
100%	Segmento 8	12,02
115%	Segmento 8	14,27
130%	Segmento 8	16,76

8.6 Comparação dos valores simulados com os valores obtidos para o ensaio de elevação de temperatura

Utilizando as grandezas obtidas na simulação numérica, pode-se avaliar os resultados e compará-los com os obtidos pela medição mostrada no capítulo 3. As tabelas 8.13 e 8.14 mostram alguns dos valores obtidos para a simulação, comparados com grandezas medidas no ensaio de elevação de temperatura descrito no Capítulo 3.

Tabela 8.13 – Comparação entre os valores medidos e obtidos por simulação numérica – temperatura de enrolamento

Carregamento	Segmento de localização do ponto de maior aquecimento/local de medição	Temperatura de ensaio (°C)	Temperatura a simulação numérica (°C)	Diferença (%)
AT – 100%	Segmento 8	87,3	89,00	1,94%
AT – 130%	Segmento 8	106,3	107,4	1,04%
BT – 100%	Segmento 8	83,30	81,00	-2,76%
BT - 130%	Segmento 8	103,00	106,96	3,84%

Tabela 8.14 – Comparação entre os valores medidos e obtidos por simulação numérica – temperatura do óleo

Caso	Segmento de localização do ponto de maior aquecimento/local de medição	Temperatura de ensaio (°C)	Temperatura simulação numérica (°C)	Diferença (%)
AT – 100%	Saída do segmento 8	62,70	77,73	23,97%

AT – 130%	Saída do segmento 8	74,00	93,25	26,01%
BT – 100%	Saída do segmento 8	63,30	68,98	8,97%
BT – 130%	Saída do segmento 8	73,60	90,20	22,55%

Observando-se os dados apresentados nas tabelas observa-se que os valores de temperatura do enrolamento obtidos na simulação estão condizentes com os obtidos no ensaio de elevação de temperatura.

Os valores de temperatura obtidos para o óleo nos canais de refrigeração possuem diferenças medidas. Esta condição pode ser atribuída a localização do ponto de medição do óleo no ensaio, que estava localizado fora do canal de saída de óleo do enrolamento, sofrendo a influência da convecção entre o fluido na parte superior do transformador e o óleo quente que sai do enrolamento. Devido a alta complexidade física do problema, diferenças na representação da geometria e dificuldades para a realização das simulações numéricas, pode-se considerar que tais erros são aceitáveis, não impactando no resultado esperado para a solução do problema.

8.7 Conclusões

A comparação entre os valores obtidos para a simulação e os dados de ensaio tornam-se úteis no processo de validação do modelo citado.

A temperatura do enrolamento calculada através da modelagem proposta leva em consideração a redução da eficiência de troca de calor quando o óleo percorre todo o enrolamento. A consideração de que a temperatura do óleo nos dutos aumenta de região para região influencia no cálculo da troca de calor para cada região.

A utilização da simulação numérica fornece os valores que devem ser utilizados para a simulação analítica e servirão para a estimativa de temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Como dado de entrada, utiliza-se o valor da temperatura do óleo no fundo do tanque, que na prática, é obtido facilmente por meio de medição direta.

Assim a modelagem e simulação numérica fornece a distribuição mais realista da estimação da temperatura do enrolamento. Caso se queira ter um retrato mais detalhado do comportamento do óleo no interior do enrolamento basta dividir o enrolamento em mais segmentos e efetuar a análise para essa consideração.

Os parâmetros K foram determinados para as simulações realizadas, mostrados nas tabelas 8.9 e 8.10, serão necessários para aplicação do método proposto de cálculo mostrado no item 7.4.

No Capítulo 9 estão mostrados os valores de temperatura do ponto mais quente, estimados para condições de carregamento diferentes das obtidas na simulação numérica do Capítulo 8, visando à aplicação para a medição em tempo real.

9 APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA ESTIMATIVA DE CÁLCULO DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO

9.1 Introdução

A aplicação do método proposto para cálculo do ponto mais quente do enrolamento é realizado com a utilização dos parâmetros tabelados obtidos nas simulações numéricas.

A estimativa das temperaturas é importante na operação de equipamentos devido à necessidade de se antever quais as condições de temperatura serão atendidas para o transformador. Para auxílio a operação em tempo real deve-se possuir sistemas que forneçam opção de cálculo rápido e preciso para auxiliar o carregamento do transformador e garantir a segurança na operação.

Nesse sentido, desenvolveu-se o sistema para cálculo de aquecimento do enrolamento do transformador com base na utilização de medições em tempo real. Os dados de entrada do sistema correspondem a medições existentes no transformador.

A elevação de temperatura do óleo em regime permanente, para uma dada condição de carga, pode ser obtida pela equação 7.6, transcrita abaixo:

$$T_f = T_i + AK$$

Para o primeiro segmento, o valor de T_i é obtido por meio da medição em tempo real do óleo na parte inferior do transformador. Essa medição dispensa a obtenção dos parâmetros dos radiadores e trocadores de calor do equipamento e é um dado que pode ser obtido por meio de sensor instalado no tanque do transformador.

Após o cálculo de aquecimento da primeira seção do enrolamento, utiliza-se o valor calculado de T_f do segmento anterior como entrada do segmento seguinte, até que a temperatura de todos os segmentos seja calculada.

Para o cálculo de aquecimento foram obtidos os valores de elevação de temperatura tanto para o enrolamento de alta tensão quanto para o enrolamento de baixa tensão. Foram calculados os valores de elevação de temperatura de todos os segmentos e mostrados no item 9.1 a seguir.

9.2 Estimativa dos valores de temperatura para valores de carregamento diferentes dos obtidos na simulação numérica

Para o cálculo da estimativa de temperatura para outros valores de carregamento, com exceção dos obtidos na simulação numérica mostrada no Capítulo 8 e para os quais se levantou os parâmetros do modelo, deve-se seguir os seguintes passos:

- **Passo 1** - Valores de carregamento do transformador

Foram estipulados três valores para os quais serão realizados os cálculos: carregamentos de 103%, 107% e 111%.

- **Passo 2** – Associação dos valores de carregamento com o coeficiente global

As tabelas 9.1 e 9.2 mostram os valores estimados por meio de interpolação linear, utilizando os parâmetros obtidos na simulação numérica mostrada no Capítulo 8.

Tabela 9.1 - Coeficiente (K) para Enrolamento de Alta Tensão

Coeficiente de elevação de temperatura K ($^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$)			
Número do segmento	Carregamento 115%	Carregamento 117%	Carregamento 123%
1	13,20	13,58	14,11
2	14,66	15,00	15,83
3	14,27	14,73	15,36
4	13,81	14,38	14,85
5	14,36	14,83	15,38
6	14,38	14,87	15,39
7	13,43	13,72	14,43
8	13,47	13,58	14,29

Tabela 9.2 - Coeficiente (K) para Enrolamento de Baixa Tensão

Coeficiente de elevação de temperatura K ($^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$)			
Número	Carregamento	Carregamento	Carregamento

do segmento	103%	107%	111%
1	21,07	21,59	22,11
2	21,63	23,03	24,43
3	17,48	18,82	20,16
4	21,10	22,28	23,45
5	18,36	19,57	20,78
6	21,37	22,61	23,86
7	18,51	19,67	20,83
8	18,90	20,15	21,39

- **Passo 3** – Utilizar o valor de temperatura de fundo do tanque

Para esse caso utilizou-se o valor de 38°C para a temperatura do óleo no fundo do tanque.

- **Passo 4** - Cálculo da temperatura do óleo para cada segmento

Utilizando o valor de temperatura do óleo no fundo do tanque como a temperatura de entrada do óleo nos enrolamentos, obteve-se os valores de temperatura mostradas na tabela 9.2 e 9.3 para os enrolamentos de AT e BT, respectivamente. Os dados de temperatura do segmento seguinte são obtidos com a aplicação da equação 7.9.

Tabela 9.2 – Temperaturas obtidas para as simulações para o enrolamento de AT

Segmento	Temperatura a Carga 115% (°C)	Temperatura a Carga 117% (°C)	Temperatura a Carga 123% (°C)
Entrada de óleo	38,00	38,00	38,00
Segmento 1	43,05	43,20	43,40
Segmento 2	48,66	48,94	49,46
Segmento 3	54,12	54,57	55,33
Segmento 4	59,41	60,07	61,01
Segmento 5	64,90	65,75	66,90
Segmento 6	70,40	71,44	72,79
Segmento 7	75,54	76,69	78,31
Segmento 8	80,70	81,88	83,77

Tabela 9.3 – Temperaturas obtidas para os canais de óleo do enrolamento de BT

Segmento	Temperatura a Carga 103% (C)	Temperatura a Carga 107% (C)	Temperatura a Carga 111% (C)
Entrada de óleo	38,00	38,00	38,00
Segmento 1	43,11	43,23	43,36
Segmento 2	47,39	47,80	48,20
Segmento 3	50,86	51,53	52,20
Segmento 4	55,04	55,95	56,85
Segmento 5	58,68	59,83	60,97
Segmento 6	62,92	64,31	65,70
Segmento 7	66,59	68,21	69,83
Segmento 8	71,17	73,10	75,02

- ***Passo 5 – Cálculo da temperatura de Hotspot***

Para cálculo da temperatura de hotspot para os casos de calculados no passo 4 acima, aplicam-se os valores mostrados na tabela 9.4 e 9.5, que são os gradientes para cada caso, obtidos por interpolação linear dos dados das tabelas 8.11 e 8.12 respectivamente.

Tabela 9.4 – Gradientes de temperatura e hotspot calculados analiticamente para o enrolamento de BT

Caso	Segmento de localização do ponto de maior aquecimento	Gradiente entre a temperatura do enrolamento e o óleo na saída do duto (°C)	HotSpot (°C)
115%	Segmento 8	12,58	93,51
117%	Segmento 8	13,15	94,65
123%	Segmento 8	13,71	97,25

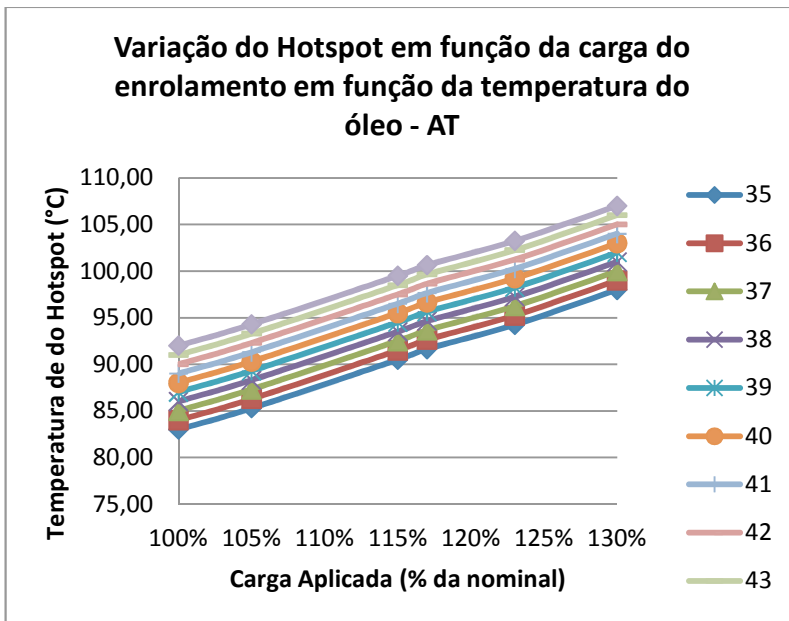
Tabela 9.5 – Gradientes de temperatura e hotspot calculados analiticamente para o enrolamento de BT

Caso	Segmento de localização do ponto de maior aquecimento	Gradiente entre a temperatura do enrolamento e o óleo na saída do	HotSpot (°C)
------	---	---	--------------

		duto (°C)	
103%	Segmento 8	12,58	83,76
107%	Segmento 8	13,15	86,24
111%	Segmento 8	13,71	88,73

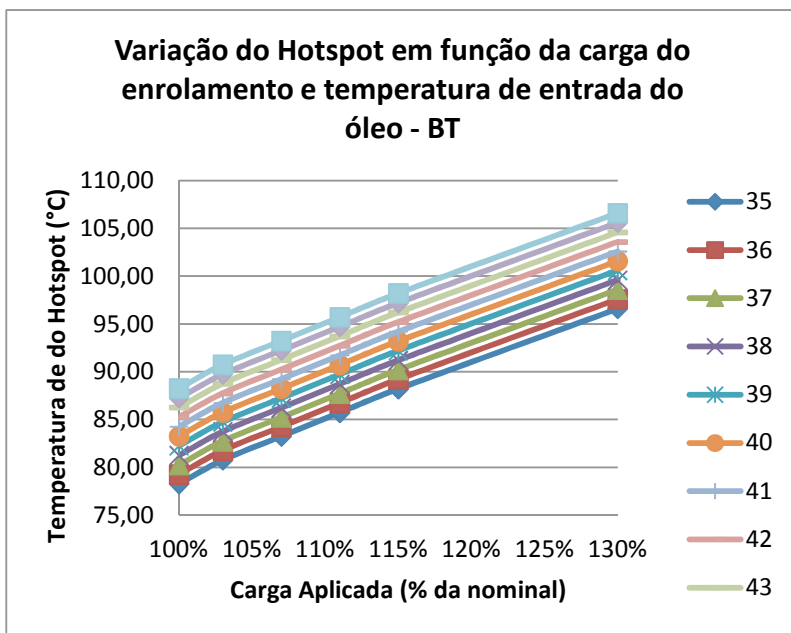
Variando-se os valores de temperatura do óleo na entrada inferior do enrolamento, tem-se a variação dos valores de temperatura de hotspot. As figuras 9.1 e 9.2 mostra o comportamento dessas temperaturas para diversas condições de carregamento do transformador, extrapolando os valores obtidos nas simulações numéricas para os casos de 100% e 130% de carregamento e variando-se os valores das temperaturas de entrada do duto de óleo.

Figura 9.1 - Valores de hotspot do enrolamento de AT para variação de temperatura de óleo no fundo do tanque em diferentes condições de carregamento



Fonte: do autor (2015)

Figura 9.2 - Valores de hotspot do enrolamento de BT para variação de temperatura de óleo no fundo do tanque em diferentes condições de carregamento



Fonte: do autor (2015)

9.3 Comentários sobre os resultados obtidos para o método proposto de cálculo em tempo real

Os resultados obtidos para os valores de temperatura por meio do cálculo analítico mostrados nas tabelas 9.1 a 9.6 estão de acordo com os resultados esperados de aquecimento para os enrolamentos e óleo do transformador. As figuras 9.1 e 9.2 mostram que o comportamento dos pontos estimados estão de acordo com os pontos simulados.

Analisando-se o valor de ensaio na condição de 130% de carregamento, mostrado na tabela 3.2 percebe-se que, após o horário das 14h30, o valor da elevação de temperatura permanece o mesmo, em torno de 60,3°C e o aumento da temperatura de ponto mais quente é influenciado somente pela elevação da temperatura de fundo do tanque. A tabela 9.6 mostra esse comportamento.

Tabela 9.6 – Comportamento do ponto mais quente no ensaio de aquecimento

Horário	Temperatura de fundo do taque (°C)	Ponto mais quente (°C)	Elevação de temperatura (°C)
14:30	40,5	100,8	60,3
14:45	42,1	102,5	60,4
15:00	43,8	104,1	60,3
15:15	45,0	105,2	60,2
15:30	45,8	106,3	60,5

Esse comportamento é o mesmo mostrado na figura 9.1 para os dados simulados, configurando que existe correlação entre os comportamentos de elevação de temperatura para a simulação e os dados medidos no ensaio.

9.4 Conclusões

Os valores de temperatura do ponto mais quente do enrolamento foram obtidos por meio de aplicação de interpolação linear aos resultados da simulação numérica do Capítulo 8. Observa-se que os gradientes de temperatura entre o enrolamento e o óleo, obtidos nas diferentes condições de carga, são diferentes e são levados em consideração no cálculo.

A aplicação da rotina de cálculo para a estimativa de aquecimento do ponto mais quente do transformador, proposta no Capítulo 7, obteve resultados satisfatórios quando comparadas as medições realizadas no transformador. A aplicação do método para os sistemas em tempo real torna-se viável devido a sua facilidade de implantação, rapidez para a estimativa de cálculo e boa precisão dos resultados.

10 CONCLUSÕES

O problema de estimação de temperaturas tem influência direta nos limites operativos dos transformadores de potência. Isto ocorre pois a limitação de carregamento deste equipamento é definida pela máxima temperatura que pode ser atingida no interior do enrolamento (ponto mais quente), que é também responsável pelo seu envelhecimento. Com isto, a estimação deste valor de temperatura é de grande importância na operação de subestações e sistemas de transmissão de energia.

Apesar da abordagem utilizada pela recomendação técnica IEEE C57.91 (1995) ser bastante utilizada, os resultados obtidos para a estimação de temperaturas podem não retratar de maneira satisfatória a condição e os valores de temperatura no interior do transformador. Alguns fatores utilizados na modelagem do transformador pela recomendação citada limitam a obtenção de uma boa estimativa das temperaturas. São eles:

- A desconsideração da dinâmica do óleo nos dutos de refrigeração: influencia no cálculo da temperatura do ponto quente e posteriormente na estimação de vida remanescente do transformador;
- Utilização de grandezas empíricas na modelagem: a utilização destas grandezas de forma incorreta pode levar a erros na estimação das temperaturas no interior do transformador, além de mascarar os valores reais de temperatura que estão sendo alcançados no interior do transformador.

Devido a estes aspectos, propôs-se neste trabalho um modelo de aquecimento que retrata de uma forma mais realista as estimativas de temperatura do transformador. Para diminuir a influência de fatores empíricos no cálculo, utilizam-se simulações numéricas de transferência de calor e fluidodinâmica para se obter os valores dos parâmetros do modelo termodinâmico, conforme descrito no capítulo 7.

No capítulo 8, estão mostrados os valores de temperatura obtidos na simulação numérica, limitando-se na análise do fluxo de óleo em um canal do enrolamento. Isso foi necessário devido a diversos problemas para a obtenção da simulação da geometria total do transformador, dentre eles o tamanho da malha que superou a capacidade de processamento computacional, problemas de divergência entre resultados obtidos e os reais, dentre outros. Assim, a opção da utilização do modelo reduzido fez-se necessária e mostrou-se representativa das condições de aquecimento do duto de óleo existente no enrolamento,

levando à obtenção de resultados similares aos de ensaio de elevação de temperatura, conforme mostrado no item 8.4.

Os resultados de elevação de temperatura, utilizando-se o método de cálculo proposto na tese, estão apresentados no capítulo 9. Os valores de temperatura do ponto mais quente do enrolamento foram obtidos por meio de aplicação de interpolação linear aos valores obtidos na simulação numérica do capítulo 8. Observa-se que os gradientes de temperatura entre o enrolamento e o óleo, obtidos nas diferentes condições de carga, são diferentes e são levados em consideração. Nesse método não se considerou a constante de tempo de aquecimento do enrolamento, uma vez que essa constante é da ordem de 5 minutos e não possui influência no cálculo de estimativa de vida útil do transformador.

As figuras 9.1 e 9.2 mostram os valores de temperatura obtidos com o método proposto e os valores obtidos na simulação numérica. Nota-se que os valores são correlacionados e possuem comportamento semelhante.

Como objetivos desse trabalho, pode-se destacar os seguintes:

Realizou-se uma revisão abrangendo os principais artigos e bibliografias relacionadas ao tema, afim de contextualizar o problema tratado nesta tese, conforme mostrado no capítulo 1.

Reuniu-se no documento diversos dados relativos às características de materiais utilizados na fabricação de transformador de potência, de modo a possibilitar que fossem realizadas as simulações mostradas. Avaliou-se algumas condições de simplificação que tiveram que ser consideradas nas abordagens de análise; esses dados estão agrupados nos capítulos 4 e 5.

Simulou-se numericamente para as condições de carregamento mostrados, o modelo de transformador de potência que possui escoamento natural e obteve-se os perfis de temperatura para o modelo específico analisado. Comparou-se os valores obtidos na simulação com os obtidos no ensaio de elevação de temperatura realizado em conjunto com o fabricante do equipamento, obtendo-se valores similares e condizentes com os esperados, conforme mostrado nos capítulos 5 e 8.

Realizou-se um ensaio de aquecimento com medição direta dos valores de temperatura através de fibras óticas nos pontos de interesse, conforme mostrado no capítulo 3.

Como principal contribuição, elaborou-se uma metodologia para cálculo analítico para monitoramento em tempo real das temperaturas no interior do enrolamento do transformador. Utilizou-se parâmetros extraídos das simulações numéricas, gerando resultados coerentes e mais precisos que os propostos pelas recomendações e normas aplicadas

a transformadores de potência. O método é facilmente aplicado a diferentes tipos de equipamentos e diferentes configurações de circuitos térmicos. Para isso, basta realizar-se a análise de sua geometria, as condições de carregamento e aplicar as condições de contorno corretamente, conforme mostrado no capítulos 7 e 9.

Esse monitoramento possibilita ao operador ter um acompanhamento da elevação de temperatura do equipamento, controlando o acréscimo ou o corte de carga do mesmo, de modo a preservar a integridade do transformador e da subestação na qual está instalado.

Outras vantagens são esperadas na aplicação da metodologia de cálculo proposta, no que se refere ao detalhamento das grandezas de temperatura no interior do enrolamento, tanto no cobre quanto no óleo. Isto possibilita que, caso seja encontrado algum problema, o mesmo possa ser corrigido ainda em fase de projeto. Essa análise ainda permite que se posicione corretamente o sensor de medição por fibra ótica, detectando a real posição do ponto de maior aquecimento.

Para continuação do trabalho podem ser consideradas algumas condições que podem trazer avanços ao método proposto para estimação de temperatura dos enrolamentos:

- Realizar um estudo para as diferentes configurações de enrolamentos, comparando-as com valores efetivamente medidos em ensaios de elevação de temperatura;
- Realizar o monitoramento de mais pontos de temperatura no interior do transformador, de modo a obter o perfil detalhado de temperatura nos enrolamentos, no óleo nos dutos de refrigeração e outros pontos no interior do transformador;
- Analisar a sensibilidade da simulação com a variação dos parâmetros do modelo;
- Verificar a inclusão de grandezas como a incidência de radiação solar e velocidade dos ventos sobre a troca de calor com o ambiente.

Adicionalmente, a divisão do enrolamento do transformador em regiões distintas para o cálculo das temperaturas melhora a estimativa de vida remanescente do isolamento do transformador, já que o cálculo de envelhecimento é feito para cada região individualizada.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Aplicação de Cargas em Transformador de potência -
Procedimento, NBR 5416, Rio de Janeiro, 1997.
- AGUIAR, E. R. de; Análise de resposta em frequência aplicada
em transformadores de potência. Dissertação de
Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Belo Horizonte, 2007.
- ANSYS R12; Material de referência. ANSYS INC., 2008.
- BASTOS, J. P. A.; Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e
Quase-estática. Editora da UFSC, 396 p.,
Florianópolis, Brasil, 2004.
- BASTOS, J.P.A.; SADOWSKI, N.; "Eletromagnetic Design by
Finite Elements Methods", Marcel Dekker, 2003,
New York, USA (483 pp), (isbn 0-8247-4269-9).
- BASTOS, J.P.A.; SADOWSKI, N.; "Magnetic Materials and 3D
Finite Element Modeling", CRC Press, 2014, Boca
Raton, USA (396 pp), (isbn 9781466592513).
- BATISTELA, N. J.; Caracterização e Modelagem
Eletromagnética de Lâminas de Aço Silício. Tese de
Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, novembro de 2001.
- BOSSAVIT, A.; Electromagnetisme, en vue de la modelisation.
Springer – Verlag. 124 p., 1993, Paris, France.
- CABREIRA, M. F. R. R. - "Thermo-magnetic analysis of low-
power induction motors using techniques of finite
elements 2D"; (Análise termo-magnética de motores
de indução de pequeno porte utilizando técnicas de
elementos finitos 2D), July 1996.
- CIGRE, WG A2.24, Thermal Performance of Transformers,
CIGRE, ISBN: 978-2-85873-080-3, Outubro de
2009.
- DA SILVA, J. R.; BASTOS, J. P. A.; Analysis of power
transformer geometry simplifications on
electromagnetic and thermodynamic simulations.
IEEE Transactions on Magnetic, v. 51, p 1-4, 2015.

- DECLERCQ, J.; VAN DER VEKEN, W; Accurate Hot Spot Modeling in a Power Transformer Leading to Improved Design and Performance. Transmission and Distribution Conference, 1999. IEEE. Volume 2, 11-16 de abril de 1999 P. 920 - 924.
- EL WAKIL, N.; CHERECHES, N.-C.; PADET, J.; Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer. *ELSEVIER – International Journal of thermal Sciences*, V. 45, 2006, p. 615 – 626.
- ELMOUDI, A. A.; Evaluation of power system harmonic effects on transformers. Tese de Doutorado; Helsinki University of Technology, 2006 (ISBN 9512280787).
- GRUBB, R.L.; HUDIS, M.; and TRAUT, A. R.; A Transformer Thermal Duct Study of Various Insulating Fluids , Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on ,Vol. PAS-100 , No. 2 , February 1981, pp. 466 – 473.
- HENROTTE, F., HAMEYER, K.; Simulation of a three-phase transformer using an improved anisotropy model. *IEEE Transactions on magnetics*, V. 40, No. 2, Março de 2004, p. 850 – 855.
- IDA, N.; BASTOS, J. P. A.; Electromagnetics and Calculation of Fields. Springer – Verlag New York, Inc. 565 p., 1997, New York, USA.
- IEEE Std. C57.91 - 1995, Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE, New York, 1995.
- INCROPERA, F. P., DeWITT D. P.; Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LTC Editora, 5^a ed. 2003.
- LOPEZ-FERNANDEZ, X. M. (Org.); ERTAN, B. (Org.); TUROWSKI, J. (Org.); Transformers: Analysis, Design, and Measurement, CRC Press, 2013, Boca Raton, USA (623 pp), (isbn 9781466508248).
- KIM, J.; KIM, W.; KIM, S. CHOI, K.; HAN, J.; HONG, G.; HAHN, s.; Analysis of AC losses in HTS pancake windings for transformer according to the operating temperature. *IEEE Transactions on magnetics*, V. 41, No. 5, Maio de 2005, p. 1888 – 1891.
- KIM, J.K.; LEE, J. G.; HAHN, S.C.; PARK, H.K.; Kim, H.K.; OH, Y.H.; Temperature Distribution of Power

- Transformer by Coupled Magneto-Fluid-Thermal Analysis, CEM 2006.
- MESQUITA, R. C.; "Calculation of tridimensional electromagnetic fields using the finite elements method; magnetostatics, quasi-statics and induced heating", (Cálculo de campos eletromagnéticos tridimensionais utilizando o método de elementos finitos; magnetostática, quase-estática e aquecimento indutivo), December 1990
- MUFUTA, J.; VAN DEN BULCK, E.; Modelling of the mixed convection in the windings of a disc-type power transformer. *Pergamon - Applied Thermal Engineering*, V. 20, 2000, p. 417 – 437.
- MUFUTA, J.; VAN DEN BULCK, E.; Modeling of the mass flow distribution around an array of rectangular blocks in-line arranged and simulating the cross-section of a winding type-disc transformer. *Pergamon - Applied Thermal Engineering*, V. 21, 2001, p. 731 – 749.
- OTA, T.; HIRATA, K.; YAMAGUCHI, T.; KAWASE, Y.; SHAMOTO, K.; Transient Analysis of Thermostatic Switch Using 3-D Finite –Element Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol 41, No 5, May 2005.
- PRADHAN, M. K.; Assessment of the status os insulation during thermal stress accelerated experiments on transformer prototypes. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, V. 13, No. 1, Feveireior de 2006, p. 227 – 237.
- PREIS, K.; BÍRÓ, O.; BUCHGRABER, G.; TICAR, I.; Thermal-Eletromagnetic coupling in the finite-element simulation of power transformers. *IEEE Transactions on magnetics*, V. 42, No. 4, Abril de 2006, p. 999 – 1002.
- RODGER, D., LAI, H. C. A comparison of formulations for 3D finite element modeling of electromagnetic launchers. *IEEE Transactions on magnetics*, V. 37, No. 1, Janeiro de 2001, p. 135 – 138.
- ROSAS, C.; MORAGA, N.; BUBNOVICH, V.; FISCHER, R.; Improvement of the cooling process of oil-immersed electrical transformers using heat pipes. *IEEE*

- Transactions on power delivery*, V. 20, No. 3, julho de 2005, p. 1955 – 1961.
- RYDER, S.; A simple method for calculating winding temperature gradient in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 17, No. 4, Outubro de 2002, p. 977 – 982.
- SADIKU, M. N. O.; MAKKI, A. Z.; AGBA, L. C.; A further Introduction to Finite Element Analysis of Electromagneti Problems, *IEEE Transactions on Education*, Vol 34, No 4, November 1991
- SANDHU, S., Fiber Optic temperature monitoring goes mainstream. *Electricity Today - The North American Forum on Electricity Issues*. Issue 3, Vol. 16,p.51-53, 2004.
- SILVA, J. R.; Modelagem para Monitoramento Térmico de Transformadores em Operação e Avaliação do Envelhecimento em Função do Perfil de Carregamento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, março de 2005.
- SILVA, J. R.; ROLIM, J. G.; Ferramenta inteligente para o monitoramento das condições de carregamento em transformadores de potência operando em sobrecarga. Anais: VI SIMPASE: Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, 31 de julho a 03 de agosto de 2005, CIGRE, São Paulo, SP.
- SUSA, D.; Dynamic thermal modeling of power transformers; Tese de Doutorado; Helsinki University of Technology, 2005.
- SUSA, D.; LEHTONEN, M.; NORDMAN, H.; Dynamic thermal modeling of distribution transformers. *IEEE Transactions on power delivery*, V. 20, No. 3, julho de 2005, p. 1919 – 1929.
- SUSA, D.; LEHTONEN, M.; NORDMAN, H.; Dynamic thermal modeling of power transformer. *IEEE Transactions on power delivery*, V. 20, No. 1, janeiro de 2005, p. 197 – 204.
- SUSA, D.; PALOLA, J.; LEHTONEN, M.; HYVARINEN, M.; Temperatura rises in an OFAF transformer at OFAN cooling mode in service. *IEEE Transactions on*

- power delivery*, V. 20, No. 4, Outubro de 2005, p. 2517 – 2525.
- SHELTAMI, K.; REFAI-AHMED, G.; SHWEHDI, M. H.; Thermal management of high power transformer in different outdoor environment conditions. *Anais: 2004 Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, p. 543 – 548.
- TANG, P. H.; Coupled Thermal and Flow Analysis for Oil-Immersed Transformers, ICEM 2004.
- WARD, B.; A survey of new techniques in insulation monitoring of power transformers. *IEEE Electrical insulation magazine*, V. 17, No. 3, maio e junho de 2001, p. 16 – 23.
- ZIELENKIEWICZ, W.; MARGAS, E.; Theory of Calorimetry, Kluwer Academic Publishers, New York, USA, 2002.