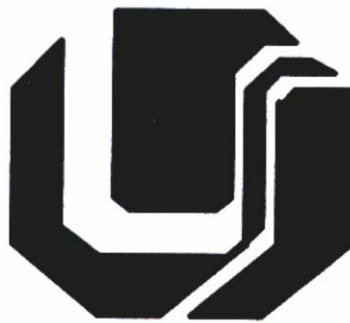


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ANÁLISES DO DESEMPENHO TÉRMICO E VIDA
ÚTIL DE TRANSFORMADORES ALIMENTANDO
CARGAS NÃO LINEARES

JELSON MACHADO DE CAMARGO

OUTUBRO

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISES DO DESEMPENHO TÉRMICO E VIDA
ÚTIL DE TRANSFORMADORES ALIMENTANDO
CARGAS NÃO LINEARES

Dissertação apresentada por Jelson Machado de Camargo à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Antônio Carlos Delaiba, Dr. (UFU) – Orientador

Olívio Carlos Nascimento Souto, Dr. – Co-Orientador (FEB)

Damásio Fernandes Junior, Dr. (UFCG)

Milton Itsuo Samesima, Dr. (UFU)

Uberlândia, 24 de Outubro de 2005.

ANÁLISES DO DESEMPENHO TÉRMICO E VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ALIMENTANDO CARGAS NÃO LINEARES

JELSON MACHADO DE CAMARGO

Dissertação apresentada por Jelson Machado de Camargo à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Antônio Carlos Delaiba, Dr.
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

A Deus, nosso criador, por conceder-me o dom da vida e a alegria de viver esse
momento.

A meu pai “Aparecido Martins de Camargo” meu primeiro e grande professor.

A minha querida mãe “Ameir Machado de Camargo” pelo carinho e exemplo a
ser seguido.

A minha querida esposa Marta Maria, e aos meus filhos Jeferson, Jonas e LÍlian,
pela paciência, estímulo e compreensão.

AGRADECIMENTO

Ao prof. Dr. Antônio Carlos Delaiba, pela sua excelente orientação, estímulo, compreensão e sugestões durante a elaboração deste trabalho, sem os quais este não teria condições de ser desenvolvido.

Ao prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto, pela sua excelente orientação, estímulo, compreensão e sugestões durante a elaboração deste trabalho, sem os quais este não teria condições de ser desenvolvido.

Aos professores Cláudio e Anderson, engenheiros Alexandre, Guilherme e Paulo pelo apoio na instalação dos programas e ajuda na execução dos ensaios.

A Fundação Educacional de Barretos, por ceder os equipamentos e as instalações para desenvolvimento dos trabalhos.

Aos engenheiros Mario Basílio e Wander da TRA Eletromecânica Ltda, pela doação e construção do protótipo do transformador utilizado nos experimentos.

Ao programa Bolsa Mestrado, da Secretaria da Educação do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro.

Aos secretários Zé Maria e Marli dos Cursos de Graduação e Pós-graduação da FEELT, pelos esclarecimentos, prestatividade e amizade.

RESUMO

CAMARGO, JELSON M.; Análises do Desempenho Térmico de Transformadores Alimentando Cargas Não Lineares, Uberlândia, UFU, 2005.

Esta dissertação apresenta e analisa os resultados de investigações teóricas e experimentais do comportamento térmico de transformadores a seco, isolados com resina epóxi, sob condições senoidais e não senoidais de tensão e/ou corrente. Desenvolveu-se um estudo das perdas nas diversas partes do transformador, destacando-se as perdas por correntes parasitas propostas pela norma ANSI/IEEE [3] e comparou-se com outra [5], mais exata, que leva em consideração a geometria do transformador. Dentro deste contexto, apresentam-se novos desenvolvimentos para as elevações de temperatura, rendimento, vida útil e “derating” do transformador. Um modelo térmico é utilizado para estimar as elevações de temperatura no transformador. Estudos experimentais são conduzidos em um protótipo de um transformador trifásico a seco, isolado com resina epóxi, delta/estrela, 5 kVA especialmente construído para a realização de testes de temperatura, com sensores térmicos instalados em vários pontos do equipamento. Este procedimento viabiliza a comparação entre os resultados computacionais, com vistas à validação da proposta da modelagem térmica de primeira ordem.

Palavras-chaves:

Transformadores a seco, modelagem elétrica e térmica, distorções harmônicas de tensão e corrente, qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

CAMARGO, JELSON M.; Analyses of the Thermal Acting of Transformers Supplying Loads Non Lineal, Uberlândia, UFU, 2005.

This dissertation presents and analyzes the results of theoretical investigations and experimental of the thermal behavior of transformers the dry, isolated with resin epoxy, under conditions sinusoidal and non sinusoidal of tension and current. Development a study of the losses in the several parts of the transformer, standing out the losses for currents parasites proposed by the norm ANSI/IEEE [3] and was compared with other [5], more exact, that takes in consideration the geometry of the transformer. Inside of this context present new equations for the temperature elevations, rendimento, useful life and derating of the transformer. A thermal model is used to estimate the temperature elevations in the transformer. Experimental studies are led in a prototype of a transformer trifásico the dry, isolated with resin epoxy, delta/estrela, 5 kVA especially built for the accomplishment of temperature tests, with sensor thermal located in several points of the equipment. This procedure makes possible the comparison among the results computations, with views to the validation of the proposal of the thermal modelling of first order.

Keywords:

Dry-type transformers, losses, electric and thermal modelling, harmonic distorções of tension and current, electric power quality.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	01
1.2 – O CONTEXTO DA DISSERTAÇÃO.....	04
1.3 - O ESTADO DA ARTE.....	04
1.4 – PROPOSTA DO TEMA.....	09
1.5 – PRINCIPAIS OBJETIVOS.....	10
1.6 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	13

CAPÍTULO II

GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS ISOLANTES

APLICADOS EM TRANSFORMADORES A SECO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
2.2 – MATERIAIS ISOLANTES.....	16
2.2.1 – Isolantes gasosos.....	17
2.2.2 – Isolantes líquidos.....	17

2.2.3 – Isolantes pastosos e ceras.....	17
2.2.4 – Isolantes fibrosos.....	19
2.2.5 – Produtos Cerâmicos	19
2.2.6 - Vidro.....	20
2.2.7 – Mica.....	20
2.2.8 – Amianto.....	20
2.2.9 – Borrachas.....	21
 2.3 – RESINA EPOXI COMO ISOLANTE.....	 21
2.4 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE SISTEMAS ISOLANTES.....	22
2.5 – TRANSFORMADOR TIPO SECO.....	27
2.5.1 - Transformador a seco moldado em resina isolante.....	28
2.5.2 - Principais características dos transformadores a seco com resina epoxi	32
 2.6 – METODOLOGIA DE CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES A SECO.....	 33
2.6.1 - Redução da Vida Útil em Função de um aumento Adicional de Temperatura.....	36
2.6.2 – Influência da Temperatura Ambiente na Vida Útil de Transformador Seco.....	39
2.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41

CAPÍTULO III

**COMPORTAMENTO TÉRMICO E VIDA ÚTIL DE
TRANSFORMADORES ALIMENTANDO CARGAS
NÃO LINEARES**

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	42
3.2 – FONTES DE AQUECIMENTO.....	43
3.2.1 - Efeitos da distorção harmônica nas perdas em transformadores.....	43
3.2.2 - Perdas no núcleo – P_o	45
3.2.2.1 - Perdas por histerese.....	45
3.2.2.2 - Perdas por corrente de Foucault.....	49
3.2.3 - Perdas em carga – P_c	52
3.2.3.1 - Perdas por efeito Joule nos enrolamentos.....	52
3.2.3.2 - Perdas por "stray load" ou perdas suplementares.....	54
3.2.3.3 – Cálculo das Perdas por Correntes parasitas de acordo com Norma ANSI/IEEE C57.110/D7.....	55
3.2.3.4 – Cálculo das Perdas por Correntes parasitas Corrigida.	60
3.3 – MODELO TÉRMICO.....	62
3.4 – MODELO TÉRMICO CLÁSSICO – ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR.....	65
3.5 – CÁLCULO DO EFEITO DE HARMÔNICOS NA VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR	69

3.5.1 – Estimativa de Vida Útil (EVu) em função de P_{EC} Sob Condições não Senoidais pela metodologia da Norma ANSI/IEEE.....	69
3.5.2 – Estimativa de Vida Útil (EVu) em função de P_{EC} Sob Condições não Senoidais pela metodologia de correção do P_{EC}	70
3.6 – ANÁLISE DE MÉTODOS DE REDUÇÃO DE CORRENTE DE CARGA DE TRANSFORMADORES SUPRINDO CARGAS NÃO LINEARES (“DERATING”).....	71
3.6.1 - Estimativa do Fator de Perdas Harmônicas - F_{HL}	72
3.6.2 - Estimativa do Método Fator de Perdas Harmônicas Corrigido $F_{HLcorrigido}$	74
3.7 – EFEITO DE HARMÔNICOS NO RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR.....	78
3.7.1 - Rendimento (η) em função de P_{ec} Norma Sob Condições não Senoidais.....	79
3.7.2 - Rendimento (η) em função de P_{ec} Corrigido Sob Condições não Senoidais.....	80
3.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	83
4.2 – INFORMAÇÕES CONTIDAS NO PROGRAMA.....	84
4.3 – ESTUDOS COMPUTACIONAIS.....	86
4.4 – CASOS ANALISADOS.....	87

4.4.1 - Caso 1 – Transformador Sob Condições de Suprimento e Carregamento Senoidal.....	87
4.4.2 - Caso 2 – Transformador Sob Condições de Suprimento Senoidal e Carregamento Não Senoidal.....	89
4.4.3 - Caso 3 – Transformador Sob Condições de Suprimento e Carregamento Não Senoidal.....	92
4.4.4 - Caso 4 – Transformador Sob Condições de Suprimento Senoidal e Carregamento Não Senoidal.....	94
4.4.5 - Caso 5 – Transformador Sob Condições de Suprimento Senoidal e Carregamento Não Senoidal.....	98
4.4.6 - Caso 6 – Transformador Sob Condições de Suprimento Senoidal e Carregamento Não Senoidal.....	103
4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109

CAPÍTULO V

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	111
5.2 - MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	112
5.2.1 - Equipamentos Utilizados.....	113
5.2.1.1 - Transformador de 5 k VA – 220/220 Volts.....	113
5.2.1.2 - Termoresistência tipo Pt 100.....	114
5.2.1.3 - Agilent 34970 A.....	114
5.2.1.4 - Osciloscópio.....	116
5.2.1.5 - Computador.....	116

5.2.1.6 - Medidor de grandezas elétricas RMS MARH– 21.....	117
5.3 - EXECUÇÃO DOS ENSAIOS – MONTAGENS EXPERIMENTAIS.....	118
5.4 - RESULTADOS COM CARGA LINEAR.....	119
5.5 - RESULTADOS COM CARGA NÃO LINEAR.....	124
5.6 - SÍNTESE DOS RESULTADOS MAIS SIGNIFICATIVOS ASSOCIADOS ÀS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.....	128
5.7 - COMPARAÇÃO TEÓRICO / EXPERIMENTAL.....	130
5.7.1 - Comparação Teórico/Experimental - carga linear.....	130
5.7.2 - Comparação Teórico/Experimental – carga não linear...	131
5.7.3 - Comparação Teórico/Experimental - carga linear e não linear.....	133
5.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

CONCLUSÕES GERAIS.....	136
------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
---------------------------------	-----

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	-	Classes de isolamento.....	23
Tabela 2.2	-	Limite da elevação de temperatura.....	27
Tabela 2.3	-	Redução de Vida Útil com Adicional de Temperatura.....	38
Tabela 2.4	-	Elevação da Vida Útil em Função da Redução da Temperatura Ambiente.....	40
Tabela 4.1	-	Parâmetros característicos do transformador a seco e dados básicos utilizado na simulação.....	86
Tabela 4.2	-	Características dos dados básicos dos casos (1, 2, 3, 4, 5, e 6) utilizados na simulação.....	87
Tabela 4.3	-	Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.....	89
Tabela 4.4	-	Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.....	93
Tabela 4.5	-	Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.....	95
Tabela 4.6	-	Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.....	106
Tabela 5.1	-	Elevação de temperatura máxima - aquisição experimental.....	123
Tabela 5.2	-	Elevação de temperatura máxima, aquisição experimental.....	128
Tabela 5.3	-	Elevação de temperatura do transformador.....	129

Tabela 5.4	- Comparação com carga Linear do ensaio Experimental x Simulação Comparação.....	131
Tabela 5.5	- Comparação com carga não linear do ensaio experimental x simulada.....	132
Tabela 5.6	- Comparação Experimental x Simulada (Linear x Não Linear).....	133

Lista de Figuras

Figura 2.1	- Elevações da temperatura máxima de acordo com a classe de isolamento.....	24
Figura 2.2	- Transformador trifásico do tipo de núcleo envolvente.....	30
Figura 2.3	- transformador trifásico do tipo de núcleo envolvido.....	30
Figura 2.4	- Transformador a seco trifásico moldado em resina, com núcleo envolvido.....	31
Figura 2.5	- Redução de vida útil com adicional de temperatura [%].....	39
Figura 2.6	- Elevação de Vida Útil com decréscimo de Temperatura Ambiente.....	40
Figura 3.1	- Formas de onda de tensão, campo magnético e indução magnética distorcidos os correspondentes ciclos de histerese.....	47
Figura 3.2	- Perdas por histerese no núcleo em função da distorção harmônica da tensão.....	49
Figura 3.3	- Perdas por correntes parasitas no núcleo em função da distorção de tensão.....	51
Figura 3.4	- Condutor retangular imerso em um campo magnético Perpendicular a Largura τ	56

Figura 3.5	- Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos $P_{ECnorma}$ e $P_{ECcorrigido}$ em função da distorção harmônica da corrente.....	62
Figura 3.6	- Circuito térmico de primeira ordem (clássico) do transformador.....	66
Figura 3.7	- Estimativa da Vida Útil – Comparação norma x corrigida	71
Figura 3.8	- Gráfico $nF(\xi_n)/F(\xi_N)$ em função da ordem harmônica n , com variações da largura dos condutores.....	76
Figura 3.9	- “Derating” – norma e corrigido em função do THDi.....	77
Figura 3.10	- Comparativo rendimento norma x corrigido.....	80
Figura 4.1	- Diagrama de blocos representativos do programa digital desenvolvido.....	85
Figura 4.2	- Elevação de temperatura com carga linear para o caso 1....	88
Figura 4.3	- Elevação de temperatura com distorção de corrente de 26% para o caso 2.....	90
Figura 4.4	- Elevação de temperatura, carga não linear, para o caso 3.....	93
Figura 4.5	- Elevação de temperatura, carga não linear com distorção de corrente de 26%.....	96
Figura 4.6	- Perdas Joule em função do THDi.....	99
Figura 4.7	- Perdas “Eddy Currents” em função do THDi.....	100
Figura 4.8	- Elevação de temperatura em função do THDi.....	100
Figura 4.9	- Estimativa da Vida Útil em função do THDi.....	101
Figura 4.10	- Análise do “Derating” em função do THDi – (pu).....	102
Figura 4.11	- Rendimento Norma x Proposta em função do THDi.....	102
Figura 4.12	- Elevação de temperatura Norma x Proposta, THDi = 26%	104

Figura 4.13	- Perdas por Correntes Parasitas no enrolamento em função do THDi.....	104
Figura 4.14	- Corrente máxima em função do THDi.....	104
Figura 4.15	- Estimativa da Vida Útil em função do THDi.....	105
Figura 4.16	- Rendimento em função do THDi.....	105
Figura 5.1	- Montagem experimental.....	113
Figura 5.2	- Detalhe do transformador trifásico a seco de 5 KVA.....	114
Figura 5.3	- “Agilent” unidade de aquisição de dados.....	115
Figura 5.4	- Equipamentos para aquisição de dados.....	115
Figura 5.5	- Equipamento MARH-21.....	117
Figura 5.6	- Montagem experimental – carga linear.....	119
Figura 5.7	- Montagem experimental – carga não linear.....	119
Figura 5.8	- Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase A.....	120
Figura 5.9	- Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase B.....	120
Figura 5.10	- Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase C.....	121
Figura 5.11	- Forma de onda e espectro harmônico da tensão no secundário do transformador – fase A.....	121
Figura 5.12	- Elevação da temperatura no núcleo, nos enrolamentos internos e externos.....	122
Figura 5.13	- Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase A.....	125

Figura 5.14	-	Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase B.....	125
Figura 5.15	-	Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase C.....	126
Figura 5.16	-	Forma de onda e espectro harmônico da tensão no secundário do transformador – fase A.....	126
Figura 5.17	-	Elevação da temperatura no núcleo e nos enrolamentos internos e externos.....	127
Figura 5.18	-	Elevação da temperatura do enrolamento secundário (interna).....	128
Figura 5.19	-	Elevação de temperatura carga linear no transformador.....	130
Figura 5.20	-	Comparação elevação de temperatura experimental e computacional, enrolamento interno com carga não linear.....	131
Figura 5.21	-	Comparação elevação de temperatura experimental e computacional, enrolamento interno do transformador suprimindo carga não linear.....	132

Simbologia e Abreviações

S_N	-	potência nominal do transformador [kVA];
f	-	freqüência nominal do sistema [Hz];
V_N	-	tensão nominal [V];
R	-	Resistência percentual [%];
Z	-	Impedância percentual [%];
R_m	-	resistência de magnetização do núcleo [Ω];
X_m	-	reatância de magnetização do núcleo [Ω];
θ_a	-	temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$];
P_{HN}	-	perdas por histerese nominal [W];
P_{FN}	-	perdas por correntes parasitas nominais [W];
P_{JN}	-	perdas Joules nominais [W];
P_{ECN}	-	perdas por correntes parasitas na freqüência nominal [W];
$P_{EC\text{corrigido}}$	-	perdas por correntes parasitas nos enrolamentos, corrigido [W];
$P_{EC\text{norma}}$	-	perdas por correntes parasitas nos enrolamentos, norma [W];
Δ	-	espessura da chapa do núcleo [m];
μ	-	permeabilidade magnética do núcleo [H/m];
γ	-	condutividade térmica do núcleo magnético [$\Omega\cdot\text{m}$];
s	-	expoente de Steinmetz;
T	-	tempo de funcionamento [horas];
THDv	-	distorção harmônica total de tensão [%];
THDi	-	distorção harmônica total de corrente [%];
P_{Hn}	-	perdas por histerese para condição não senoidal [W];
P_{Fn}	-	perdas por correntes parasitas no núcleo nas condições não senoidais [W];
P_{Jn}	-	perdas Joules para condições não senoidais [W];
P_{ECn}	-	perdas por correntes parasitas nos enrolamentos, com distorções harmônicas [W];
P_{JT}	-	perdas Joules totais ou em cargas [W];
R_{th}	-	resistência térmica do transformador [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];

C_{thT}	-	capacitância térmica total [Ws/ °C];
T_{th}	-	constante térmica;
$\Delta\Theta E$	-	elevação da temperatura do enrolamento [°C];
Θ_{mqN}	-	- temperatura do ponto mais quente [°C];
EV_u	-	Estimativa da vida útil do transformador em anos;
$F_{HL\text{corrigido}}$	-	fator de perdas harmônica corrigido;
$F_{HL\text{norma}}$	-	fator de perdas harmônica norma;
$I_{\text{máx}}$	-	corrente máxima [A];
K_H	-	constante que depende do material do núcleo;
n	-	ordem harmônica;
V_n	-	tensão eficaz para a ordem "n";
Φ_n	-	ângulo de fase da tensão harmônica de ordem "n";
I_n	-	corrente de carga para a harmônica de ordem "n";
I_N	-	corrente de carga nominal e senoidal;
E	-	energia de ativação da reação de envelhecimento [eV].
K_1	-	condutividade térmica do material, em Watts/(m.°C);
$\frac{dT}{dx}$	-	gradiente de temperatura na seção, na direção x;
H	-	campo magnético de valor eficaz, (A/m);
J_n	-	densidade corrente eficaz (A/m ²);
J_N	-	densidade corrente eficaz nominal (A/m ²);
P_T	-	perdas dissipadas totais [W];
$\Delta\theta_{ef}$	-	máxima variação de temperatura permitida pela classe de isolamento [°C];
K	-	constante de Boltzmann $0,8617 \times 10^{-4}$ [eV];

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo “Qualidade da Energia Elétrica” é definido como sendo qualquer desvio que possa ocorrer na amplitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, resultando na operação inadequada do equipamento do consumidor.

Normalmente, estes distúrbios, quando se manifestam, originam-se, e/ou se fazem presentes, em diferentes pontos da rede elétrica. A ocorrência destas anomalias pode ser de natureza local, ou seja, uma perturbação que ocorre dentro da instalação do consumidor, ou de natureza externa ou remota.

Reconhecendo-se, portanto a grande importância que o assunto “Qualidade de Energia Elétrica” assumiu no cenário elétrico atual, vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos vêm sendo conduzidos com o intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento dos sistemas elétricos. Este tema vem se destacando no cenário elétrico nacional, tanto pelas concessionárias, como também pelos consumidores industriais, comerciais e residenciais. Desta forma, existem algumas razões que contribuem para o crescimento desta área do conhecimento [1]:

- O crescimento contínuo de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência aumenta bastante os níveis de distorção harmônica de tensão e/ou corrente em função de suas não linearidades nos sistemas de potência;
- Os equipamentos que vêm sendo utilizados no sistema elétrico são mais sensíveis a variações da qualidade de energia do que era no passado. Distúrbios que acontecem no sistema há vários anos, e que antes não interferiam no funcionamento dos equipamentos, são responsáveis por problemas de operação que até então não existiam tendo em vista suas robustez;
- O aumento de capacitores em derivação em sistemas de potência destinados à correção do fator de potência altera a impedância do sistema, podendo causar ressonância que, por sua vez, podem causar tensões transitórias;

- Os custos operacionais relacionados com a manutenção ou substituição prematura de equipamentos danificados por problemas relacionados com a energia elétrica de má qualidade.

Neste sentido, vários estudos e pesquisas vêm sendo conduzidos dentro do tema “Qualidade da Energia Elétrica”, e identificam-se, resumidamente, seis tópicos como objetivos de atuação nesta área [2]:

- Modelagem e Análise: Harmônicos, modelagem de componentes e cargas, métodos estocásticos, “softwares”, análises no domínio do tempo e da frequência, etc;
- Instrumentação: Medições, análise das formas de onda de tensão e da corrente, fator de potência, etc;
- Fontes de Harmônicos: Conversores e compensadores estáticos, inversores do tipo PWM, etc;
- Soluções: Filtros ativos e passivos, compensadores adaptativos, reguladores de tensão com resposta rápida, etc;
- Conceitos Fundamentais: Padronizações, definições, etc;
- Efeitos: Operações inadequadas de equipamentos, aquecimento adicional em transformadores, cabos e motores, etc.

1.2 – O CONTEXTO DA DISSERTAÇÃO

Investigar o comportamento dos diversos equipamentos em uma rede elétrica quando esta se encontra com qualidade comprometida tem sido objeto, ao longo dos anos, de várias pesquisas e desenvolvimentos pela comunidade científica nacional e internacional.

Desta forma, a existência de equipamentos elétricos, a exemplo de transformadores, motores, cabos de energia, submetidos a condições não ideais de operação é um fato comum nos sistemas elétricos, quer a nível de geração, transmissão e distribuição. Dentro deste contexto, pode-se observar que a investigação do comportamento dos diversos equipamentos elétricos sob o enfoque de redes elétricas com qualidade comprometida, é uma tarefa extremamente importante, e que deve resultar em estratégias de forma que, mesmo submetidos a condições adversas, a sua operação e a vida útil destes dispositivos seja preservada.

Reconhecendo estes aspectos, a atualidade do assunto, e considerando que o transformador é um dos componentes vitais dos sistemas elétricos de potência, há um grande interesse em investigar o seu comportamento elétrico e térmico quando este equipamento está submetido a tensões e/ou correntes harmônicas.

1.3 - O ESTADO DA ARTE

Vários estudos já foram feitos para analisar as condições elétricas, térmicas e a vida útil de transformadores, motores, cabos em condições senoidais e não senoidais [1-31]. Dentre os principais documentos referentes ao assunto específico desta dissertação, destaca-se a norma ANSI/IEEE C57.110/D7,

originalmente datada de 1982. Posteriormente, nesta referência foram realizadas duas atualizações, respectivamente, em 1986 e 1998. A norma é designada por ANSI/IEEE C 57.110 “Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, when Supplying Non-Sinusoidal Load Currents”, IEEE, NY/febr. 1998 [3]. Esta referência destaca a importância da estimativa das perdas joule e adicionais (“eddy current loss”), quando os transformadores estão operando em condições não senoidais. Complementando os aspectos anteriores a norma citada acima mostra uma metodologia de cálculo (“derating”) para que a vida útil do equipamento seja preservada.

Sabe-se também que, padrões do IEEE exigem medidas de elevação de temperatura nos pontos mais quentes de protótipos de transformadores ou enrolamento como teste de planejamento, da qualidade e dos modelos matemáticos do fabricante. Isto é especialmente importante para transformadores tipo seco, ventilados e projetados para alimentação de cargas não senoidais [4].

De acordo com [5], a suposição de que as perdas adicionais (“eddy current loss”) nos transformadores em condições de operação com correntes distorcidas são proporcionais ao quadrado da frequência e da corrente, é razoável quando os condutores dos enrolamentos possui uma largura menor que 3 mm. Para condutores com dimensões maiores, esta suposição conduz a resultados conservadores. Este artigo calcula um fator de perda harmônico corrigido que conduz a uma estimativa mais precisa da capacidade do transformador para a sua operação com carregamento não senoidal. Adicionalmente, calcula-se o “derating” do transformador, a fim de que a sua vida útil seja preservada.

Na referência [6], uma relação entre potência aparente, “derating” e fator-K é determinada levando-se em consideração as perdas no núcleo e as perdas “stray loss”.

A metodologia utilizada neste trabalho leva em consideração os efeitos “skin” e proximidade dentro do enrolamento do transformador, e mostram a dependência do “derating” de transformadores.

Na referência [7], medidas de “derating” de transformadores são comparadas com fator de perdas harmônicas aproximado.

Na referência [8], o problema da transferência de calor é modelado com o auxílio de um sistema térmico de primeira ordem, que origina as equações de elevações de temperatura do transformador.

Em [9], o artigo propõe calcular a perda de vida útil do transformador usando distribuições estatísticas da carga e temperatura ambiente distribuída, utilizando-se um método de linearização. Durante sua vida, o transformador de distribuição é necessariamente submetido a variações de carga aleatórias e temperatura ambiente. Nestas condições, sua perda de vida se torna também uma variável aleatória.

Na referência [10], baseando-se nos padrões IEEE (ANSI/NEMA) que comparam e analisam e escolhendo as melhores aplicações para a decisão técnica e econômica entre transformadores do tipo a seco e óleo isolante. A escolha é baseada em: aplicação, localização, custo, e combinações dos três anteriores.

Estudos em [11] mostram o desenvolvimento do modelo térmico de um transformador específico, e então analisa as diferenças introduzidas na resistência e na variação da constante de tempo térmica.

Considerações sobre a vida útil de materiais isolantes empregados em transformadores, e metodologias utilizadas para se avaliar a degradação destes materiais, são encontradas nas referências [12-13].

As medições das perdas no núcleo e no cobre de transformadores monofásicos são necessárias para estudar o desempenho elétrico e térmico dos transformadores quando estes alimentam cargas não lineares [14].

Na referência [15] são avaliados as aplicações dos transformadores de distribuição tipo seco, destacando-se que estes são mais seguros para serem instalados em edifícios e têm baixo custo de manutenção.

Transformadores tipo seco, regularmente, requerem pouca manutenção. A condição ambiental, preço e confiança determinam a seleção do tipo de transformador. As unidades de VPI (pressurizadas e impregnadas a vácuo) trabalham bem sobre condição de serviço severa. As unidades de VPE (pressurizadas e encapsuladas a vácuo) suportam bem a umidade pesada presente em locais ao ar livre. As unidades lançadas em bobinas podem estar sujeitas a ciclos de carga severos, curto circuito e exposição a climas severos [16].

Utilizando-se como referências básicas as equações de elevação de temperatura oriundas do sistema térmico de primeira ordem, vários estudos foram conduzidos no sentido de se avaliar o comportamento térmico de transformadores supondo cargas lineares [38], em quanto na referência [35]

investiga-se o comportamento de transformadores submetidos a distorções harmônicas.

Na referência [36], o ponto quente do óleo depende da construção do transformador, modelo térmico baseado na transferência de calor, considera variações da viscosidade do óleo e a resistência do enrolamento.

Em [37], discute os efeitos de harmônicos no aquecimento de transformadores e características de uma técnica de medida especificamente projetada para estas necessidades, usando um medidor de harmônicas portátil controlado por um computador pessoal portátil.

Desta forma, observa-se que o tema tem sido bastante explorado, muito embora a sua complexidade determine a necessidade de investigações adicionais.

Neste sentido, dentro do enfoque maior desta dissertação, esta segue na direção de complementar, embora sem esgotar, as referências anteriores, apresentando várias contribuições dentro do contexto aqui enfocado.

Do exposto, a idéia desse trabalho é realizar estudos que inter-relacionam o comportamento elétrico, térmico, vida útil e rendimento de transformadores na presença de sinais distorcidos.

Os estudos ressaltados serão desenvolvidos utilizando-se a técnica no domínio da frequência. Finalmente, deve-se destacar que os estudos apresentados podem ser aplicados para quaisquer transformadores submetidos em quaisquer condições de funcionamento não senoidal. No entanto, essa

dissertação utilizará para as simulações computacionais e experimentais exclusivamente os denominados transformadores a seco.

1.4 – PROPOSTA DO TEMA

Uma das grandes preocupações do setor elétrico nos dias de hoje, é a utilização da energia elétrica de uma forma cada vez mais racional e otimizada, reconhecendo-se a dificuldade que o setor enfrenta para expandir a oferta de energia, uma vez que os recursos financeiros estão escassos. Surge, portanto, a necessidade de se utilizar alternativas que contemplem o aproveitamento ótimo de equipamentos que perfazem parte do sistema elétrico, seja em nível de geração, transmissão ou distribuição de energia. Dentre os dispositivos existentes no sistema elétrico, o transformador apresenta-se com grande destaque. Geralmente, estes equipamentos estão na interface entre os sistemas elétricos e a carga geradora de harmônicos, tornando-se necessário um estudo cuidadoso quando submetidos a níveis significativos de distorções harmônicas, tendo em vista que o principal efeito será a elevação das temperaturas de operação e a conseqüente redução de vida útil do equipamento.

Vários estudos têm sido feitos para analisar as condições térmicas de transformadores a óleo em condições de alimentação não senoidal. Dentre estes, destacam-se as referências [1-4].

Todavia, nos últimos anos têm-se utilizado, em escala cada vez maior, nas instalações industriais e comerciais os transformadores a seco. Estes se justificam por serem seguros, confiáveis, custo de manutenção e perigo de incêndio baixos. Suas principais aplicações estão em hospitais, escolas, edifícios, plantas químicas, etc.

Dentro deste contexto, este trabalho se propõe a estudar o comportamento elétrico, e térmico de transformadores a seco isolados com resina epóxi. Os estudos teóricos são baseados no modelo térmico de primeira ordem, já bastante utilizado e difundido para os transformadores a óleo, sendo inclusive a base para normas de carregamento de transformadores. Desta forma, nesta dissertação esta metodologia será adaptada para os transformadores a seco.

Objetivando validar a modelagem térmica, serão realizados ensaios experimentais em um protótipo trifásico isolado com resina epóxi, especialmente projetado e construído para a execução dos ensaios térmicos. Deve-se salientar que, vários sensores foram instalados em regiões estratégicas do equipamento, permitindo medições das temperaturas de operação e a comparação destes valores com aqueles obtidos pela modelagem térmica.

1.5 – PRINCIPAIS OBJETIVOS

Muito embora diferentes desenvolvimentos já tenham ocorrido no sentido de contemplar a operação de transformadores sob condições de tensões e/ou correntes distorcidas, ainda há lacunas, questionamentos e reflexões a serem respondidos. Portanto, esta dissertação procura contribuir nos seguintes aspectos:

a) Análise da modelagem térmica de transformadores

A utilização de modelos térmicos para estudar o comportamento térmico de transformadores é de suma importância, pois permite a realização de simulações computacionais para diversas situações operacionais a que o equipamento poderia estar submetido.

Neste sentido, através da utilização do modelo térmico de primeira ordem, tradicionalmente conhecido e utilizado pelas normas de carregamento de transformadores, várias simulações computacionais são feitas utilizando este modelo, considerando situações de carregamento linear e não linear.

b) Validação dos métodos através de testes experimentais

A realização de testes experimentais traz uma grande confiabilidade no sentido de validar os procedimentos teóricos. Para isto, utilizou-se um transformador trifásico a seco, especialmente construído para a realização de ensaios térmicos, tendo para este fim, sensores de temperatura localizados em suas principais regiões. Assim foi possível concluir até que ponto as distorções harmônicas afetam o desempenho elétrico, elevação de temperatura e vida útil do transformador.

c) Verificação da influência das perdas por correntes parasitas no comportamento elétrico e térmico dos transformadores.

Normalmente, esta parcela da perda em carga não é considerada nas análises de operação do transformador, porque o seu valor não é significativo em relação às perdas totais em carga. No entanto, quando o transformador está suprindo uma carga não-linear, esta parcela pode ter um impacto muito grande na redução da vida útil do equipamento, que dependerá do valor do seu percentual em relação à perda total em carga, do nível de distorção harmônica e da geometria do transformador.

No tocante às perdas por correntes parasitas (“eddy current loss”) que ocorrem nos enrolamentos, existe, basicamente, uma metodologia de cálculo,

a qual é proposta pela norma ANSI/IEEE [3], que estabelece que esta perda é proporcional ao quadrado da corrente harmônica e da frequência harmônica. Esta situação não leva em consideração a geometria do enrolamento. Deve-se destacar também que, os cálculos destas perdas são baseados na norma referenciada acima, a qual leva a uma sobrestimação no valor total das perdas, implicando em uma redução da vida útil e conseqüentemente um cálculo do “derating”, percentual de perda de carregamento máximo, superestimados.

Neste sentido, esta dissertação segue no sentido de realizar algumas reflexões, comparações e análises sobre o cálculo das perdas referenciadas acima. Neste sentido, uma segunda estratégia, mais elaborada, que considera a geometria do transformador, calcula de uma maneira mais exata as perdas por correntes parasitas, as quais neste trabalho serão identificadas por perdas por correntes parasitas corrigidas.

Neste sentido, este trabalho mostra, através de simulações computacionais, a influência das perdas totais e, principalmente, os efeitos das perdas por correntes parasitas (“eddy current”) no comportamento elétrico, térmico, vida útil, “derating” e rendimento dos transformadores, quando os mesmos estão submetidos às distorções harmônicas de corrente com a inserção da correção acima mencionada.

Dentro das contribuições oferecidas por esta dissertação, além dos aspectos citados anteriormente, destaca-se a apresentação da comparação da estimativa de vida útil, “derating” e do rendimento de transformadores em função das distorções harmônicas de tensão e/ou corrente. Esta análise comparativa é realizada, tomando-se como base duas metodologias citadas anteriormente.

1.6 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, além do capítulo introdutório, esta dissertação é estruturada da seguinte forma:

CAPÍTULO II - Generalidades sobre Sistemas Isolantes Aplicados em Transformadores a seco

Este capítulo, de caráter introdutório e didático, tem por meta apresentar, de uma forma geral e resumidamente, aspectos construtivos sobre os sistemas isolantes usados em transformadores, com destaque especial a resina epóxi, muito utilizado em transformadores a seco. Também são fornecidas informações relacionadas à vida útil e a respectiva correlação com as temperaturas de operação do equipamento.

CAPÍTULO III - Comportamento Térmico e Vida Útil de Transformadores Alimentando Cargas Não Lineares

A proposta deste capítulo é apresentar um modelo térmico de primeira ordem para os transformadores, empregando-se parâmetros concentrados e que permita avaliar as temperaturas internas do equipamento. Desta forma, foram realizados estudos teóricos sobre o desempenho elétrico e térmico dos transformadores alimentando cargas não lineares.

CAPÍTULO IV – Simulações Computacionais

Nesta unidade desenvolveram-se uma modelagem matemática no domínio da frequência e um programa digital para a análise da operação elétrica, térmica, estimação da vida útil e rendimento de transformadores, quando estes

estiverem alimentando cargas não lineares. Nesta etapa as cargas serão caracterizadas por fenômenos determinísticos, ou seja, fenômenos invariáveis no tempo. Deve-se comentar que as simulações serão realizadas levando-se em consideração as características nominais de um transformador de força a seco de 1 MVA.

CAPÍTULO V – Validação Experimental

Este capítulo tem por objetivo principal avaliar o comportamento elétrico e térmico do transformador, através da realização de estudos experimentais, os quais são conduzidos em um protótipo de um transformador trifásico a seco, isolado com resina epóxi, delta/estrela, 5 kVA, especialmente construído para a realização de testes de temperatura, com sensores térmicos localizados em vários pontos do equipamento. Este procedimento viabiliza a comparação entre os resultados computacionais e experimentais com vistas à validação da proposta da modelagem térmica de primeira ordem.

CAPÍTULO VI – Conclusões Gerais

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais discussões e conclusões finais dos vários capítulos que formam o corpo desta dissertação. Além disso, serão ressaltadas algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS ISOLANTES APLICADOS EM TRANSFORMADORES A SECO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das grandes preocupações do setor elétrico nacional consiste na utilização da energia elétrica de uma forma cada vez mais racional e otimizada. Isto se deve a dificuldade atual que o setor enfrenta para expandir a oferta de energia em função da escassez dos recursos financeiros e naturais. Surge, portanto, a necessidade de se estudar alternativas que contemplem o aproveitamento otimizado de equipamentos como: transformadores, motores elétricos, entre outros. Neste sentido, pode-se citar o emprego de materiais mais eficientes, a utilização da capacidade nominal dos equipamentos, etc.

Por outro lado, há de se reconhecer que, usualmente, tais dispositivos elétricos convivem com um sistema elétrico supridor com qualidade comprometida o que equivale a afirmar uma operação fora das suas características nominais. Desta forma, atenção especial deve ser dada aos problemas resultantes da operação sob tais situações e, em especial com a vida útil de tais equipamentos.

Neste contexto, este capítulo de caráter introdutório e didático, apresenta estudo sobre os diversos tipos de materiais isolantes existentes, aspectos comparativos de transformadores e informações relacionadas à sua vida útil.

2.2 – MATERIAIS ISOLANTES

Um sistema isolante consiste de materiais que oferecem uma resistência elevada à passagem de uma corrente elétrica através dele, e que é usado para confinar uma corrente elétrica em um determinado circuito. Em alguns casos o isolante também realiza a função adicional de servir como suporte mecânico do condutor. Um isolante perfeito ofereceria uma resistência infinita à passagem da corrente elétrica, enquanto um condutor perfeito não ofereceria nenhuma resistência. Não existe na prática [17], isolante ou condutores perfeitos, mas os melhores isolantes, tais como o ar, o vidro, a mica, a porcelana, a borracha, o óleo, o verniz, possuem nas temperaturas ordinárias, resistências elétricas de mais de um bilhão de vezes à do cobre ou à do alumínio.

Com vistas a um melhor entendimento sobre a questão, encontra-se, a seguir, uma descrição sucinta dos diversos tipos de isolantes, usualmente empregados em equipamentos elétricos.

2.2.1 – Isolantes gasosos

O isolante gasoso mais usado é sem dúvida o ar, excetuando-se algumas aplicações de gases especiais, notadamente o hexafluoreto de enxofre, também conhecido por gás SF₆. O ar tem sido empregado em níveis de tensão elevados (AT e EAT), proporcionando uma isolação entre barramentos de subestações, linhas de transmissão aéreas, entre outros. Quanto ao gás SF₆, vem sendo empregado também em alta e extra-alta tensão, porém quando a exigência se deve a subestações compactas.

2.2.2 – Isolantes líquidos

Os isolantes líquidos são utilizados, geralmente, em duas áreas, refrigeração e isolação. Seu efeito refrigerante é o de retirar calor gerado internamente ao elemento condutor, transferindo aos radiadores de calor, mantendo, conseqüentemente os níveis toleráveis de aquecimento. É o caso de aplicações em transformadores isolados com óleo, capacitores, etc.

Nesta classe de isolantes pode-se citar os óleos minerais, silicones, o askarel (anteriormente bastante utilizado em transformadores de potência, proibidos atualmente pela legislação), entre outros.

2.2.3 – Isolantes Pastosos e Ceras

Nesta categoria têm-se as parafinas, pasta de silicone e as resinas. Estas são empregadas em equipamentos elétricos e consistem em um verniz que é aplicado na sua forma líquida, solidificando-se após a sua aplicação. O verniz é constituído de um solvente e uma matéria-prima capaz de formar uma película, geralmente representado por uma resina. As resinas são, na sua

grande maioria, quebradiças à temperatura ambiente. Apresentam-se nas seguintes formas:

- **Resinas Naturais:** constituem-se na goma-laca e a copal ambas de origem vegetal;
- **Resinas Polimerizadas (sintéticas):** PUC-Cloreto de Polivinila (isolamento de condutores elétricos), Polietileno, Polistírol (vernizes e filmes empregados nos capacitores do tipo stiroflex).
- **Resinas Sintéticas Condensadas:** Baquelite (matéria-prima de acessórios e peças isolantes de baixa tensão), Resina Epóxi (utilizadas em transformadores a seco).

Um outro tipo de isolante nesta categoria são os vernizes que são resultantes da mistura de resinas com um solvente, adquirindo-se ao final de sua aplicação as características de resina. Têm-se os seguintes tipos mais comuns de vernizes:

- **Verniz da Impregnação:** geralmente encontrado em associação com papéis, tecidos cerâmicos porosos e materiais semelhantes. Sua função é preencher o espaço deixado internamente em um material, com isolante de qualidades adequadas;
- **Verniz de Recobrimento:** destina-se a formar sobre o material sólido de base, uma camada de elevada resistência mecânica, lisa, à prova de umidade e com aparência brilhante. Sua aplicação é necessária em materiais isolantes fibrosos e porosos, assim como coberturas de metais (fios esmaltados);
- **Verniz de Colagem:** Existem materiais isolantes que ao serem purificados perdem sua consistência como por exemplo, a mica e a fibra de vidro. É necessário à colagem de isolantes sobre metais.

2.2.4 – *Isolantes Fibrosos*

Nesta categoria têm-se os seguintes tipos:

- **Papel:** freqüentemente usado para fins elétricos, sobretudo devido à sua grande flexibilidade, capacidade de obtenção em finas espessuras, preço geralmente razoável. O maior problema do papel é a sua alta higroscopia, capacidade de absorção de água, o que limita o seu uso na eletrotécnica, a uma impregnação adequada (com óleo ou verniz). Além das favoráveis propriedades elétricas do papel, ele se destaca pela elevada resistência mecânica. Este comportamento é importante, por exemplo, como isolamento de cabos. Sua capacidade térmica gira em torno de 100 °C. O papel na forma simples isola espiras de fios, caso em que vêm impregnados de óleo ou verniz. É também utilizado em capacitores, para isolar entre si as placas condutoras.
- **Fibras Sintéticas:** fibra de Polianieda (usada como reforço mecânico de cabos de utilização especial, como resistência ao fogo, alta flexibilidade, e por suportar esforços mecânicos. Estas fibras são manufaturadas e consumidas na forma de fitas isolantes.), fibra de vidro (se apresenta com razoável flexibilidade e tem uma estabilidade térmica mais elevada que as outras fibras).

2.2.5 - *Produtos Cerâmicos*

A porcelana é um dos tipos de produto cerâmico, são fabricados nas seguintes formas:

- **Porcelana de Isoladores:** destinam-se à fabricação de isoladores de baixa, média e alta tensão, para as redes elétricas, dispositivos de comando e transformadores. Deve apresentar comportamentos elétricos e mecânicos adequados. É o isolador de uso externo mais usado.

- **Cerâmica de Capacitores:** distingue-se por ser uma peça de elevada constante dielétrica sendo aplicada em capacitores de baixa e alta tensão, onde não se exigem esforços mecânicos elevados.
- **Cerâmica porosa:** própria para receber fios resistivos, destinados à fabricação de resistores de fornos e estufas.

2.2.6 - Vidro

O vidro é uma solução mais moderna para diversos problemas, anteriormente só resolvidos com o uso da porcelana, sendo encontrado na sua forma normal ou temperado. É empregado na construção de isoladores do tipo disco, usados em linhas de transmissão de energia.

2.2.7 - Mica

É um mineral cristalino, que se apresenta na forma de pequenas lamelas. É encontrado com certa facilidade, o que fez deste isolante um dos mais antigos em uso. Deve ser colada com um verniz para que adquira uma forma compacta, podendo se tornar rígido ou flexível, de acordo com o verniz empregado. A mica é um dos produtos de mais elevada estabilidade térmica e a maior temperatura de serviço, atingindo até 1.000 ° C.

2.2.8 - Amianto

É um material mineral fibroso, flexível, resultante da transformação do silicato de magnésio. Destaca-se por estabilidade térmica e alta temperatura de serviço. Pode-se apresentar sob as seguintes formas:

- **Pó de Amianto:** recebe como um aditivo o verniz e é aplicado sobre o papel isolante, tornando-se um produto resistente à água, ácidos,

solventes. É utilizado em preenchimento de fusíveis do tipo encapsulado, com a função de extintor de arco elétrico;

- **Fibras e tecidos de amianto:** produz-se fitas isolantes, ou faz-se o cimento amianto, usado como base de chaves de manobras, câmaras de extinção do arco voltaico e paredes de separação de fases.

2.2.9 - Borrachas

Para aplicações elétricas são válidas apenas as borrachas sintéticas. A borracha butílica, que substitui com vantagem a borracha natural, também sob o ponto de vista elétrico, apresenta alta flexibilidade e boa resistência contra agentes químicos. Sua temperatura de serviço não ultrapassa 85 ° C.

2.3 – RESINA EPOXI COMO ISOLANTE

Com vistas a melhor elucidar o comportamento do transformador de potência a seco, ou seja, isolado a resina epóxi, este item apresenta, de forma mais detalhada, diversas características deste tipo de isolante. São empregadas em diversos setores, sendo:

- **Resinas Industriais:** as resinas Epoxi básicas e seus endurecedores são largamente utilizados pelo setor de tintas e vernizes, sendo aplicados nos seguintes segmentos das indústrias: automotivas, embalagens de bebidas e alimentos (enlatados), setor gráfico, na construção civil (revestimentos de pisos, adesivos), área naval e náutica, eletrodomésticos, autopeças, e equipamentos eletroeletrônicos;
- **Eletrônica:** apresenta excelentes características de isolamento e encapsulamento, propriedades termoeletricas e termomecânicas, retardantes de chamas e forte poder de adesão caracterizam o uso no segmento eletrônico. São aplicadas em: encapsulamento de LED's,

diodos, transistores, revestimento e fabricação de placas de circuito impresso, encapsulamento de componentes de TV/Áudio, encapsulamento de capacitores, reguladores de tensão e bobinas de ignição, impregnação e encapsulamento de magneto e núcleos de pequenos transformadores.

- **Elétrica:** excelentes características de isolação e encapsulamento, propriedades termoelétricas e termomecânicas, resistência a intempéries e a formação de trincas e fissuras, fazem com que as resinas Epoxi sejam cada vez mais utilizadas na indústria elétrica. Pode-se citar alguns tipos de aplicações: isoladores internos e externos de transformadores de distribuição, buchas isoladoras, disjuntores, transformadores de corrente e potencial, isolação de barramentos elétricos, impregnação de estatores e rotores bobinados de máquinas elétricas rotativas, enrolamento de transformadores, etc.

2.4 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE SISTEMAS ISOLANTES

O objetivo principal deste item é realizar uma abordagem geral a respeito dos diversos tipos de isolantes usualmente empregados nos transformadores de energia, com enfoque especial quanto às suas limitações térmicas. Os vários materiais empregados para a isolação dos condutores que formam os enrolamentos dos transformadores, são classificados de tal forma que, a cada grupo corresponde um limite máximo de temperatura admissível. Este limite garante a integridade do sistema isolante, mantendo suas características físicas, químicas e elétricas.

As classes de isolamento utilizadas em transformadores e máquinas elétricas em geral, e os respectivos limites de temperatura conforme estabelece a NBR-7094 são mostradas na tabela 2.1, obtida de [18], apresentando os diversos

tipos de isolantes, sua classificação e valores máximos admissíveis para a temperatura de operação.

Tabela 2.1 - Classes de isolamento.

CLASSE DE ISOLAMENTO	TIPO DE ISOLANTE	TEMPERATURA FINAL [°C] CARACTERÍSTICA**
Y*	*Materiais fibrosos a base de celulose ou seda, não imersos em líquidos isolantes;	90
A*	*Materiais fibrosos a base de celulose ou seda impregnadas com líquidos isolantes	105
E*	*Fibras orgânicas sintéticas e outros;	120
B	Materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes;	130
F	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxi;	155
H	Materiais à base de mica, arbesto ou fibra de vidro aglutinada tipicamente com silicones de alta estabilidade térmica;	180
C	Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante.	>180

* Estes tipos de materiais não são de uso corrente;

** Como temperatura característica entende-se o limite absoluto superior de temperatura na qual a isolação pode desempenhar por um período suficientemente longo sua função precípua.

A experiência mostra que a isolação tem uma longa durabilidade, quando sua temperatura de operação for mantida abaixo de certo limite cujo valor é menor que aquele prejudicial ao isolante. Este depende do tipo de material empregado, e refere-se ao ponto mais quente da isolação.

Adicionalmente, deve-se destacar que esta temperatura está associada a todo o enrolamento, ou seja, à temperatura média do mesmo.

Evidentemente, ocorrendo um ponto fraco no interior da bobina, o enrolamento fica danificado, ou ainda, com o decorrer do tempo, ou devido a um distúrbio qualquer, o isolante pode ficar enfraquecido. Neste sentido, devem ser respeitados para cada tipo de isolante, os seus limites de temperatura, ou seja, a máxima temperatura a que pode estar sujeito. Este valor máximo é função da temperatura ambiente e da elevação de temperatura característica de cada classe de isolamento.

Quanto à temperatura ambiente, quando não se têm maiores informações do local de instalação do transformador, tal valor é assumido como sendo 40 °C.

Com vistas a uma maior compreensão sobre o tema discutido, a figura 2.1 apresenta as classes de isolamento com suas respectivas elevações médias de temperatura, além dos acréscimos necessários para se avaliar a temperatura no ponto mais quente.

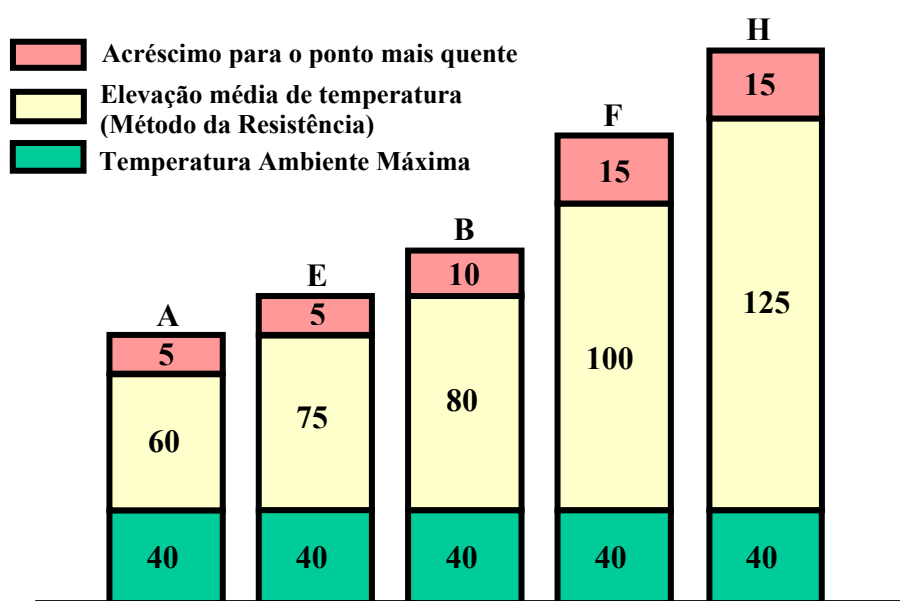


Figura 2.1 - Elevações da temperatura máxima de acordo com a classe de isolamento.

Vale ressaltar que o termo “elevação média da temperatura” está associado ao valor da temperatura do enrolamento, obtida através da medição das variações nos valores da resistência elétrica do mesmo.

Obviamente os valores apresentados na figura 2.1, são valores médios e não retratam as temperaturas nos pontos mais quentes que existem no enrolamento e, o material usado como isolante do transformador aqui focalizado se enquadra na categoria classe F.

Para estimar o ponto mais quente (“hot spot”), as normas sugerem um acréscimo na temperatura de aproximadamente 5 °C a 15 °C.

Com vistas a ilustrar a utilização do gráfico anterior, seja, por exemplo, um transformador a seco com classe de isolamento F cuja temperatura ambiente seja igual a 40 °C. Pode-se afirmar que a temperatura média que a isolação do enrolamento suporta, sem que suas características dielétricas sejam alteradas, é da ordem de 140 °C. Para uma estimativa da temperatura do ponto mais quente, deve-se acrescentar 15 °C, obtendo-se 155 °C.

Vale enfatizar que a confiabilidade da isolação é avaliada em função da influência de fatores internos e externos que atuam sobre seu dielétrico. Os fatores externos que influenciam a isolação são: tipo de instalação, temperatura ambiente, umidade, solicitação mecânica, atmosfera agressiva, dentre outros.

Estes fatores são variáveis para cada instalação e dificilmente se consegue quantificar a influência de cada um, visto que todos podem afetar simultaneamente o sistema de isolamento durante a vida útil do mesmo.

Quanto aos fatores internos, estes podem ocorrer devido a causas puramente elétricas (diferença de potencial) ou causas térmicas (elevação da temperatura).

No primeiro caso, a ruptura da camada isolante ocorre, por exemplo, quando o limite de tensão suportável pela isolação é ultrapassado ou devido às impurezas no dielétrico, decorrentes do próprio material e imperfeições do processo de fabricação do mesmo. Estes problemas alteram o valor inicial da rigidez dielétrica, resultando na sua degradação por meio de descargas parciais.

Estas descargas aumentam progressivamente com o tempo e com o esforço elétrico, atingindo uma área cada vez maior, até a ruptura do isolante.

No segundo caso, um aumento da temperatura acima do admissível pela isolação, pode ocasionar fissuras, amolecimento, carbonização e outras modificações na matéria-prima do material isolante que, por representarem mudanças estruturais, têm como consequência a perda de certas propriedades, entre as quais, o seu poder de isolação. Assim, um aumento, por exemplo, de aproximadamente 7 a 10 °C, acima da temperatura nominal da isolação [18-19], resulta em uma redução da vida útil do transformador pela metade.

Neste sentido, a título de exemplificação, pode-se fixar as condições exigíveis, aplicadas aos transformadores de potência a secos enclausurados ou não, tais como:

- Temperatura do ar de resfriamento (temperatura ambiente) não superior a 40 °C e temperatura média em qualquer período de 24 horas não superior a 30 °C;
- Altitude não superior a 1000 m;

- Tensões de alimentação senoidais e equilibradas.

A tabela 2.2 apresenta os limites de temperatura, de acordo com a classe de isolamento, para materiais isolantes aplicados em enrolamentos de transformadores a seco.

Quaisquer condições do local de instalação, que possam causar restrições ao ar de resfriamento ou produzir temperaturas elevadas, devem ser especificadas ao comprador.

Tabela 2.2 - Limite da elevação de temperatura.

PARTE [°C]	PONTO MAIS QUENTE [°C]	MÉTODO DA VARIACÃO DA RESISTÊNCIA [°C]	CLASSE DE TEMPERATURA MÍNIMA DO MATERIAL	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA [°C]
Enrolamentos	65	55	A	75
	80	70	E	75
	90	80	B	115
	115	105	F	115
	140	130	H	115
	180	150	C	115

Finalmente, deve-se ressaltar o forte inter-relacionamento existente entre o tipo de isolamento empregado no transformador a seco, sua temperatura de operação e a sua subsequente expectativa de vida útil.

2.5 – TRANSFORMADOR ISOLADO A SECO

Os primeiros transformadores do tipo a seco surgiram por volta de 1880. O uso de óleo isolante em aparelhos de indução foi patenteado por David Brooks, da Filadélfia, em 1878. O emprego em transformadores foi

introduzido por Elihu Thomson e foi inicialmente comercializado pela Westinghouse em 1886.

O transformador a seco aberto com classe de isolamento B foi introduzido em 1930, satisfazendo a exigência para transformadores em recinto fechado resistentes ao fogo [4]. Durante a Segunda Guerra Mundial materiais siliconados, foram desenvolvidos para satisfazer operações com as temperaturas mais altas que aquelas permitidas para a classe de isolamento B.

Isolantes mais resistentes à temperatura, como a isolamento H a qual consiste em materiais inorgânicos, como porcelana, mica, e amianto unido ou saturado através de resinas de silicone, foi introduzido em 1950.

Em 1960 unidades lacradas com gás fluorcarbono foram introduzidos. Estes gases permitem que transformadores tipo seco sejam projetados com desempenho de dielétrico equivalente a unidades de askarel, devido à alta resistência dielétrica e propriedades de transferência de calor melhoradas, se comparadas com nitrogênio.

Desde os anos 90, transformadores tipo seco ventilados vêm substituindo os transformadores com óleo isolante, em muitas instalações industriais e comerciais [4], [16].

2.5.1 – Transformador a seco moldado em resina isolante

O desenvolvimento dos transformadores a seco, moldados em resina, ocorreu no início dos anos 60 e teve um grande avanço com estudos inovadores das características convencionais, além de estudos de substâncias vantajosas e de qualidades elétricas aplicadas a ele.

Com o objetivo do desenvolvimento plenamente atingido, milhares de transformadores neste padrão têm sido fornecidos por indústrias de projetos e construção de transformadores a seco, com aplicações nas mais diversas condições e instalações, atestando a sua excepcional confiabilidade, além da sua característica ímpar de ser ecologicamente irrestrito.

O projeto e construção dos transformadores a seco devem atender às normas da ABNT, as especificações para transformadores e reatores, e com isto também atender às normas internacionais IEC 76, bem como os níveis de tensões de ensaio como os transformadores em óleo, conforme ABNT.

Transformadores moldados em resina epóxi, reúnem todas as vantagens para a distribuição de energia elétrica, de forma mais econômica, segura, confiável e ecológica.

Quanto mais próxima for a fonte de energia do ponto de consumo, e quanto mais alta for a tensão, menores serão as perdas no transporte da energia e mais simples a rede elétrica. Sua instalação dispensa portas corta-fogo, poços de recolhimento de fluídos e sistemas de combate a incêndios, permitindo com isso ser colocado praticamente em qualquer local.

Transformadores, porém, requerem espaço, o qual normalmente é escasso e valioso, especialmente na proximidade dos pontos de consumo. Para atender essas exigências, os transformadores devem ser seguros e confiáveis, pois, caso não atendam a essas premissas, representam perigo às pessoas e equipamentos.

Os transformadores a seco em resina epoxi são compactos, seguros, sem restrições ao meio ambiente, versáteis tanto no que se referem às conexões e

aumento da potência com o emprego de ventilação forçada, não necessitam de manutenção e são ecológicos.

O núcleo utilizado em sua maioria é do tipo convencional envolvido, mas pode ser também projetado e construído na forma envolvente [17]. A diferença entre os dois tipos pode ser observada nas figuras 2.2 e 2.3. Em geral, o tipo de núcleo envolvente é mais econômico para transformadores a seco de baixa tensão, enquanto o tipo de núcleo envolvido é mais econômico para os de tensão elevada.

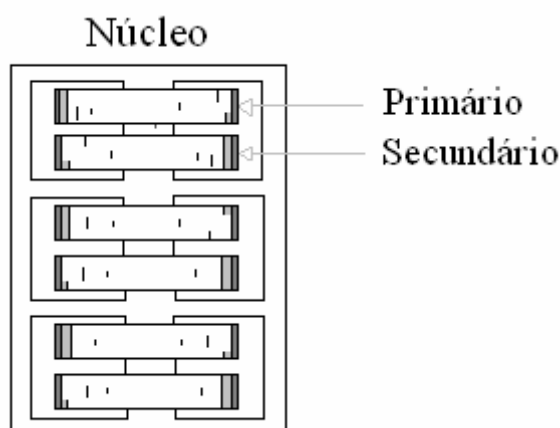


Figura 2.2 – Transformador trifásico do tipo de núcleo envolvente.

Os transformadores do tipo de núcleo envolvente têm sido construídos para tensões até 230kV.

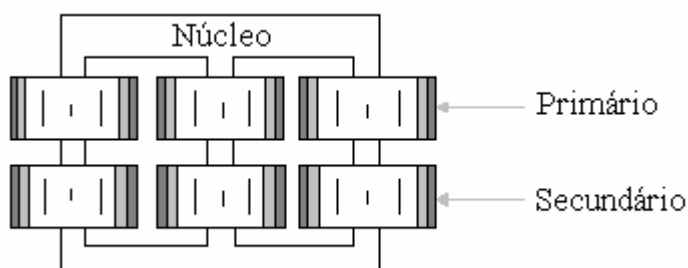


Figura 2.3 – Transformador trifásico do tipo de núcleo envolvido.

A figura 2.4 ilustra um transformador a seco, trifásico a núcleo envolvido e de baixa potência.



Figura 2.4 – Transformador a seco trifásico moldado em resina, com núcleo envolvido.

Considerando o dimensionamento térmico favorável dos transformadores a seco, e a resistência ao envelhecimento dos materiais isolantes empregados, a sua vida útil esperada é igual ou superior à dos transformadores em óleo isolante. O cálculo da ventilação natural ou forçada, necessária para os recintos de instalação destes transformadores, é o mesmo que o aplicado para transformadores em líquidos isolantes.

Sem ultrapassar as elevações máximas de temperatura, os transformadores a seco podem ser submetidos a sobrecargas quando, antes da mesma, operavam em carga parcial e/ou a temperatura máxima ambiente inferior a 40 °C. De qualquer maneira, a sobrecarga deve ser interrompida quando atingida a temperatura máxima permitida ao isolamento.

A parte mais sensível do transformador quanto à temperatura é o seu enrolamento. A temperatura do enrolamento não deve ultrapassar um dado valor correspondente à classe do material isolante empregado no mesmo.

2.5.2 - Principais características dos transformadores a seco com resina epoxi

De uma forma geral, um transformador a seco foco desta dissertação apresenta as seguintes características principais:

- Ocupa aproximadamente 45% da área de um transformador isolado com óleo isolante;
- Projetos com transformadores a seco, além de ocuparem menor espaço, simplificam as obras civis que são necessárias com os transformadores em líquido isolante (dispensam a execução de poços de recolhimento de líquido, sistemas de combate a incêndio, paredes corta-fogo etc.), simplificam a instalação elétrica pela dispensa dos acessórios de supervisão do transformador;
- Apresentam baixo custo operacional, pois não requerem manutenção nem apresentam os instrumentos de proteção e controle, típicos de transformadores com líquido isolante;
- Devido à inexistência de fluído isolante, não há risco de explosão e incêndio e, adicionalmente, não propagam ou intensificam o fogo tendo em vista o material isolante ser auto-extinguível;
- Quando envolvidos em incêndios, não produzem nenhum gás ou cinza tóxicos, não poluindo o ar nem o solo. São, portanto, ecológicos e em plena sintonia com o meio ambiente;
- São insensíveis à umidade, permitindo a energização a qualquer momento, mesmo estando desligados por longos períodos;
- Suportam fortes sobrecargas e apresentam excelente resistência a curto-circuito devido à configuração e construção das bobinas;
- Quando equipados com ventilação forçada adequada, proporcionam uma sobrecarga de no mínimo 40%;

- Admitem uma elevação de temperatura superior aos transformadores isolados a óleo.

2.6 – METODOLOGIA DE CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES A SECO

A durabilidade de um sistema isolante depende, praticamente, da temperatura e do tempo ao qual o mesmo está exposto. A relação entre tempo e temperatura e seus efeitos na isolação tem sido objeto de estudo por vários anos. Em 1930, Montsinger [40] introduziu o conceito da regra dos 10 °C, ou seja, a vida útil do sistema isolante é reduzida à metade para cada aumento de 10 °C da temperatura da isolação.

Em [18,19], a estimativa da expectativa de vida útil dos materiais isolantes é efetuada empregando-se a teoria clássica de "Arrhenius-Darkin". Esta estabelece que a vida útil da isolação está intimamente associada à temperatura de operação, bem como ao tempo de exposição da mesma. O processo de deterioração do isolante consiste em um fenômeno químico, onde uma oxidação lenta e gradual leva ao endurecimento do verniz isolante. Conseqüentemente, o mesmo torna-se quebradiço, levando à perda da flexibilidade mecânica e da rigidez dielétrica. Em outras palavras, trata-se do envelhecimento gradual do isolante ao longo do tempo, que vai perdendo suas propriedades isolantes [4], até que não mais suporta a tensão aplicada e ocasiona um curto-circuito entre as partes energizadas.

Ainda conforme [18,26,27], a degradação térmica de materiais orgânicos e inorgânicos de um equipamento elétrico, pode ser estimada pela equação da taxa de reação conhecida como a expressão de Arrhenius, dada por:

$$\frac{dEVu}{dt} = A e^{\frac{-E}{k.\theta}} \quad (2.1)$$

Em que:

EVu - vida útil do isolamento do enrolamento;

t - tempo de vida em anos;

$\frac{dEVu}{dt}$ - taxa de redução da vida útil em relação ao tempo;

A - constante do material;

k - constante de Boltzmann igual a $0,8617 \times 10^{-4}$ [eV];

θ - temperatura absoluta do ponto mais quente em graus Kelvin;

E - energia de ativação da reação de envelhecimento [eV].

A análise da equação mostra que a mesma, na forma apresentada, fornece valores absolutos da vida útil de um determinado sistema isolante. Há de se reconhecer que o cálculo da vida útil a partir da temperatura de operação da isolação é um tanto difícil. A razão disto está na necessidade de se esperar um longo período de tempo, até que a isolação sofra a primeira deterioração, para aí sim, avaliar o tempo de vida da mesma.

Reconhecendo estes aspectos, são utilizadas estratégias que permitem expressar a vida útil da isolação do transformador, como uma porcentagem de uma referência conhecida. Esta, via de regra, consiste na vida útil nominal do isolante, vinculada com a temperatura nominal da sua classe de isolamento.

Para contemplar o que foi anteriormente exposto, faz-se necessário modificar a equação (2.1), de onde surge a expressão matemática que dá origem à

conhecida “curva de Arrhenius”. Para tanto, integrando-se a expressão (2.1) e aplicando logaritmo em ambos os lados, obtêm-se:

$$\ln EVu = \left(\frac{E}{k} \right) \frac{1}{\theta} + A \quad (2.2)$$

A expressão (2.2) indica que o tempo de vida da isolação é função da energia de ativação específica do material, e da temperatura da isolação, considerada constante ao longo de toda sua vida útil. As “curvas de Arrhenius” são obtidas traçando-se $\ln EVu$ versus $1/\theta$, cuja inclinação é, obviamente, E/k . Conhecendo-se dois pontos quaisquer, EVu_1 e EVu_2 , pertencentes à curva de *Arrhenius*, com suas respectivas temperaturas, θ_1 e θ_2 e utilizando a equação (2.2), tem-se:

$$\ln EVu_1 - \ln EVu_2 = \left(\frac{E}{k} \right) \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2} \right) \quad (2.3)$$

A equação (2.3) permite avaliar a redução da vida útil do material isolante em uma determinada condição operacional em função de valores conhecidos. Isto equivale a dizer que o tempo de vida da isolação pode ser obtido em função de parâmetros conhecidos, quais sejam aqueles associados às condições nominais de operação do equipamento. Neste sentido, considerando-se que o tempo de vida útil nominal da isolação seja igual a EVu_2 , a uma temperatura nominal θ_2 , quando a temperatura de operação sofre um acréscimo $\Delta\theta$, ou seja, quando θ_1 é igual a $\theta_2 + \Delta\theta$ e substituindo o valor de θ_1 na expressão (2.3) e após algumas transformações, pode-se escrever:

$$EVu = EVu_{\text{nom}} e^{-\left(\frac{E}{k}\right) \left(\frac{\Delta\theta}{\theta_{\text{nom}} (\theta_{\text{nom}} + \Delta\theta)} \right)} \quad (2.4)$$

Sendo:

EVu - tempo de vida útil do transformador para $\theta = \theta_{\text{nom}} + \Delta\theta$;

EVu_{nom} - tempo de vida útil nominal do transformador para $\theta = \theta_{\text{nom}}$;

$\Delta\theta$ - acréscimo de temperatura em relação a θ_{nom} em graus °C;

θ_{nom} - temperatura nominal do transformador em graus Kelvin.

Para o emprego da expressão, observa-se a necessidade do conhecimento da vida útil nominal, da classe de isolamento do transformador e, fundamentalmente, da temperatura da isolação do enrolamento do transformador na condição operacional que se deseja analisar.

2.6.1 - Redução da Vida Útil em Função de um aumento Adicional de Temperatura

É importante ressaltar que na avaliação da perda de vida útil, é de fundamental relevância o conhecimento dos aspectos relativos à elevação da temperatura em áreas estratégicas localizadas no interior dos transformadores. Nestes, a região mais sensível a ser investigada consiste da isolação do enrolamento de baixa tensão, uma vez que este sofre de forma direta os efeitos advindos de uma maior elevação de temperatura. Para a determinação das elevações da temperatura que o mesmo está sujeito, geralmente recorre-se às medições *in loco* ou estimativas via modelos térmicos do transformador.

Adicionalmente, devem-se estabelecer valores nominais para a vida útil do isolante, bem como sua respectiva temperatura de referência. Quanto a esta

questão, deve-se ressaltar que a escolha é subjetiva. Prova disto é que não se observou, na literatura pesquisada, um consenso com relação ao tempo de vida nominal para os transformadores, sejam eles a seco ou com óleo isolante. A referência [23] considera que a vida útil da isolação, quando trabalhando na temperatura nominal, é da ordem de 65.000 horas. Outras literaturas admitem, de forma conservativa, uma vida útil da ordem de 180.000 horas. É essencial entender, contudo, que o limite supracitado está associado às seguintes condições operacionais:

- Tensões de alimentação puramente senoidais, equilibradas e simétricas;
- Carregamento nominal e senoidal;
- Funcionamento contínuo;

Assim, qualquer situação operativa que não àquelas descritas, podem ocasionar diminuição da vida útil do transformador.

A título de exemplificação, procede-se, na seqüência, a uma aplicação numérica envolvendo os conceitos anteriormente explorados. Para tanto seja um transformador a seco cujas características são dadas a seguir:

- energia de ativação - $E = 1,1 \text{ eV}$;
- temperatura do ponto mais quente - $\theta_2 = 85 \text{ °C}$;
- temperatura ambiente - 40 °C
- tempo de vida útil nominal da isolação - $EVu_{nom} = 20 \text{ anos}$;

Com vistas a mostrar os efeitos provenientes de acréscimos de temperatura no transformador, a tabela 2.3 apresenta o comportamento da vida útil do mesmo. Esta tabela foi elaborada através da utilização da equação 2.4 e dos

dados supracitados. A elevação de temperatura $\Delta\theta$ expressa o incremento adicionado ao valor nominal.

Tabela 2.3 - Redução de Vida Útil com Adicional de Temperatura.

ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA - $\Delta\theta$ (°C)	<i>EVu</i> [Anos]	<i>EVu</i> [pu]	Redução da <i>EVu</i> [%]
0	20	1	0
1	18,50	0,93	7,54
2	17,10	0,86	14,48
3	15,83	0,79	20,86
4	14,65	0,73	26,75
5	13,56	0,68	32,17
6	12,56	0,63	37,17
7	11,65	0,58	41,77
8	10,80	0,54	46,02
9	10,01	0,50	49,95
10	9,28	0,46	53,56
12	8,00	0,40	59,99
14	6,90	0,34	65,50
16	5,90	0,30	70,17
18	5,16	0,26	74,18
20	4,47	0,22	77,63
25	3,14	0,16	84,28
30	2,23	0,11	88,86
35	1,59	0,08	92,04

A linha em destaque mostra a redução da vida útil do transformador, com enfoque especial para a condição operacional em que a mesma é reduzida pela metade. Este fato expressa o resultado de uma elevação de temperatura de aproximadamente 9 °C acima da temperatura nominal, a qual está associada à classe de isolamento do transformador. A figura 2.5 sintetiza os resultados da tabela 2.3, de forma gráfica.

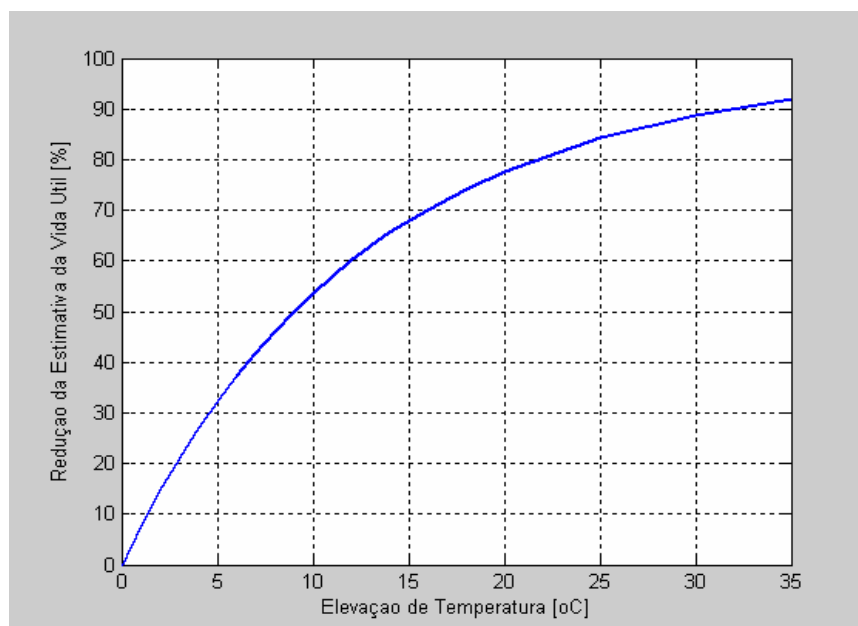


Figura 2.5 - Redução de vida útil com adicional de temperatura [%].

Uma avaliação tanto da tabela como da figura, mostra uma redução significativa da vida útil da isolação quando da ocorrência de pequenas elevações de temperatura acima dos valores considerados como referenciais para cada classe de isolamento. Os resultados apresentados na avaliação consideram que a temperatura ambiente é de 40 °C.

2.6.2 – Influência da Temperatura Ambiente na Vida Útil de Transformador Seco

A temperatura ambiente é um fator determinante na avaliação da expectativa de vida de um transformador, já que as elevações de temperatura para qualquer condição operacional devem ser somadas à temperatura ambiente, a fim de determinar as temperaturas de operação dos transformadores.

Sempre que houver monitoramento da temperatura ambiente, deve-se obter a média no período de 24 horas para, então, avaliar a temperatura de operação do transformador [27].

Desta forma, utilizando-se novamente da equação 2.4 e das mesmas condições anteriores, a tabela 2.4 e figura 2.6 correspondente, fornecem a elevação da vida útil em função da redução da temperatura ambiente.

Tabela 2.4 – Elevação da Vida Útil em Função da Redução da Temperatura Ambiente.

Decréscimo na Temperatura Ambiente $\Delta\theta$ (°C)	<i>EVu</i> [Anos]	<i>EVu</i> [pu]	Elevação da <i>EVu</i> [%]
0	20,00	1,00	0,00
3	25,36	1,27	26,81
6	32,28	1,61	61,40
9	41,23	2,06	106,17
12	52,87	2,64	164,36

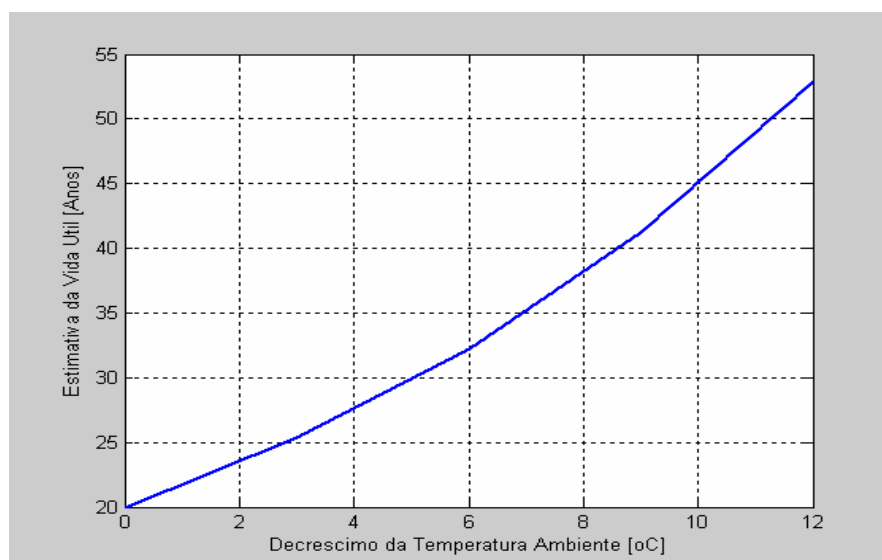


Figura 2.6 – Elevação de vida útil com decréscimo de temperatura ambiente.

A observação e análise permitem concluir que da tabela, como seria esperada, a variação associada à temperatura ambiente exerce uma influência significativa na vida útil da isolação do transformador seco.

À título de ilustração, observa-se da tabela 2.4 que uma redução de 12 °C na temperatura ambiente, haverá um aumento da vida útil nominal de 20 anos do transformador para aproximadamente 53 anos.

2.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo trouxe uma breve história do transformador tipo seco e enfocou questões relacionadas aos isolantes utilizados nestes equipamentos, fez-se um estudo a respeito da vida útil do transformador e sua redução quando há um aumento adicional de temperatura do enrolamento e temperatura ambiente.

Uma amostra de vários tipos de isolantes e suas aplicações foi detalhado inicialmente. Fez-se uma abordagem de como o isolante é moldado nos transformadores e, em seguida, uma comparação com transformadores a seco e com óleo isolante.

Através da teoria de “Arrhenius-Darkin”, foi possível simular aumentos de temperatura e construir gráficos que mostram a expectativa de vida da isolação, quando se ultrapassa o valor de referência dado pela classe de isolação do transformador.

CAPÍTULO III

COMPORTAMENTO TÉRMICO E VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ALIMENTANDO CARGAS NÃO LINEARES

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O comportamento elétrico e térmico de transformadores sob condições de operação em que as correntes e as tensões são senoidais, constitui assunto

bastante difundido no contexto da engenharia elétrica e, portanto, dispensa comentários adicionais.

Todavia, com as modernas técnicas de conversão e/ou transformação de energia empregando-se, cada vez mais, dispositivos elétricos/eletrônicos e outros com comportamento não linear, tem-se constatado distorções, cada vez maiores, das formas de onda de tensão e/ou corrente. Nestas condições, torna-se necessário investigar o inter-relacionamento entre os equipamentos em funcionamento e a qualidade da rede elétrica à qual os mesmos se encontram conectados.

Considerando que o transformador é um dos componentes de maior interesse nos sistemas elétricos de potência, e que o mesmo encontra-se na interface entre os sistemas de energia e as cargas não lineares, estes dispositivos podem ter seu comportamento elétrico, térmico e sua vida útil afetados.

Os efeitos podem ser explicados pelo fato que a operação com tensão e/ou correntes não senoidais irá resultar em um aumento de perdas totais e, conseqüentemente, haverá uma elevação de temperatura do transformador acima de seu limite térmico, implicando em uma redução de sua vida útil.

Desta forma, este capítulo se propõe ao estudo, análise física, modelagem elétrica e térmica, estimativa de vida útil, “derating” e rendimento de transformadores, submetidos a fenômenos harmônicos, cujos comportamentos são considerados como determinísticos, isto é, invariáveis no tempo.

3.2 – FONTES DE AQUECIMENTO

3.2.1 - Efeitos da distorção harmônica nas perdas em transformadores.

As perdas totais em transformadores são constituídas basicamente por duas parcelas, quais sejam: perdas a vazio (perdas no núcleo) e perdas em carga.

As perdas a vazio se dividem em perdas por histerese, que são aquelas causadas pela inversão dos domínios magnéticos no material do núcleo, e as perdas por corrente de Foucault, que são induzidas pelos campos magnéticos alternados que atravessam o núcleo [23].

Por outro lado, as perdas em carga nos enrolamentos se dividem em perdas por efeito Joule nos enrolamentos (perdas RI^2) e perdas do tipo "stray load", ou perdas suplementares. As perdas suplementares são aquelas devido à dispersão de fluxo eletromagnético nos enrolamentos, núcleo e partes metálicas do transformador. Estas perdas podem ser divididas em perdas por correntes parasitas nos enrolamentos e perdas suplementares nas demais partes do transformador. Desta forma, as perdas totais do transformador podem ser expressa de acordo com a expressão, identificando-se as parcelas que a compõe:

$$P_T = P_O + P_C \quad (3.1)$$

$$P_O = P_H + P_F \quad (3.2)$$

$$P_C = P_J + P_{SL} \quad (3.3)$$

$$P_{SL} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (3.4)$$

Onde:

P_T = perdas totais, em Watts;

P_O = Perdas no núcleo, em Watts;

P_H = perdas por histerese no núcleo, em Watts;

P_F = perdas por corrente de Foucault no núcleo, em Watts;

P_C = perdas totais nos enrolamentos, em Watts;

P_J = perdas por efeito Joule nos enrolamentos, em Watts;

P_{SL} = perdas suplementares totais, em Watts;

P_{EC} = perdas por correntes parasitas nos enrolamentos, em Watts;

P_{OSL} = perdas suplementares nas demais partes do transformador, em Watts.

Cada uma das parcelas de perdas da expressão será detalhada a seguir, mostrando-se a influência da distorção harmônica no cálculo destas componentes.

3.2.2 - Perdas no núcleo – P_o

As perdas que ocorrem no núcleo do transformador são resultantes de dois fenômenos:

(a) a tendência do material em se opor à variação dos domínios magnéticos do material e, (b) aquecimento $R I^2$ que se desenvolve no material, resultante das correntes induzidas pelo fluxo magnético variante no tempo [18]. O primeiro fenômeno resulta nas perdas por histerese e o segundo fenômeno são as chamadas perdas por corrente de Foucault. Portanto, as perdas no núcleo constituem na somatória destas duas componentes, as quais são analisadas separadamente a seguir.

3.2.2.1 - Perdas por histerese

Sabe-se que, para a condição de tensão nominal e senoidal, as perdas por histerese podem ser expressas por:

$$P_{HN} = k_H \cdot f (B_{m\acute{a}x})^s \quad (3.5)$$

Em que:

P_{HN} = perdas por histerese para a carga nominal e senoidal, em Watts;

k_H = constante que depende do material do núcleo;

f = frequência fundamental, em Hz;

s = coeficiente de Steinmetz, que assume valores típicos entre 1,5 e 2,5;

$B_{m\acute{a}x}$ = valor máximo da densidade do fluxo magnético.

Com o intuito de desenvolver a expressão para a condição de alimentação não senoidal, será considerada uma tensão distorcida com zeros simples para $\omega t = 0$ e $\omega t = \pi$, ou seja, $v(0) = v(\pi) = 0$, de acordo com a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} v(\omega t) &= \sum \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(n\omega t + \Phi_n), \\ v(0) &= v(\pi) = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Sendo:

n = ordem harmônica;

V_n = tensão eficaz para a ordem " n ";

Φ_n = ângulo de fase da tensão harmônica de ordem " n ".

Deve-se salientar que ondas de tensão com múltiplos zeros em um ciclo, introduz ciclos internos nos domínios de histerese. Ocorrem muito raramente na prática, razão pela qual não se considera esta hipótese neste trabalho [23].

A figura 3.1 a seguir, mostra as duas situações de tensão distorcida e os correspondentes ciclos de histerese.

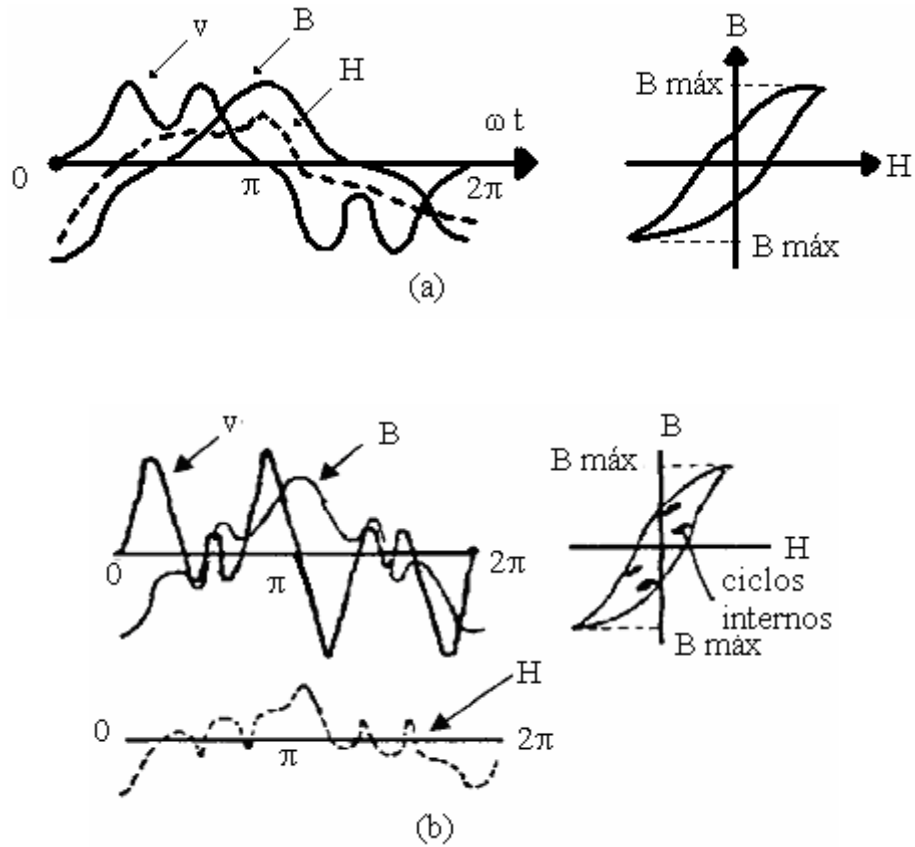


Figura 3.1 - Formas de onda de tensão, campo magnético e indução magnética distorcida e os correspondentes ciclos de histerese, considerando:

- (a) Tensão distorcida com zeros simples
- (b) Tensão distorcida com múltiplos zeros

O valor da amplitude máxima da indução magnética e o valor médio da tensão são fornecidos pelas equações 3.7 e 3.8, correspondentes à condição da figura 3.1 são dadas por [34]:

$$B_{\text{máx}} = \frac{\pi}{2N_e A \omega} \frac{1}{\pi} \int v(\omega t) d(\omega t) = K \pi V_{\text{méd}} \quad (3.7)$$

$$V_{\text{méd}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n}{n} \cos \Phi_n \quad (3.8)$$

Sendo:

$$K = \frac{1}{2N_e A \omega} \text{ constante de proporcionalidade;}$$

- $V_{méd}$ = valor médio da tensão no meio ciclo considerado;
- N_e = número de espiras do enrolamento;
- A = área da seção transversal do núcleo;
- ω = $2\pi f$, velocidade angular.

Substituindo as expressões (3.7) e (3.8) em (3.5) obtém-se as perdas por histerese para uma forma de onda de tensão distorcida:

$$P_{Hn} = K_H f \left[2\sqrt{2K} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n}{n} \cos \Phi_n \right]^S \quad (3.9)$$

Em que:

P_{Hn} = perdas por histerese para uma carga não-senoidal;

Substituindo-se o valor de $B_{máx}$ para a condição de carga nominal e senoidal na expressão (3.5), obtém-se:

$$P_{HN} = k_H f \left[2\sqrt{2k} V_1 \right]^S \quad (3.10)$$

Dividindo-se a expressão (3.9) pela expressão (3.10), chega-se à expressão geral, para as perdas por histerese [3, 28], como mostra a equação (3.11):

$$\frac{P_{Hn}}{P_{HN}} = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{V_n}{V_1} \cos \Phi_n \right]^S \quad (3.11)$$

A título de ilustração, mostra-se na figura 3.2, o comportamento das perdas por histerese em [pu] em função das distorções harmônicas de tensão.

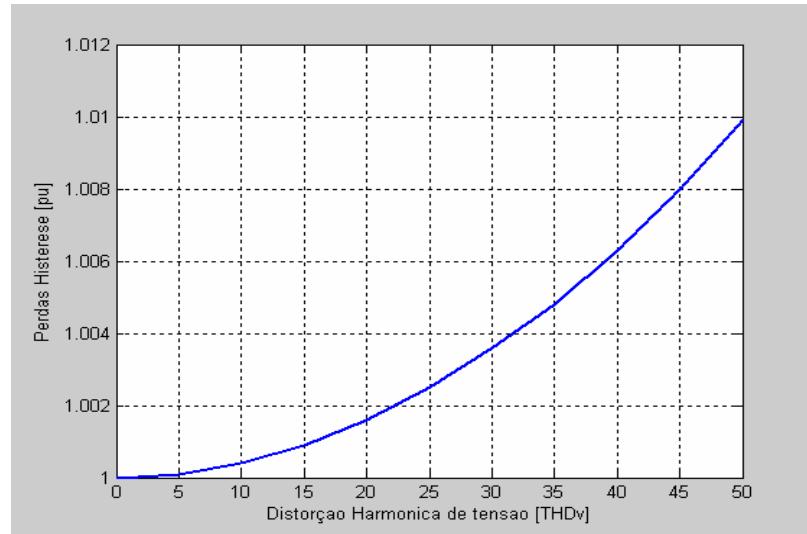


Figura 3.2 – Perdas por histerese no núcleo em função da distorção harmônica total de tensão.

Observa-se nesta figura que, para níveis de distorção harmônicas menores que 5% considerados normais, os aumentos nas perdas por histerese são insignificantes. No entanto, para distorções maiores compreendidas entre 5 e 20 %, há um aumento, mas não atingindo valores que venham a comprometer o comportamento térmico dos transformadores.

3.2.2.2 - Perdas por corrente de Foucault no núcleo

Para a frequência fundamental e condições nominais de carga, as perdas por correntes de Foucault são dadas por:

$$P_{FN} = k_F f^2 B_{máx}^2 \quad (3.12)$$

Em que:

P_{FN} = perdas por corrente de Foucault para a carga nominal e senoidal, em Watts;

k_F = constante que depende do material do núcleo.

Para uma tensão não-senoidal, as perdas por corrente de Foucault são determinadas pelas seguintes expressões [34]:

$$P_{Fn} = k_F f^2 B_{máx}^2 \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{V_n}{V_1} \right]^2 C_{en} C_{Tn} \right] \quad (3.13)$$

Onde:

$$C_{en} = 1 - 0,0017 \zeta^{3,61}, \quad \zeta < 3,6 \quad (3.14)$$

ou

$$C_{en} = \frac{3}{\zeta}, \quad \zeta > 3,6 \quad (3.15)$$

e

$$\zeta = \Delta \sqrt{\pi \mu \gamma n f} \quad (3.16)$$

Sendo:

P_{Fn} = perdas por corrente de Foucault em condições não-senoidais, em Watts;

V_1 = componente fundamental da tensão não-senoidal, em Volts;

Δ = espessura da chapa do núcleo magnético, em metros;

μ = permeabilidade magnética do núcleo, em H/m;

γ = condutividade térmica do núcleo magnético, em ohm.m;

n = ordem harmônica;

f = frequência fundamental;

C_{Tn} = fator correção aplicado somente a transformadores trifásicos e componentes seqüência zero;

V_n = tensão eficaz do n-ésimo harmônico.

Dividindo-se a equação (3.13) por (3.12) tem-se a expressão genérica das perdas por corrente de Foucault para uma alimentação com tensão distorcida em função das perdas para condições de tensão senoidal:

$$\frac{P_{Fn}}{P_{FN}} = \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \right)^2 C_{en} \right] \quad (3.17)$$

Para os harmônicos de altas frequências, a reação causada pelas correntes de Foucault faz com que a indução magnética não seja uniforme, apresentando-se menor no centro das chapas de aço silício. Este fenômeno implica na redução das perdas por corrente de Foucault, e tal efeito é quantificado pela inclusão do parâmetro C_{en} nas equações (3.13) e (3.17).

A título de ilustração, mostra-se na figura 3.3 o comportamento das perdas por Foucault no núcleo em [pu] e em função das distorções harmônicas totais de tensão.

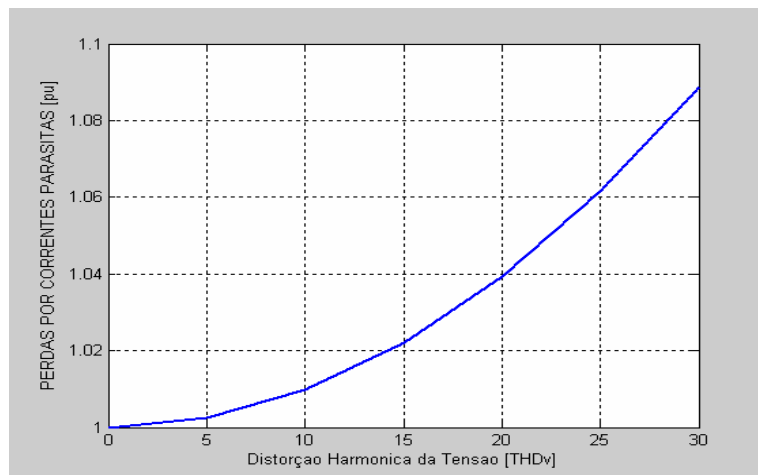


Figura 3.3 – Perdas por correntes parasitas no núcleo em função da distorção harmônica total de tensão.

Observa-se nesta figura que, para pequenas distorções (menores que 5 %), o aumento nas perdas associadas às correntes parasitas para distorções de tensão normalmente encontradas nos sistemas elétricos de potência podem ser consideradas desprezíveis.

No entanto para uma distorção qualquer, as perdas totais a vazio, que corresponde a soma de $P_{Hn} + P_{Fn}$, é mostrada na expressão seguinte:

$$\frac{P_{on}}{P_{oN}} = \frac{P_{HN}}{P_{oN}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{V_n}{V_1} \cos \Phi_n \right]^S + \frac{P_{FN}}{P_{oN}} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \right)^2 C_{en} \right] \quad (3.18)$$

Sendo:

$P_{oN} = P_{HN} + P_{FN} =$ perdas a vazio para carga nominal e senoidal;

$P_{on} = P_{Hn} + P_{Fn} =$ perdas a vazio em condições de carga não-senoidal.

3.2.3 - Perdas em carga – P_c

As perdas em carga de um transformador, como foi visto anteriormente, compreendem a somatória de três parcelas de perdas: as perdas por efeito joule nos enrolamentos, as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos e as perdas suplementares nas demais partes do transformador. A seguir é analisada cada uma destas parcelas.

3.2.3.1 - Perdas por efeito Joule nos enrolamentos

As perdas joule nos enrolamentos do transformador dependem da resistência e de sua corrente de carga.

Sendo assim, se o valor eficaz da corrente aumenta devido às componentes harmônicas, as perdas por efeito Joule sofrerão um aumento correspondente, como mostra a expressão a seguir:

$$P_{Jn} = P_{Jn}(p) + P_{Jn}(s) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(p) I_n^2(p) + \sum_{n=1}^{\infty} R_n(s) I_n^2(s) \quad (3.19)$$

Em que:

$P_{Jn} =$ perdas por efeito Joule nos enrolamentos para a condição de

alimentação não- senoidal ;

$P_{Jn}(p)$ = perdas por efeito Joule no enrolamento primário do transformador para a condição de alimentação não-senoidal;

$P_{Jn}(s)$ = perdas por efeito Joule no enrolamento secundário do transformador para a condição de alimentação não-senoidal;

$R_n(p)$ = resistência do enrolamento primário do transformador para a condição de alimentação não-senoidal;

$R_n(s)$ = resistência do enrolamento secundário para a harmônica de ordem " n ";

$I_n(s)$ = valor eficaz da corrente de ordem " n " do enrolamento secundário.

$I_n(p)$ = valor eficaz da corrente de ordem " n " do enrolamento primário.

Observa-se da equação anterior que os valores de resistência do enrolamento primário e secundário são representados em função da ordem harmônica, ou seja, estes parâmetros são assumidos como sendo variáveis com a frequência.

De fato, dois fenômenos contribuem para a variação da resistência com a frequência:

Efeito skin ou efeito pelicular - Este fenômeno é o resultado da não uniformidade da indutância própria através das seções reta do condutor, fazendo com que a distribuição de corrente seja maior na superfície do que no centro do condutor, estabelecendo-se uma resistência em corrente alternada maior.

Efeito de proximidade - Fenômeno causado pela distorção dos campos magnéticos dos condutores próximos que se interagem entre si, distorcendo a distribuição das correntes nos mesmos e alterando o valor da resistência elétrica.

A variação da resistência com a frequência, devido a estes dois fenômenos só será significativa para condutores que apresentem grandes seções transversais.

Na prática, para a maioria dos transformadores, os enrolamentos da alta tensão possuem pequenas seções transversais, de tal forma que o efeito skin e de proximidade não são significativos a ponto de alterar o valor da resistência com a frequência. Os efeitos podem ser significativos nos enrolamentos de baixa tensão, pelo fato destes possuírem maiores seções transversais.

Não obstante às observações anteriores, neste trabalho o efeito pelicular e os de proximidade foram omitidos.

3.2.3.2 - Perdas por "stray load" ou perdas suplementares

As perdas suplementares em um transformador (P_{SL}) são subdivididas em perdas parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) e perdas suplementares nas demais partes (P_{OSL}). Desta forma essa parcela de perdas pode ser expressa pela equação (3.20).

$$P_{SL} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (3.20)$$

Onde:

P_{SL} = Perdas suplementares totais;

P_{EC} = Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos;

P_{OSL} = Perdas suplementares nas demais partes do transformador.

Vale salientar que as perdas suplementares nas demais regiões do transformador são desprezadas, uma vez que apresentam valores muito baixos em relação às demais perdas.

No tocante às perdas por correntes parasitas (“eddy current losses”) que ocorrem nos enrolamentos, existe, basicamente, uma metodologia de cálculo, a qual é proposta pela norma ANSI/IEEE [3], que estabelece que esta perda é proporcional ao quadrado da corrente e da frequência harmônica. Esta situação não leva em consideração a geometria do enrolamento. Deve-se destacar também que, os cálculos destas perdas são baseados na norma referenciada acima, a qual leva a uma sobrestimação no valor total das perdas, implicando em uma redução da vida útil e conseqüentemente um cálculo do “derating” superestimados.

Neste sentido, esta dissertação segue no sentido de realizar, comparações e análises sobre o cálculo das perdas referenciadas acima. Sendo assim, uma segunda estratégica, mais elaborada, que considera a geometria do transformador [5, 28], calcula de uma maneira mais precisa as perdas por correntes parasitas, as quais neste trabalho serão identificadas por perdas por correntes parasitas corrigidas.

Deve-se salientar que esta é uma das contribuições deste trabalho, que fará uma série de reflexões, comparações e análises entre a metodologia mostrada pela norma ANSI/IEEE C 57.110/D7 [3] e a estratégia alternativa apresentada neste trabalho.

3.2.3.3 – Cálculo das Perdas por Correntes Parasitas de Acordo com a Norma ANSI/IEEE C57. 110/D7

Seja a Figura 3.4, quando um condutor é submetido a um campo magnético alternativo que de acordo com as referencias [3, 28], tem-se:

$$H(t) = \sqrt{2} \cdot H \cdot \sinh(\omega t) \quad (3.21)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.22)$$

H = campo magnético de valor eficaz, em A/m;

f = frequência do sistema de alimentação, em Hz;

n = ordem harmônica;

nf = frequência do campo magnético instantâneo na ordem harmônica, em Hz;

ω = velocidade angular, em rad/s.

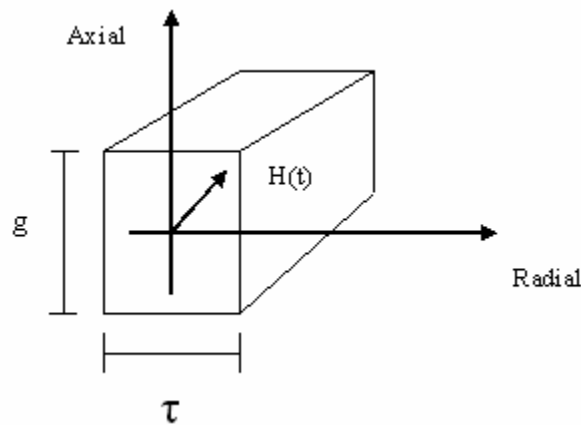


Figura 3.4 - Condutor retangular imerso em um campo magnético perpendicular a largura τ e paralelo a espessura g .

Uma estimativa das perdas em carga por correntes parasitas, causadas por um campo magnético de vetor paralelo com o lado do condutor, pode ser obtido usando a seguinte expressão [5]:

$$P_{EC} \approx \frac{\pi \cdot f^2 \tau^2 \mu_o^2 H^2}{3\rho} \quad (3.23)$$

Com:

τ = largura do condutor, perpendicular ao vetor H , em metros;

g = espessura do condutor, paralelo ao vetor H , em metros;

ρ = resistividade do condutor, em $\Omega.m$;

$\mu_o = 4\pi 10^{-7}$ = permeabilidade magnética do vácuo, em H/m.

Como a intensidade do campo magnético H , de um transformador, é proporcional a corrente de carga I , isto é:

$$H = k_H I \quad (3.24)$$

Para uma corrente de carga periódica, mas não senoidal, seu valor eficaz é:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^m I_n^2} = A \sqrt{\sum_{n=1}^m J_n^2} \quad (3.25)$$

Em que:

I_n = corrente harmônica eficaz de ordem n em Amperes;

$J_n = I_n/A$ é a densidade de corrente eficaz em A/m^2 ;

A = área de secção transversal do condutor em m^2 ;

m = ordem harmônica máxima.

Assim, o campo magnético de dispersão não senoidal produz a perda por corrente parasita que podem ser calculadas substituindo (3.24) e (3.25) em (3.23) tem-se que:

$$P_{EC} \approx k \sum_{n=1}^m n^2 I_n^2 = k_1 A \sum_{n=1}^m n^2 J_n^2 \quad (3.26)$$

Com:

$$k_1 = \frac{\pi \cdot f^2 t^2 \mu_o^2}{3\rho} k_H^2 \quad (3.27)$$

Quando a corrente do transformador equipara-se a corrente nominal (I_N), as perdas provocadas por correntes parasitas nos condutores podem ser expressas por:

$$P_{ECN} = KI_N^2 = K_1 A J_N^2 \quad (3.28)$$

Sendo:

J_N = densidade de corrente nominal eficaz em A/m².

A perda em carga total em certo ponto do enrolamento é dada portanto pela soma das perdas joulicas (P_J) e perdas por correntes parasitas (P_{EC}), como mostra a equação (3.29):

$$P_C = P_J + P_{EC} \quad (3.29)$$

Sendo:

$$P_J = \rho \cdot J^2 \quad (3.30)$$

A perda da distorção normalizada, em função da perda joule nominal P_{JN} , é obtida de (3.29).

$$\frac{P_c}{P_{JN}} = \frac{P_J}{P_{JN}} + \frac{P_{EC}}{P_{JN}} \quad (3.31)$$

Onde a perda Joule nominal é:

$$P_{JN} = \rho \cdot J_N^2 \quad (3.32)$$

Fazendo a normalização, elimina-se nas equações informações de difícil obtenção, ficando assim em função das perdas nominais, que são facilmente obtidas através dos fabricantes.

Através da análise de (3.30), tem-se:

$$\frac{P_J}{P_{JN}} = \left[\frac{J}{J_N} \right]^2 = \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 = \frac{\sum_{n=1}^m I_n^2}{I_N^2} \quad (3.33)$$

I_N = corrente nominal do transformador.

De (3.25) e (3.27) obtém-se:

$$\begin{aligned} P_{EC} &= k_1 A \sum_{n=1}^m n^2 J_n^2 \\ &= k_1 A J_N^2 \sum_{n=1}^m n^2 \left(\frac{J_n}{J_N} \right)^2 = P_{ECN} \sum_{n=1}^m n^2 \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.34)$$

Conseqüentemente,

$$\frac{P_{EC}}{P_{JN}} = \frac{P_{ECN}}{P_{JN}} \sum_{n=1}^m n^2 \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \quad (3.35)$$

Portanto:

$$P_{ECnorma} = P_{ECN} \sum_{n=1}^m n^2 \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \quad (3.36)$$

Assim, a expressão 3.36 fornece o cálculo das perdas por correntes parasitas no enrolamento em função da ordem e da distorção harmônica total da corrente. Esta expressão também é recomendada pela norma ANSI/IEEE para o cálculo das perdas citadas. No entanto, estes cálculos não levam em conta a geometria dos condutores e implicam necessariamente na obtenção de valores

conservativos de perdas, vida útil e “derating” (reduções no carregamento do equipamento na frequência fundamental).

3.2.3.4 –Cálculo das Perdas por Correntes Parasitas Corrigidas

Para complementar os aspectos do item anterior, esta metodologia alternativa, mais precisa, segue na direção de determinar as perdas em cargas por correntes parasitas. As referências [5], [29] e [30] mostram a metodologia de cálculo.

Assim, as perdas são determinadas pela equação (3.37).

$$P_{EC} = \mu_o w . H^2 F(\xi) \quad (3.37)$$

Sendo:

$$F(\xi) = \frac{1}{\xi} \frac{\sinh \xi - \xi \cosh \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \quad (3.38)$$

$$\xi = \frac{\tau}{\delta} \quad \text{razão entre largura e profundidade;}$$

$$\tau \quad \text{largura da seção do condutor perpendicular ao vetor H;}$$

$$\delta = \frac{\delta_N}{\sqrt{n}} \quad \text{profundidade da penetração da frequência harmônica, nf;}$$

$$\delta_N = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_o f}} \quad \text{profundidade da penetração da frequência f.}$$

$$\xi_n = \frac{\tau}{\delta} \quad (3.39)$$

Escrevendo agora para P_{EC} em função da corrente, (3.37) torna-se:

$$P_{EC} = k_2 \cdot f \cdot F(\xi) \cdot I^2 ; \quad k_2 = 2\pi\mu_o k_H^2 \quad (3.40)$$

No caso geral para corrente não senoidal, tem-se que:

$$P_{EC} = k_2 \cdot f \sum F(\xi_n) n \cdot I_n^2 \quad (3.41)$$

Normalizando (3.41) em relação às perdas por correntes parasitas em condições nominais, obtém-se:

$$\frac{P_{EC}}{P_{ECN}} = \frac{\sum_{n=1}^m F(\xi_n) n \cdot I_n^2}{F(\xi_N) I_N^2} \quad (3.42)$$

Ou

$$\frac{P_{EC}}{P_{JN}} = \frac{P_{ECN}}{P_{JN}} \frac{\sum_{n=1}^m F(\xi_n) n \cdot I_n^2}{F(\xi_N) I_N^2} \quad (3.43)$$

Portanto,

$$P_{EC\text{corrigido}} = P_{ECN} \frac{\sum_{n=1}^m F(\xi_n) n \cdot I_n^2}{F(\xi_N) I_N^2} \quad (3.44)$$

A título de ilustração, a figura 3.5 mostra o comportamento das perdas por correntes parasitas no enrolamento calculadas pelas duas metodologias apresentadas anteriormente, em função das distorções harmônicas totais de corrente (equações 3.36 e 3.44).

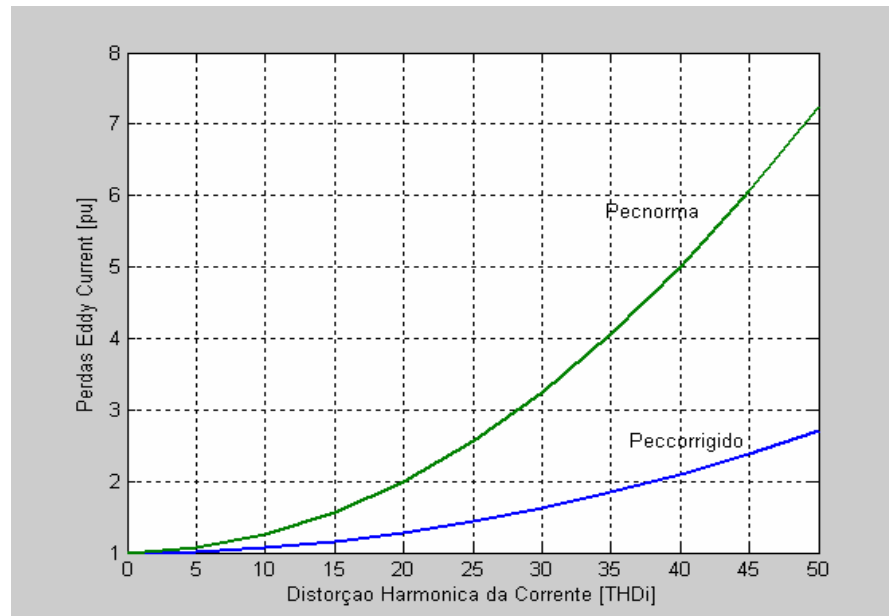


Figura 3.5 – Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos $P_{ECnorma}$ e $P_{ECcorrigido}$ em função da distorção harmônica total da corrente.

Da figura 3.5 observa-se que, para distorções até 5% os aumentos das perdas “eddy current” são insignificantes, no entanto, para distorções acima de 10%, estas tendem a aumentar consideravelmente para ambos os casos.

3.3 – MODELO TÉRMICO

O funcionamento de um transformador sob condições não ideais de suprimentos pode resultar em elevações das perdas e subseqüentes impactos sobre a temperatura e vida útil do mesmo, surgindo a necessidade de maiores investigações entre tais efeitos.

Estar atento aos problemas de qualidade do suprimento, dimensionar o transformador mais adequadamente à aplicação desejada, evitando o sobredimensionamento dos dispositivos, constitui-se em questões de importância significativa na área e que resulta conseqüentemente na economia do consumo energético.

Tais observações devem-se ao fato de que uma das principais causas de queima de transformadores é, basicamente a ruptura do isolamento dos enrolamentos. Esta ruptura é consequência direta da degradação térmica do isolamento das bobinas com subsequente curto-circuito devido, principalmente, ao sobreaquecimento dos condutores.

O aumento substancial das perdas geradas internamente ao transformador, sob operação adversa da nominal, contribui, de forma significativa para o fenômeno térmico provocado.

Quando um transformador excede seus limites térmicos, vários fenômenos indesejáveis ocorrem, dentre eles pode-se citar: a aceleração do processo de oxidação dos materiais isolantes, perdas das propriedades do dielétrico, degradação do óleo isolante, envelhecimento do papel isolante, etc.

Neste sentido, fica evidenciado a necessidade de se manter a temperatura do transformador dentro dos limites pré-estabelecidos impostos pelas características do isolante.

Com vistas a determinar as temperaturas de um transformador, duas técnicas se fazem presentes, que são descritas a seguir.

A primeira e mais exata, consiste na medição direta da temperatura do transformador através de sensores de temperatura instalados em diversos pontos dos enrolamentos [18].

Uma outra técnica consiste na estimativa indireta das temperaturas do transformador através do emprego de modelos térmicos. Embora seja uma estratégia atrativa sob o ponto de vista da implementação, a mesma não

permite uma avaliação detalhada da distribuição das temperaturas internas do mesmo, principalmente aquela do ponto mais quente. Embora reconheça tais limitações, a mesma tem sido a alternativa mais empregada em estudos térmicos de máquinas elétricas .

Para a estimativa das temperaturas de qualquer equipamento elétrico, emprega-se, normalmente, duas estratégias para o circuito térmico equivalente. A primeira estratégia utiliza modelos fundamentados em técnicas numéricas, a exemplo de elementos finitos [23] e, a segunda alternativa, emprega a representação através de parâmetros concentrados [18].

Para o primeiro caso, torna-se possível mapear a distribuição de temperatura ao longo de todo equipamento e, com isso, conhecer os pontos mais quentes. Na segunda alternativa usando modelo a parâmetros concentrados, cada elemento de interesse do transformador é representado por parâmetros térmicos apropriados e a temperatura obtida traduz um valor médio e não valores pontuais.

Este trabalho, não tem por meta desenvolver ou propor um novo modelo térmico para os estudos de um transformador, assunto este que por si só, seria suficiente para uma pesquisa que foge dos objetivos desta dissertação.

Desta forma, o modelo clássico de primeira ordem é utilizado. O transformador é considerado como sendo um corpo homogêneo, e a temperatura obtida é aquela associada ao enrolamento. Independentemente do grau de complexidade do modelo térmico, pode-se reconhecer que as diferentes estruturas convencionalmente propostas e utilizadas pela literatura, reúnem num circuito equivalente fontes de calor e parâmetros térmicos representativos dos processos de armazenamento e transmissão de calor. Estes elementos são [18]:

Resistência ou Condutância Térmica: Este parâmetro traduz a facilidade ou não com que se processa a transferência de calor através de duas superfícies distintas com temperaturas diferentes. O seu valor depende do material constituinte do meio, das dimensões físicas, etc.

Capacitância Térmica: O conceito de capacitância térmica está atrelado a capacidade de armazenamento de calor por um dado corpo físico. Este permite avaliar o tempo necessário para que o corpo físico promova qualquer alteração em sua temperatura interna.

Fontes de Calor: Estas representam as diversas parcelas de perdas que ocorrem internamente no transformador. Diante do exposto e com vistas a determinação das características térmicas necessárias a análise do transformador, apresenta-se, o modelo térmico clássico comumente empregado e aplicável aos estudos aqui pretendidos.

3.4 – MODELO TÉRMICO CLÁSSICO – ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR.

São apresentados e disponíveis na literatura modelos térmicos para transformadores com objetivo de prever as elevações de temperatura nas diversas partes constituintes do transformador [8]. Pode-se observar que, esta tarefa não é simples, principalmente devido ao fato de que o processo de transferência de calor ocorre de forma distribuída entre as várias superfícies do transformador. Além deste fato, a geometria complexa e a diversidade dos materiais que constituem o transformador contribuem de igual forma, para as dificuldades destacadas para a determinação dos parâmetros térmicos do modelo.

Com vistas a buscar uma simplicidade de cálculo ainda maior, sem grandes prejuízos da precisão, a literatura sugere o modelo térmico clássico. Este é também conhecido como um sistema de primeira ordem, por ser regido por uma única equação diferencial. Este método permite avaliar a elevação da temperatura do enrolamento em relação à temperatura ambiente.

A figura 3.6 mostra o circuito térmico supracitado [8]:

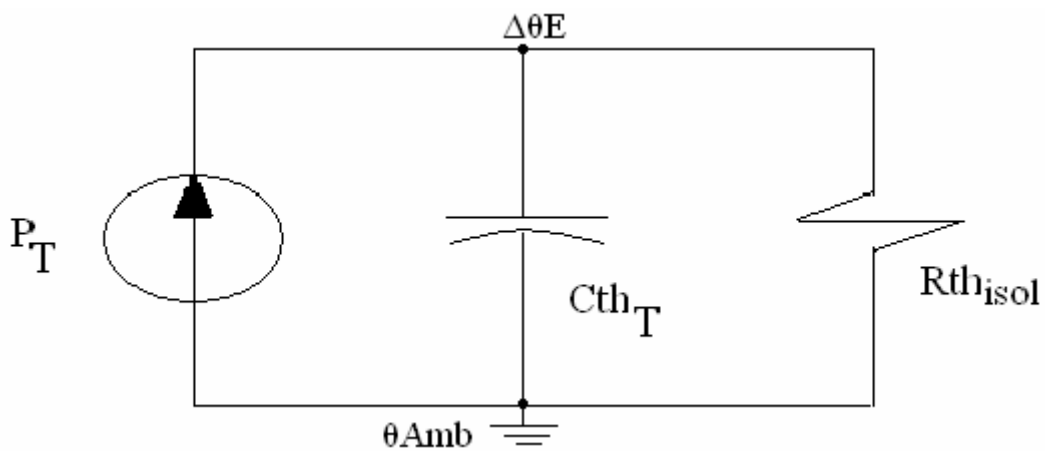


Figura 3.6 - Circuito térmico de primeira ordem (clássico) do transformador.

Ao examinar a figura constata-se que a elevação da temperatura do enrolamento é consequência da transferência de todo calor gerado internamente no transformador para o ambiente.

Em outras palavras, o transformador é visto como sendo um corpo homogêneo, tendo a mesma temperatura em todas as suas partes.

A equação diferencial aplicada ao modelo térmico de primeira ordem é apresentada pela equação (3.45):

$$P_T = C_{th_T} \frac{d\Delta\theta_E}{dt} + \frac{\Delta\theta_E}{R_{th_{isol}}} \quad (3.45)$$

Em que :

P_T = perdas totais em Watts;

C_{thT} = capacitância térmica equivalente do transformador em Wh/°C;

R_{thisol} = resistência térmica da isolação em °C/W;

$\Delta\theta_E$ = elevação de temperatura do enrolamento em °C;

θ_{Amb} = Temperatura ambiente em °C;

A solução desta equação diferencial conduz a:

$$\Delta\theta_E = P_T \cdot R_{thisol} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{thisol} C_{thT}}} \right) + \Delta\theta_{Eo} \left(e^{-\frac{\Delta t}{R_{thisol} C_{thT}}} \right) \quad (3.46)$$

Sendo a constante de tempo térmica T_{th} (em horas), dada por:

$$T_{th} = R_{thisol} C_{thT} \quad (3.47)$$

Então:

$$\Delta\theta_E = P_T \cdot R_{thisol} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{th}}} \right) + \Delta\theta_{Eo} \left(e^{-\frac{\Delta t}{T_{th}}} \right) \quad (3.48)$$

Fazendo:

$$R_{thisol} = \frac{\Delta\theta_{ef}}{P_T} \quad (3.49)$$

Sendo:

$\Delta\theta_{ef}$ = máxima elevação de temperatura permitida pela classe de

isolamento.

Para o cálculo das capacidades térmicas, faz-se necessário o conhecimento da massa dos elementos em estudo, no caso de todo o transformador.

Utilizando-se de parâmetros disponibilizados pelos fabricantes, qual seja, a constante térmica do transformador pode-se com facilidade, determinar a capacidade térmica equivalente do mesmo.

a) Cálculo da Resistência Térmica da isolação pela Classe de Isolação.

De acordo com a elevação da temperatura máxima da isolação, pode-se calcular através das perdas totais a resistência térmica da isolação, tomando-se como base a equação (3.50).

$$R_{thisol} = \frac{\Delta\theta_{isol}}{P_{JNT} + P_o} \quad (3.50)$$

Sendo:

$P_o + P_{JNT}$ = perdas totais;

R_{thisol} = resistência térmica da isolação;

b) Cálculo da Capacitância Térmica

De uma forma geral, a determinação da capacidade térmica é feita empregando-se equações fundamentadas na expressão (3.53):

$$CthT = m_{cu} ce_{cu} + m_{fe} ce_{fe} \quad (3.51)$$

Então:

$$CthT = Cth_{cu} + Cth_{fe} \quad (3.52)$$

Em que:

m_{cu} = massa do cobre, em kg;

m_{fe} = massa do ferro, em kg;

Ce_{cu} = calor específico do cobre, em Wh /°C;

Ce_{fe} = calor específico da chapa de silício, em Wh/°C;

Cth_{cu} = $m_{cu} \times ce_{cu}$ (capacitância térmica do cobre), em Whkg/°C;

Cth_{fe} = $m_{fe} \times ce_{fe}$ (capacitância térmica da chapa de silício), em Whkg/°C;

$CthT$ = capacitância térmica tota, em Whkg/°C.

3.5 – CÁLCULO DO EFEITO DE HARMÔNICOS NA VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR

Este item tem por objetivo estimar a vida útil de transformadores quando estes estão alimentando cargas não lineares. Na busca deste objetivo duas estratégias serão consideradas.

A primeira baseada na metodologia apresentada pela norma ANSI/IEEE, enquanto que a segunda estratégia foi desenvolvida e apresentada nos itens anteriores deste capítulo.

3.5.1 – Estimativa de Vida Útil (EVu) em função de P_{EC} Sob Condições não Senoidais pela metodologia da Norma ANSI/IEEE.

A vida útil do transformador pode ser estimada, tomando-se como base a equação (3.53), que foi apresentada no capítulo anterior como equação (2.4).

$$EVu_{norma} = EVu_{nom} e^{-\left(\frac{E}{K}\right)\left(\frac{\Delta\theta_{norma}}{\theta_{nom}(\theta_{nom} + \Delta\theta_{norma})}\right)} \quad (3.53)$$

O cálculo das perdas totais e a estimativa do incremento na temperatura do ponto mais quente do transformador, devido a circulação das correntes harmônicas, são determinados, respectivamente pelas equações (3.54) e (3.55), conforme mostrado:

$$P_{nT} = P_{Jn} + P_{ECnorma} + P_{Hn} + P_{Fn} \quad (3.54)$$

e

$$\Delta\theta_{norma} = \theta_{isol} \left[\left(\frac{P_{nT}}{P_{NT}} \right) - 1 \right] \quad (3.55)$$

3.5.2 – Estimativa de Vida Útil (EVu) em função de P_{EC} Sob Condições não Senoidais pela metodologia de correção do P_{EC} .

Analogamente, ao procedimento do item anterior, tem-se as equações (3.56), (3.57) e (3.58), as quais estimam os valores da vida útil, das perdas totais e das elevações de temperatura do transformador, respectivamente.

$$EVu_{corrigido} = EVu_{nom} e^{-\left(\frac{E}{K}\right) \left(\frac{\Delta\theta_{corrigido}}{\theta_{nom}(\theta_{nom} + \Delta\theta_{corrigido})} \right)} \quad (3.56)$$

$$P_{nTcorrigido} = P_{Jn} + P_{ECcorrigida} + P_{Hn} + P_{Fn} \quad (3.57)$$

$$\Delta\theta_{corrigido} = \theta_{isol} \left[\left(\frac{P_{nTcorrigido}}{P_{NT}} \right) - 1 \right] \quad (3.58)$$

A título de ilustração, a figura (3.7), mostra a redução na vida útil dos transformadores em função das distorções harmônicas de corrente, considerando as duas metodologias:

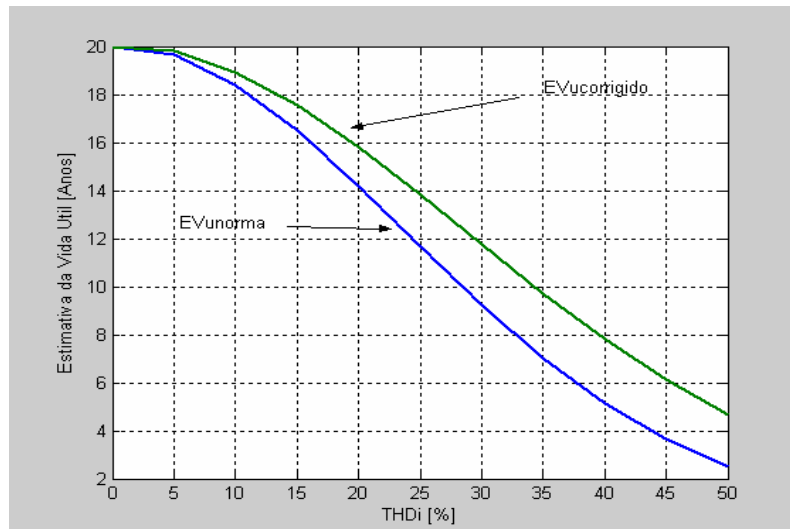


Figura 3.7 – Estimativa da Vida Útil - Comparação Norma x Corrigida

Observa-se que há uma redução de vida útil mais acentuada, quando utiliza-se a metodologia baseada na norma ANSI/IEEE. Tomando-se como base uma distorção harmônica de corrente igual a 25%, a estimativa da vida útil foi de aproximadamente de 12 anos, quando utilizou-se a metodologia da norma. Por outro lado, a estimativa da vida útil foi de 14 anos, com a estratégia alternativa apresentada nos itens anteriores.

3.6 – PROCEDIMENTO PARA A REDUÇÃO DO CARREGAMENTO NOMINAL (“DERATING”) DE TRANSFORMADORES SUPRINDO CARGAS NÃO LINEARES.

Sabe-se que atualmente os transformadores estão sendo gradualmente carregados com cargas não lineares. Estas condições exigem providências para aliviar o carregamento máximo admissível do transformador (“derating”), para não haver comprometimento das características nominais projetadas.

Neste sentido, a referência [3] estabelece os critérios e procedimentos básicos para a especificação de transformadores alimentando cargas não lineares, de

modo que não haja redução na sua vida útil. Assim, a ANSI/IEEE C57. 110-1986, sofreu uma atualização em março 1998 e o denominado fator K definido no documento de 1986 foi substituído por um novo parâmetro denominado de fator de perdas harmônico [3]. Esta grandeza adimensional é utilizada para que se possa calcular o máximo valor de corrente que pode circular pelo transformador com a preservação de sua vida útil.

Além desta metodologia, este item apresenta uma estratégia alternativa objetivando complementar a referência citada, e desta forma realizar uma comparação entre as duas alternativas.

3.6.1 – Estimativa do Fator de Perdas Harmônicas - F_{HL}

O fator de perda harmônico, definido em [3] como F_{HL} , é calculado substituindo-se as equações (3.32) e (3.34) em (3.30), e apresentada pelas equações (3.59), (3.60), (3.61) e (3.62).

$$\frac{P_c}{P_{JN}} = \frac{\sum_{n=1}^m I_n^2}{I_N^2} \left[1 + \frac{P_{ECN}}{P_{JN}} \frac{\sum_{n=1}^m n^2 I_n^2}{\sum_{n=1}^m I_n^2} \right] \quad (3.59)$$

ou

$$P_C(pu) = I^2(pu) [1 + P_{ECN}(pu) F_{HLnorma}] \quad (3.60)$$

Em que

$$I_{(pu)}^2 = \sum_{n=1}^m \frac{I_n^2}{I_N^2} \quad (3.61)$$

$$F_{HLnorma} = \frac{\sum_{n=1}^m n^2 I_n^2}{\sum_{n=1}^m I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^m n^2 \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}{\sum_{n=1}^m \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (3.62)$$

Sob condições de corrente senoidais e nominais tem-se que $I(pu) = 1$ e $F_{HLnorma} = 1$ e as perdas específicas no ponto mais quente dos enrolamentos do transformador é dada por [3], e apresentada pela equação (3.63).

$$P_C(pu) = 1 + P_{ECN}(pu) = P_{CN}(pu) \quad (3.63)$$

Se a corrente é não senoidal o fator $F_{HLnorma}$ pode ser maior que 1 e as perdas no ponto mais quente $P_C(pu)$ pode, exceder o valor nominal $P_{CN}(pu)$ até mesmo quando $I(pu)$ é inferior a 1.

Nestas condições, a perdas harmônicas para a condição não senoidal é dada por:

$$P_{CN}(pu) = I_{\max}^2(pu) \cdot [1 + P_{ECN}(pu) \cdot F_{HLnorma}] \quad (3.64)$$

Após algumas manipulações matemáticas na equação acima, obtém-se o máximo valor de corrente que pode circular pelo transformador com a preservação de sua vida útil.

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{CN}(pu)}{1 + P_{ECN}(pu) \cdot F_{HLnorma}}} \quad (3.65)$$

Este método é recomendado para transformadores de tipo a seco. Entretanto, é possível verificar que tal recomendação pode levar a resultados muito conservativos dependendo das dimensões dos condutores [5,16].

Os resultados experimentais mostraram que, para baixas frequências harmônicas, esta metodologia convencional apresenta resultados compatíveis com aqueles encontrados nas medições, objeto de estudo no capítulo IV.

Entretanto para frequências harmônicas maiores, os erros encontrados são bastante significativos. Isto se deve fundamentalmente à dificuldade de se distinguir as perdas por correntes parasitas das outras perdas provocadas pelo fluxo de dispersão, e que são menos sensíveis à variação da frequência.

A metodologia convencional não faz esta distinção e admite que as perdas suplementares globais variam indistintamente com o quadrado da frequência.

Tal fato provoca resultados pessimistas no cálculo do aumento das perdas no cobre devido a harmônicas [5].

A meta desta avaliação é enfatizar o fato de que para médios e grandes transformadores obtém-se um resultado conservador.

3.6.2 – Estimativa do Fator de Perdas Harmônicas Corrigido - $F_{HL\text{corrigido}}$

A determinação do fator de perdas harmônicas pode ser calculado, retomando

a equação (3.59) e inserindo o fator de correção $\frac{\sum_{n=1}^m F(\xi_n)}{F(\xi_N)}$. Assim,

$$\frac{P_C}{P_{JN}} = \frac{\sum_{n=1}^m I_n^2}{I_N^2} \left[1 + \frac{P_{ECN}}{P_{JN}} \frac{\frac{\sum_{n=1}^m F(\xi_n)}{F(\xi_N)} n I_n^2}{\sum_{n=1}^m I_n^2} \right] \quad (3.66)$$

Em que:

$$P_C(pu) = I^2(pu) \left[1 + P_{ECN}(pu) \frac{\sum_{n=1}^m \left(\frac{F(\xi_n)}{F(\xi_N)} \right) n I_n^2}{\sum_{n=1}^m I_n^2} \right] \quad (3.67)$$

Então,

$$F_{HLcorrigido} = \frac{\sum_{n=1}^m n \left(\frac{F(\xi_n)}{F(\xi_N)} \right) \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}{\sum_{n=1}^m \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (3.68)$$

Deve-se esclarecer que, na definição do parâmetro $F_{HLnorma}$, proposto pela norma ANSI/IEEE, as correntes harmônicas são multiplicadas pelo quadrado da respectiva ordem harmônica. Enquanto que, na formulação corrigida $F_{HLcorrigido}$, as correntes são multiplicadas pelo fator $nF(\xi_n)/F(\xi_N)$.

Para ilustrar a importância do método corrigido em relação ao apresentado pela norma, a figura 3.8 apresenta o gráfico da função $nF(\xi_h)/F(\xi_N)$ para uma ordem harmônica qualquer n . Os condutores de cobre estão a uma temperatura de 90 °C, e imersos em campos magnéticos alternados com 60 Hz de frequência fundamental. O gráfico apresenta uma família de curvas em função de diversas largura de condutores, ou seja: 3, 4, 6, 8 e 12 mm, para mostrar a influência do referido parâmetro na metodologia proposta.

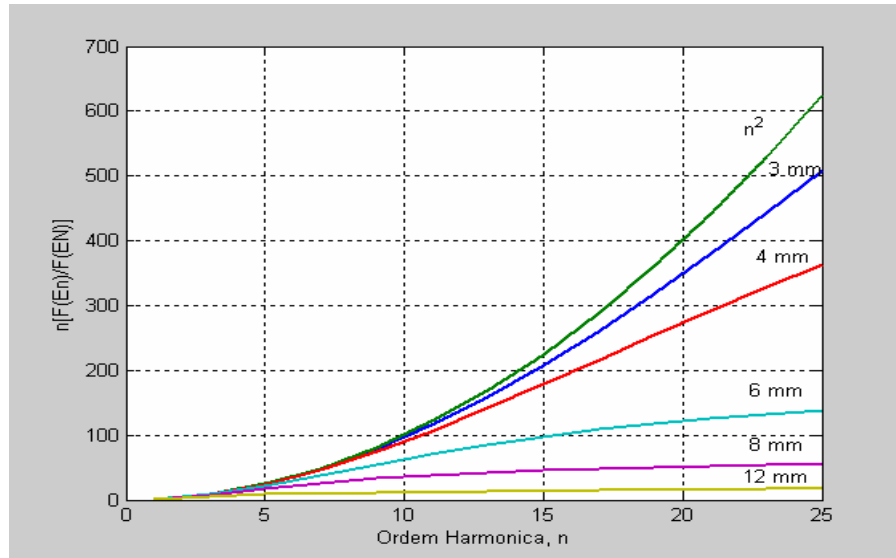


Figura 3.8 - Gráfico $nF(\xi_n)/F(\xi_N)$ em função da ordem harmônica n , com variações da largura dos condutores.

Com base na figura 3.8, observa-se que pela metodologia da norma, os resultados são razoáveis para ordens harmônicas entre 1 a 20, quando a largura dos condutores dos transformadores são inferiores a 3mm. Para larguras maiores a discrepância é significativa. Por exemplo, se a largura é de 6mm, diferenças significativas são mostradas para ordens harmônicas superiores a sete, e para larguras iguais a 12 mm os erros tornam-se acentuados a partir da terceira harmônica.

A expressão para o cálculo do “derating” está baseado na equação (3.64). Substituindo-se o fator de perdas harmônicas definido na norma pelo Fator de perdas harmônicas corrigido tem-se que:

$$P_{CN}(pu) = I_{\max}^2(pu) \cdot [1 + P_{ECN}(pu) \cdot F_{HL\text{corrigido}}] \quad (3.69)$$

De (3.69) resulta em um novo $I_{\max(pu)}$, dado por:

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{CN}(pu)}{1 + P_{ECN}(pu) \cdot F_{HL\text{corrigido}}}} \quad (3.70)$$

Portanto, através da substituição da equação (3.65) pela equação (3.70), tem-se uma outra possibilidade de carregamento do transformador (“derating”), visando a preservação da vida útil do equipamento.

Para uma maior compreensão, a figura 3.9 mostra o comportamento do “derating” de um transformador em função das variações das distorções harmônicas usando as duas metodologias. A largura do condutor considerado na situação foi de 12mm. A estratégia foi realizar uma comparação entre os valores da corrente máxima obtido pela metodologia apresentada pela referência [3] e aqueles oriundos da metodologia alternativa apresentada neste item.

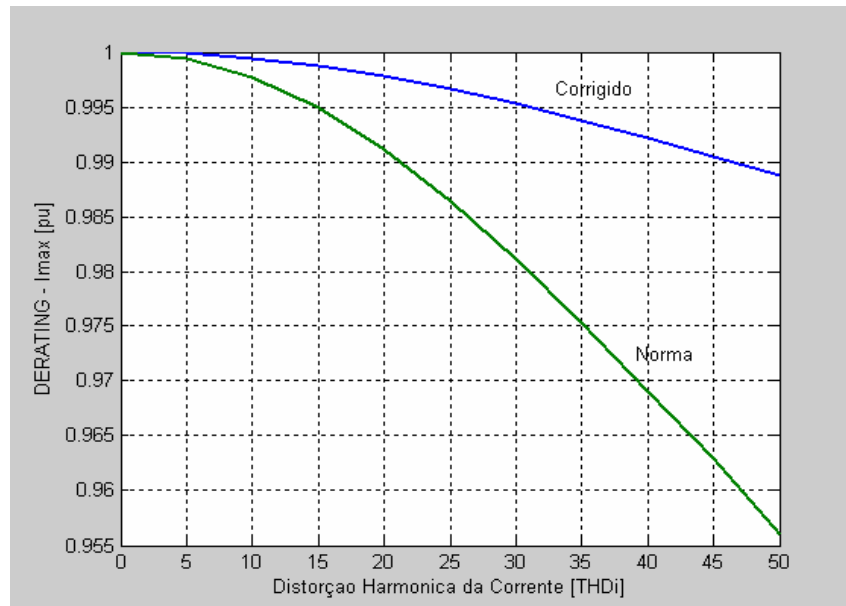


Figura 3.9 – “Derating” – norma e corrigido em função do THDi

Observa-se da figura 3.9 que há uma redução no carregamento do transformador mais acentuada, quando utiliza-se a metodologia baseada na norma ANSI/IEEE. Tomando-se como base uma distorção harmônica de corrente igual a 25%, o carregamento imposto ao equipamento foi de 98%,

ou seja um “derating” de 2%. Por outro lado para as mesmas condições de distorções harmônicas impostas, a redução no carregamento foi de 99,5%, ou seja um “derating” de 0,5%, com a estratégia alternativa apresentada neste item.

3.7 – EFEITO DE HARMÔNICOS NO RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR

Sabe-se que a relação existente entre as potências ativas nos enrolamentos secundário $P(s)$ e o primário $P(p)$, expressa o rendimento de um transformador, ou seja:

$$\eta = \frac{P(s)}{P(p)} \quad (3.71)$$

Ou em porcentagem [33]:

$$\eta = \frac{P(s)}{P(p)} \times 100 \quad (3.72)$$

Na maioria das máquinas, para se determinar o rendimento, bastaria medir a potencia de entrada e de saída e substituí-las nas expressões (3.71) ou (3.72).

No caso de transformador, é necessário o uso de um processo indireto, pois, para estes, o rendimento pode chegar até 99% e, nessas condições, a diferença das potências de entrada e saída é muito pequena, muitas vezes superando a classe de precisão dos instrumentos de medida. Para contornar esse problema, propõe-se a utilização da equação (3.73):

$$P_p = P_s + P_J + P_{EC} + P_{HF} \quad (3.73)$$

Em virtude das interferências harmônicas na rede deve-se levar em consideração estas distorções, utilizando-se uma nova equação:

$$P_n(p) = P_n(s) + P_{Jn} + P_{ECnorma} + P_{Hn} + P_{Fn} \quad (3.74)$$

Em que:

$P_n(p)$ = potência de entrada no primário com distorção harmônica;

$P_n(s)$ = potência de saída no secundário com distorção harmônica;

P_{Jn} = perdas nos enrolamentos com distorção harmônica;

$P_{ECnorma}$ = perdas “eddy currents”, com distorção harmônica;

P_{Hn} = perdas por histerese com distorção harmônica;

P_{Fn} = perdas por corrente de Foucault com distorção harmônica.

3.7.1 - Rendimento (η) em função de P_{EC} Norma Sob Condições não Senoidais

O rendimento do transformador operando sob condições de suprimento não senoidal e com carregamento não linear, pode ser estimado com base na equação:

$$\eta\% = \frac{\sum \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi_n}{\sum \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi_n + P_{JN} [1 + (THDi)^2] + P_{ECN} \sum n^2 \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 + P_{Hn} + P_{Fn}} \cdot 100 \quad (3.75)$$

3.7.2 - Rendimento (η) em função de P_{EC} Corrigido Sob Condições não Senoidais

Analogamente, tem-se o rendimento do transformador, tomando-se como base a estratégia desenvolvida anteriormente (método corrigido).

$$\eta\% = \frac{\sum \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi_n}{\sum \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi_n + P_{JN} \cdot [1 + (THDi)^2] + P_{ECN} \frac{\sum_{n=1} F(\xi_n) n I_n^2}{F(\xi_N) I_N^2} + P_{Hn} + P_{Fn}} \cdot 100 \quad (3.76)$$

Usando as expressões (3.75) e (3.76), a figura 3.10 mostra resultados para comparação entre o rendimento de um transformador em função das distorções harmônicas totais de corrente, com as duas metodologias de cálculo apresentadas anteriormente.

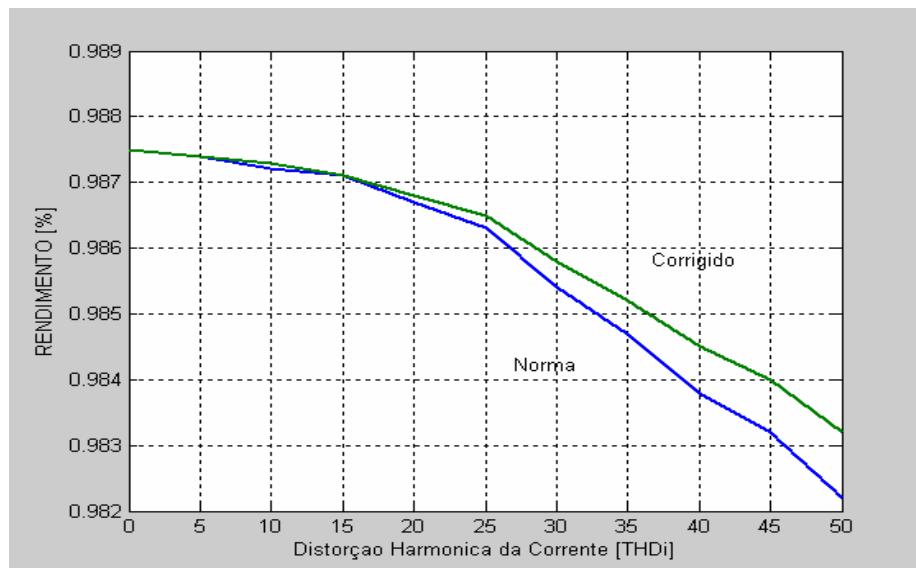


Figura 3.10 – Comparativo rendimento norma x corrigido

Observa-se da figura 3.10 que há uma redução no rendimento do transformador mais acentuada, quando utiliza-se a metodologia baseada na norma ANSI/IEEE.

3.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como principal objetivo analisar o comportamento térmico do transformador operando em condições de carregamento não linear e verificar. Inicialmente, mostra-se as expressões das perdas a vazio e perdas em carga com o transformador submetido a distorções de tensão e/ou corrente.

Fez-se um estudo das perdas por correntes parasitas onde através da comparação das perdas pela metodologia da norma ANSI/IEEE e outra alternativa corrigida e proposta em [5] e [32], pode-se obter um melhor resultado com a condição corrigida, podendo em alguns casos ser desprezada.

É admitido que as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador é proporcional ao quadrado da frequência, valido somente para pequenos transformadores usando condutores cuja dimensão é menor do que 3 mm.

Para transformadores com condutores mais largos, o método pode com a metodologia dada pela norma, conduzir a resultados conservativos.

Na prática o ponto quente é localizado no enrolamento da baixa tensão, próximo a parte superior da cabeça da bobina. A localização do condutor na área é mostrado na inclinação do vetor campo magnético com duas componentes, uma axial H_x , e uma componente radial H_r . As perdas de correntes parasitas é a contribuição das duas componentes. Nos transformadores típicos, na vizinhança do ponto quente é dado por $0,1 < H_r/H_x < 0,5$, entretanto a relação entre os lados dos condutores se encontra na faixa de $1 \leq g/\tau < 15$.

Esta situação requer o cálculo de um fator de perda harmônica equivalente que retrata para ambos os casos, axial e radial as perdas por correntes parasitas. Para largura de transformadores maiores, a semelhança exata computacional será a garantia. Entretanto, para a implementação destes cálculos, o conhecimento dos valores τ e g é imprescindível e será bom no raio de H_r/H_x .

A capacidade para pequenas unidades construídas com condutores com dimensões máximas menores que 3 mm, pode ser determinado usando o método corrigido.

Com vista a buscar uma simplicidade de cálculo, adotou-se o modelo térmico clássico para o estudo.

Ilustrou-se o fator de perdas harmônico pela metodologia utilizada pela norma e o comparou com o fator de perda harmônico corrigido alternativo, que conduz a uma avaliação mais precisa da capacidade do transformador para operar quando abastecer correntes com carregamento não senoidal (“derating”).

Finalmente apresentou-se um novo conceito de rendimento e vida útil, considerando-se o efeito de harmônicos na obtenção do rendimento e vida útil da isolação do transformador, através da influência das perdas por correntes parasitas no enrolamento.

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para se avaliar o impacto causado no aquecimento de transformadores, quando estes se encontram submetidos a formas de onda de tensão e/ou correntes distorcidas, utilizou-se o recurso da informática, com a escolha do simulador Matlab, que se constituiu em uma base computacional que oferece uma variada biblioteca de recursos.

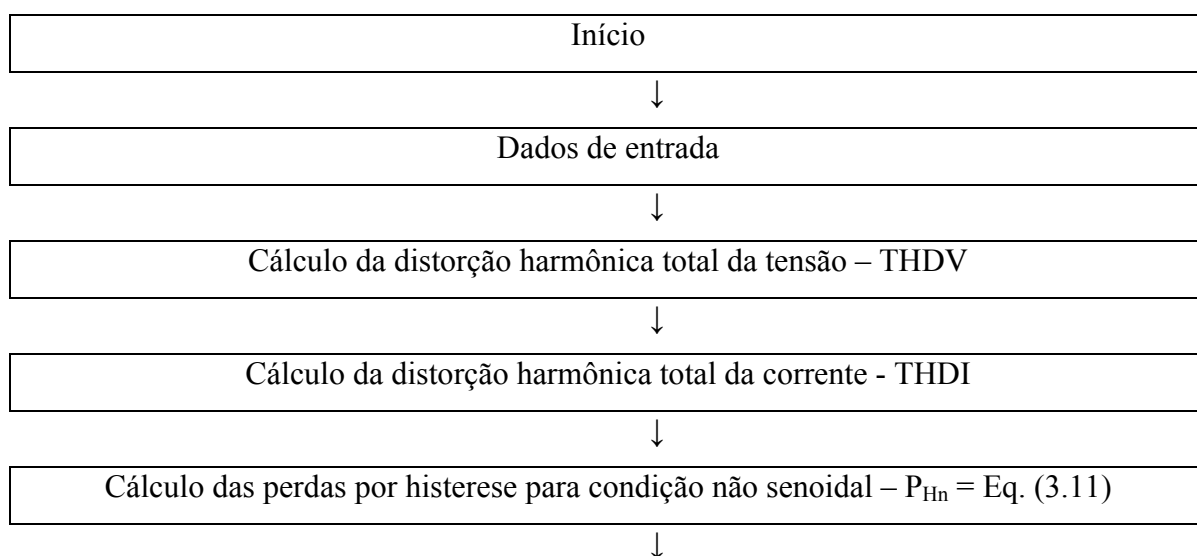
Além disso, possui linguagem versátil e de fácil programação, bem como, tratamento gráfico dos sinais gerados com facilidade apreciável. Com esta ferramenta tornou-se possível simular e avaliar o carregamento de transformadores utilizando a modelagem clássica desenvolvida no capítulo III.

Neste sentido, o programa permite analisar termicamente o transformador, nas mais variadas condições de carga e ou alimentação.

O procedimento empregado para a investigação do desempenho térmico, baseia-se em uma modelagem em regime permanente, utilizando-se de tratamento trifásico, com as fases independentemente representadas tanto para os transformadores, como para as cargas geradoras de harmônicos.

4.2 – INFORMAÇÕES CONTIDAS NO PROGRAMA

O fluxograma do programa desenvolvido é indicada na figura 4.1.



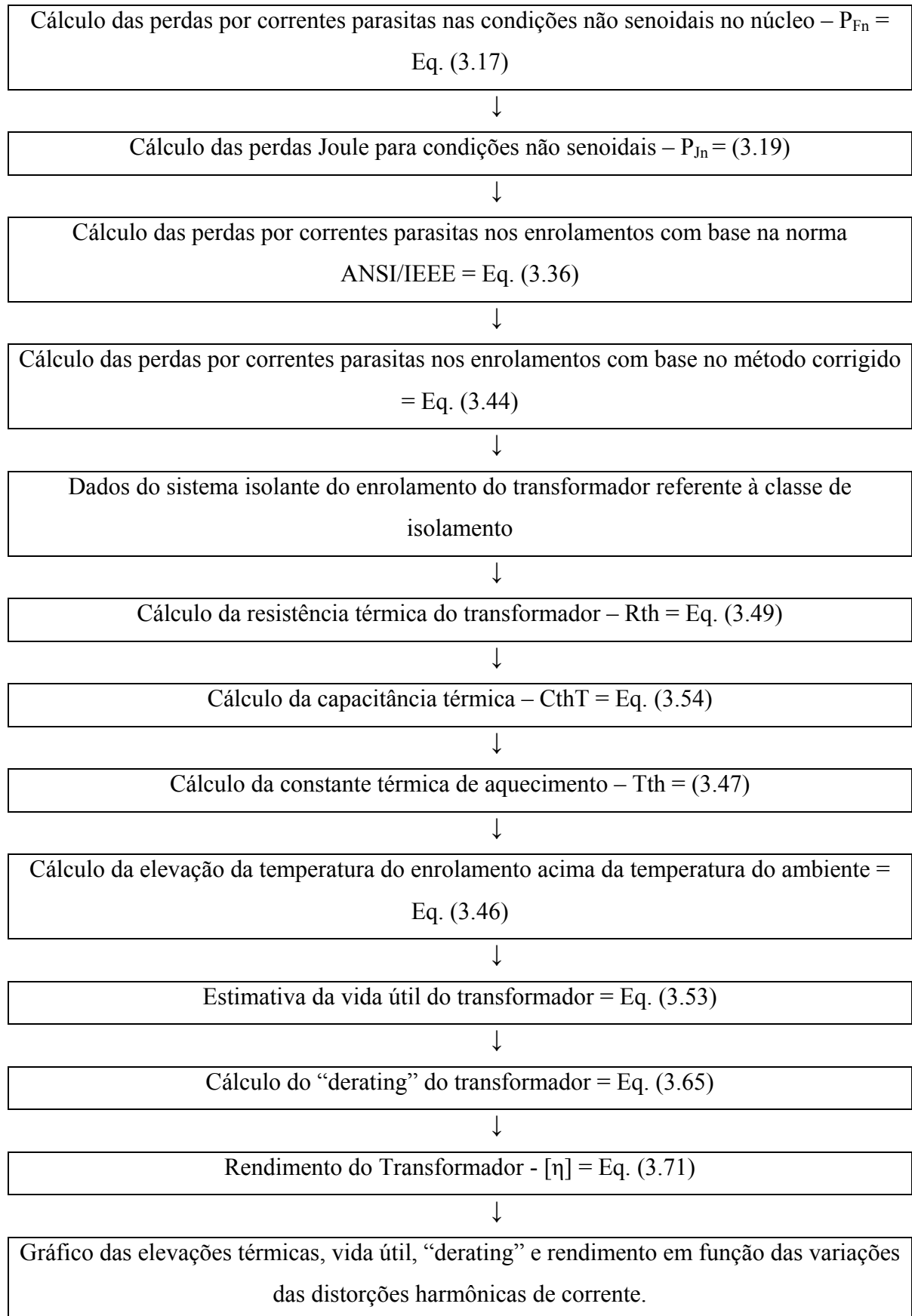


Figura 4.1 – Diagrama de blocos representativos do programa digital desenvolvido.

4.3 – ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Com o programa desenvolvido, diversos casos foram simulados e alguns resultados são descritos e discutidos a seguir. Embora o programa permita analisar qualquer transformador sobre quaisquer condições de carga e ou alimentação, a análise foi realizada em um transformador de força a seco com as características definidas na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Parâmetros característicos do transformador a seco e dados básicos utilizado na simulação.

Potência nominal do transformador	S_N [kVA]	1000
Frequência nominal do sistema	f [Hz]	60
Tensão nominal primário	V_{N1} [V]	13800
Tensão nominal secundário	V_{N2} [V]	380
Impedância percentual	Z [%]	6
Perdas por Histerese nominal	P_{HN} [W]	1250
Perdas por correntes parasitas nominais	P_{FN} [W]	1250
Perdas Joules nominais	P_{JN} [W]	10000
Perdas por correntes parasitas na frequência nominal	P_{ECN} [W]	200
Temperatura ambiente	θ_a [°C]	30
Espessura da chapa do núcleo	Δ [m]	0.0003
Permeabilidade magnética do núcleo	μ [H/m]	0.0063
Condutividade térmica do núcleo magnético	γ [$\Omega \cdot m$]	10^7
Expoente de Steinmetz	s	2
Tempo de funcionamento	T [horas]	24
Classe de isolamento e temperatura máxima admissível	F	155
Largura do condutor	τ [mm]	12
Estimativa de vida útil	EVu[anos]	20

4.4 – CASOS ANALISADOS

Com o programa desenvolvido, diversos casos (1, 2, 3, 4, 5, e 6) foram simulados e algumas condições impostas são descritos a seguir de acordo com a tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características dos dados básicos dos casos (1, 2, 3, 4, 5, e 6) utilizados na simulação.

Caso	Descrição	Distorção Total da tensão THDV [%]	Distorção Total da corrente THDI [%]	Perdas Adicionais (P_{EC1}) [%]	Largura do condutor τ [mm]
1	Carga linear	0	0	2	12
2	Carga não linear	0	26	2	12
3	Carga não linear	3	26	2	12
4	Carga não linear	0	26	15	12
5	Carga não linear	0	5 a 50	2	12
6	Carga não linear	0	26	2	6

4.4.1 - Caso 1 – TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO E CARREGAMENTO SENOIDAL

a) Características

Este caso busca avaliar o desempenho térmico do transformador quando o mesmo encontra-se operando com tensão nominal e suprimindo uma carga linear e nominal.

b) Resultados

Os estudos computacionais fornecem a elevação da temperatura do enrolamento de baixa tensão (interna). Obviamente os valores das grandezas elétricas e térmicas são aquelas apresentadas na tabela 4.1.

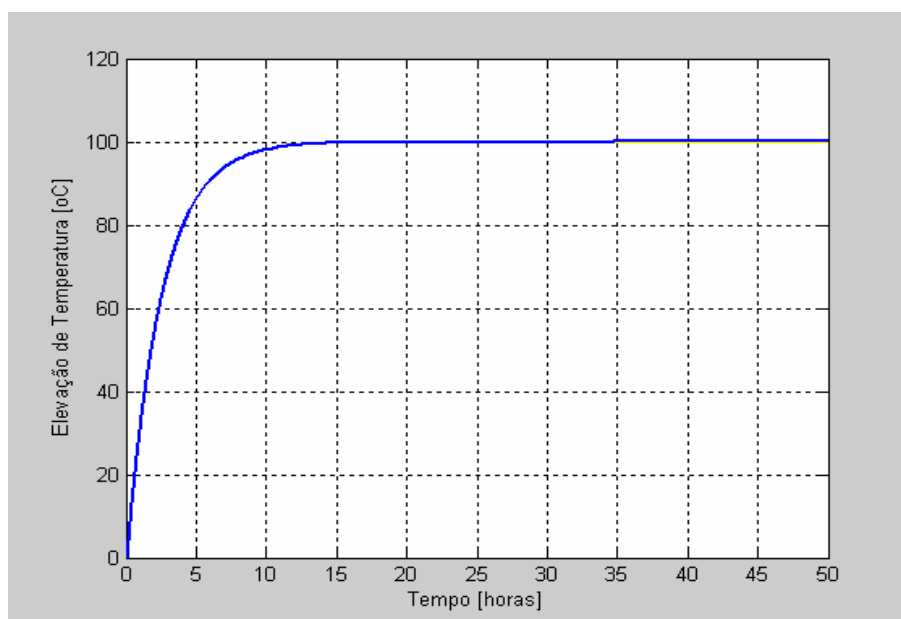


Figura 4.2 – Elevação de temperatura com carga linear para o caso 1.

c) Comentários

Estando o transformador operando em um regime contínuo e nominal, e carga linear, não houve alteração nas perdas totais do transformador. Desta forma, como era esperado, a elevação de temperatura encontrada foi de 100 °C. Neste sentido, não houve redução da vida útil do transformador.

Observa-se pela figura 4.2 que a temperatura atinge o seu valor de equilíbrio térmico após aproximadamente 10 horas, ou seja, 4 vezes sua constante de tempo, que é de $T_{th} = 2,49$ horas da equação (3.47).

4.4.2 - CASO 2 – TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO SENOIDAL E CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL.

a) Características

Este caso descreve o desempenho térmico do transformador quando o mesmo encontra-se operando com uma distorção harmônica total de corrente igual a 26%, típica de um retificador de 6 pulsos não controlado. A distorção harmônica total de tensão foi desprezada.

b) Resultados

As grandezas elétricas e térmicas obtidas são apresentadas na figura 4.3 e tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.

Grandezas Elétricas e Térmicas	Nominais	Com Distorção De Corrente	Diferença	Porcentual [%]
P_{Hn}[W]	1250	1250	0	0
P_{Fn}[W]	1250	1250	0	0
P_{Jn}[W]	10000	10697	697	6,97
$P_{ECnorma}$[W]	200	820,5	620,5	410
$P_{ECcorrigido}$[W]	200	327,68	127,68	163,5
Elevação da temperatura $P_{ECnorma}$[°C]	100	110,37	10,37	10,37
Elevação da temperatura $P_{ECcorrigido}$[°C]	100	106,5	6,5	6,5
EVu com $P_{ECnorma}$[anos]	20	7,92	12,08	39,6
EVu com $P_{ECcorrigida}$[anos]	20	11,14	8,86	55,7

Derating $P_{ECnorma}[A]$	1521	1480	41	0,9734
Derating $P_{ECcorrigido}[A]$	1521	1513	8	0,9948
Rendimento $P_{ECnorma}[\%]$	0,9874	0,9862	0,0012	99,87
Rendimento $P_{ECcorrigido}[\%]$	0,9874	0,9866	0,0008	99,92

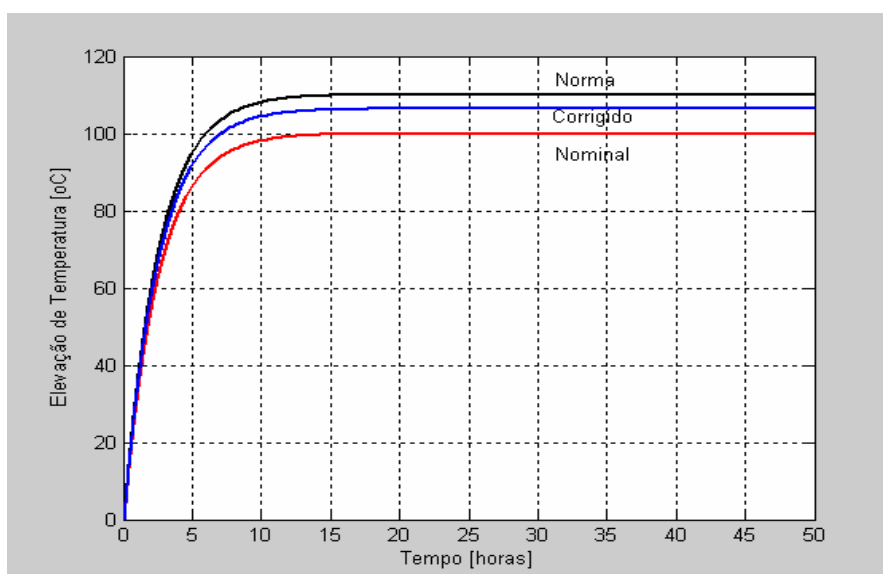


Figura 4.3 – Elevação de temperatura com distorção de corrente de 26% para o caso 2.

c) Comentários

Com base na tabela 4.3 e figura 4.3, pode-se constatar que:

- As perdas no núcleo não foram alteradas. Isto pode ser justificado, pois desprezou-se a distorção harmônica total de tensão e é independente da distorção de corrente.;
- As perdas por efeito Joule nos enrolamentos aumentou aproximadamente 7 % em relação as perdas nominais;

- As perdas por correntes parasitas calculadas segundo a metodologia da norma aumentou 410% em relação as suas perdas nominais;
- As perdas por correntes parasitas calculadas segundo a metodologia apresentada no capítulo III aumentou 164% em relação as suas perdas nominais. Deve-se destacar que uma simples comparação entre os valores destas perdas, percebe-se que aquela oriunda das normas, leva a valores muito superiores em relação aos calculados pela metodologia alternativa apresentada no capítulo anterior;
- A elevação da temperatura do enrolamento aumentou em aproximadamente 10%, quando nas perdas totais, sendo que a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- A elevação da temperatura do enrolamento aumentou em aproximadamente 6,5%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- A expectativa da vida útil do transformador foi reduzida de 60%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- A expectativa da vida útil do transformador foi reduzida de 45%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;

- O “derating” do transformador foi de 97%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- O “derating” do transformador foi de 99%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- O rendimento do transformador foi de 98,62%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- O rendimento do transformador foi de 98,66%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- Diante do exposto, percebe-se que ao utilizar a metodologia empregada pela norma, os valores encontrados para as perdas, elevações de temperatura, redução de vida útil, “derating” e rendimento, são sempre bem superiores aos níveis calculados pela metodologia alternativa apresentada e discutida no capítulo III.

4.4.3 - CASO 3 – TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO E CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL.

a) Descrição

Este caso destina-se avaliar o comportamento elétrico e térmico do transformador quando o mesmo encontra-se operando com uma distorção

harmônica de tensão igual a 3%, e suprimindo uma carga não linear, cuja distorção harmônica total de corrente é de 26%.

b) Resultados

As grandezas elétricas e térmicas investigadas são as mesmas dos casos 1 e 2, e os resultados obtidos são fornecidos pela figura 4.4 e tabela 4.4.

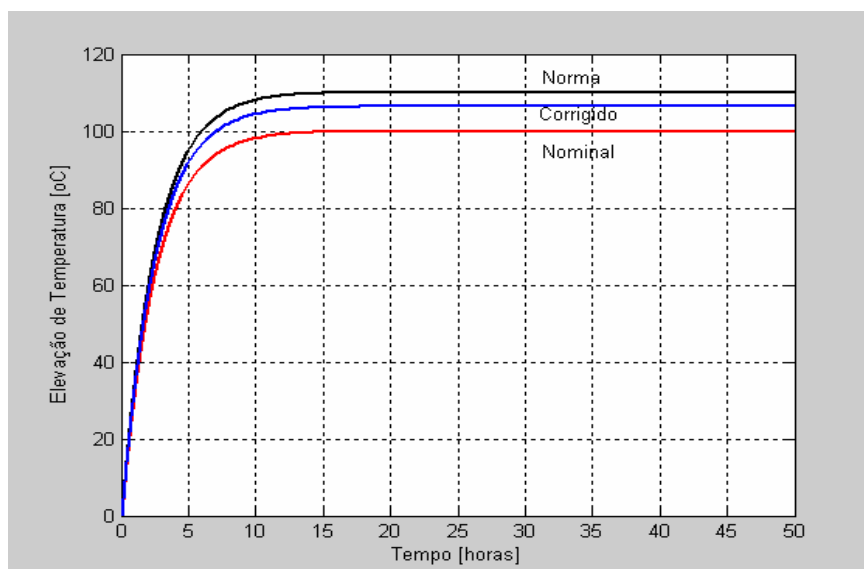


Figura 4.4 – Elevação de temperatura, com carga não linear, para o caso 3.

Tabela 4.4 - Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.

Grandezas Elétricas e Térmicas	Nominais	Com Distorção	Diferença	Porcentagem [%]
P_{Hn} [W]	1250	1250	0	0
P_{Fn} [W]	1250	1251,1	1,1	0,088
P_{Jn} [W]	10000	10697	697	6,97
$P_{ECnorma}$ [W]	200	820,5	620,5	410
$P_{ECcorrigido}$ [W]	200	327,68	127,68	163,5
Elevação da temperatura	100	110,37	10,37	10,37

$P_{ECnorma}[^{\circ}C]$				
Elevação da temperatura $P_{ECcorrigido}[^{\circ}C]$	100	106,5	6,5	6,5
EVu com $P_{ECnorma}[anos]$	20	7,92	12,08	39,6
EVu com $P_{ECcorrigida}[anos]$	20	11,14	8,86	55,7
Derating $P_{ECnorma}[A]$	1521	1480	41	0,9734
Derating $P_{ECcorrigido}[A]$	1521	1513	8	0,9948
Rendimento $P_{ECnorma}[\%]$	0,9874	0,9862	0,0012	99,87
Rendimento $P_{ECcorrigido}[\%]$	0,9874	0,9866	0,0008	99,92

c) Comentários

Como a distorção harmônica total de tensão tem pequena influência no comportamento elétrico e térmico do transformador, os comentários para este item são os mesmos descritos para o caso 2.

4.4.4 - CASO 4 – TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO SENOIDAL E CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL.

a) Características

Este caso, analogamente aos anteriores, procurará avaliar o desempenho elétrico e térmico do transformador quando o mesmo encontra-se operando com uma distorção harmônica de corrente igual a 26%. A distorção harmônica de tensão foi desprezada. Contudo, neste item, admite-se que as perdas por correntes parasitas na frequência fundamental são iguais a 15%.

b) Resultados

As grandezas elétricas e térmicas investigadas são aquelas como para o caso 2, e os resultados obtidos são fornecidos pela figura 4.5 e tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.

Grandezas Elétricas e Térmicas	Nominais	Com Distorção	Diferença	Porcentagem [%]
P_{Hn} [W]	1250	1250	0	0
P_{Fn} [W]	1250	1250	0	0
P_{Jn} [W]	10000	10697	697	6,97
$P_{ECnorma}$ [W]	1500	6138,4	4638,4	409
$P_{ECcorrigido}$ [W]	1500	2456,1	956,10	163,74
Elevação da temperatura $P_{ECnorma}$ [°C]	100	138,11	38,11	38,11
Elevação da temperatura $P_{ECcorrigido}$ [°C]	100	111,81	11,81	11,81
EVu com $P_{ECnorma}$ [anos]	20	0,84	19,16	4,2
EVu com $P_{ECcorrigida}$ [anos]	20	7,00	13	35
Derating $P_{ECnorma}$ [A]	1521	1300	220	85,48
Derating $P_{ECcorrigido}$ [A]	1521	1471	50	96,71
Rendimento $P_{ECnorma}$ [%]	0,9862	0,9810	0,0052	99,47
Rendimento $P_{ECcorrigido}$ [%]	0,9862	0,9846	0,0016	99,83

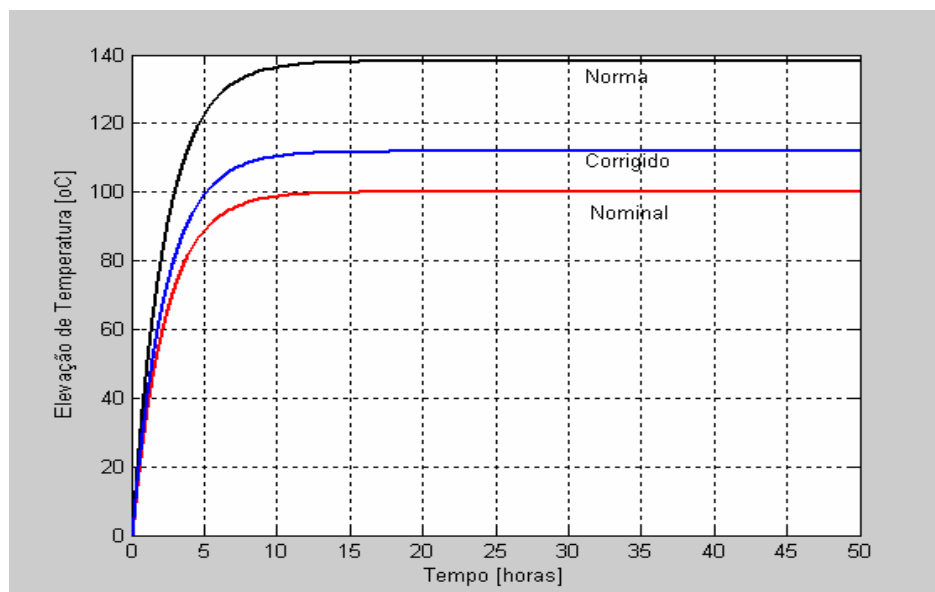


Figura 4.5 – Elevação de temperatura, carga não linear com distorção de corrente de 26%, para o caso 4.

c) Comentários

Com base na tabela 4.5 e figura 4.5, pode-se constatar que:

- As perdas no núcleo não foram alteradas. Isto pode ser justificado, pois desprezou-se a distorção harmônica total de tensão;
- As perdas por efeito Joule nos enrolamentos aumentou aproximadamente 7 % em relação as perdas nominais;
- As perdas por correntes parasitas calculadas segundo a metodologia da norma aumentou 409% em relação as suas perdas nominais;
- As perdas por correntes parasitas calculadas segundo a metodologia apresentada no capítulo III aumentou 164% em relação as suas perdas nominais. Deve-se destacar que uma simples comparação entre os valores destas perdas, percebe-se que aquela oriunda das normas, leva a

valores bem distintos dos calculados pela metodologia apresentada anteriormente;

- A elevação da temperatura do enrolamento aumentou em aproximadamente 38%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- A elevação da temperatura do enrolamento aumentou em aproximadamente 12%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- A expectativa da vida útil do transformador foi reduzida de 96%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- A expectativa da vida útil do transformador foi reduzida de 65%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- O derating do transformador foi de 85%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- O derating do transformador foi de 97%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;

- O rendimento do transformador foi de 98,10%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- O rendimento do transformador foi de 98,46%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- Diante do exposto, percebe-se que ao utilizar a metodologia empregada pela norma, os valores encontrados para as perdas, elevações de temperatura, redução de vida útil, “derating” e rendimento, são sempre bem superiores aos níveis calculados pela metodologia alternativa apresentada no capítulo III.
- Ao comparar o caso 4 com o 2, percebe-se um aumento nas grandezas elétricas e térmicas apresentadas para o caso 4 em questão. Isto é justificado pois as perdas por correntes parasitas aumentaram de 2% para 15 %.

4.4.5 - CASO 5 – TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO SENOIDAL E CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL.

a) Características

Este caso busca avaliar o desempenho elétrico e térmico do transformador quando o mesmo encontra-se operando com uma distorção harmônica total de corrente variando entre 5 a 50%. A distorção harmônica total de tensão é desprezada., conforme tabela 4.2 anteriormente considerada.

b) Resultados

As grandezas elétricas e térmicas investigadas são as mesmas dos casos anteriores. Os resultados obtidos são fornecidos pelas figuras a seguir. Os valores calculados pela metodologia apresentada pela norma são representados pela cor azul nas figuras abaixo, enquanto que a cor verde representa os mesmos níveis, porém, calculados pela metodologia apresentada no capítulo III.

b.1) Perdas nos enrolamentos

As figuras 4.6 e 4.7, fornecem o aumento das perdas joule e das perdas por correntes parasitas em função da distorção harmônica total de corrente. Neste caso a largura do condutor de seção reta retangular do transformador foi considerado de 12 mm.

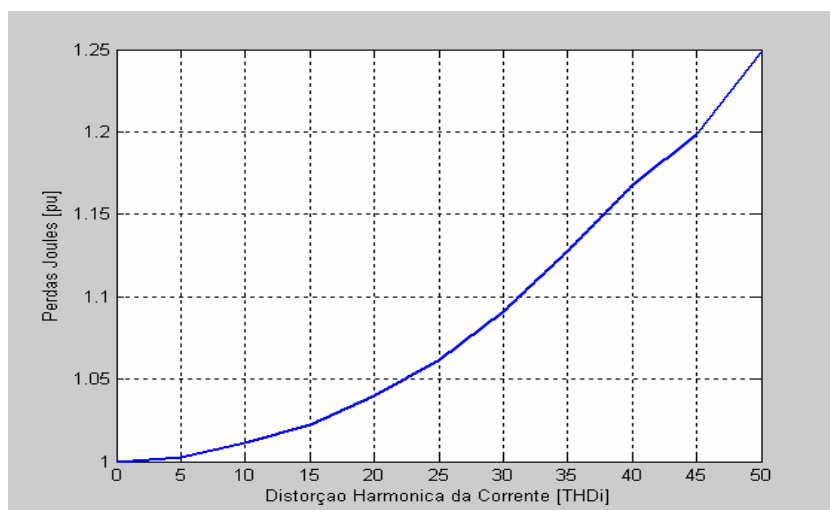


Figura 4.6 – Perdas Joule em função do THDi.

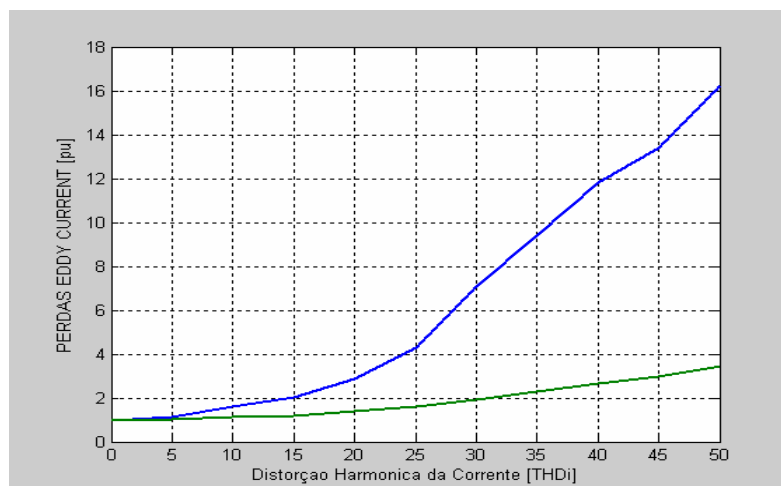


Figura 4.7 – Perdas “Eddy Currents” Norma x Proposta em função do THDi.

b.2) Elevação de Temperatura

Para se avaliar o impacto causado no aquecimento de transformadores, a figura 4.8 descreve a elevação de temperatura no enrolamento de baixa tensão em função da distorção harmônica total de corrente.

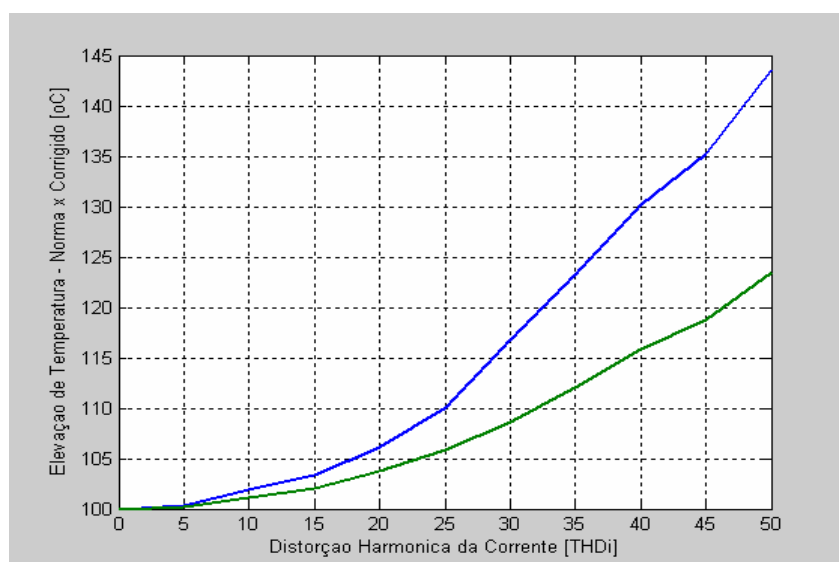


Figura 4.8 – Elevação de temperatura Norma x Proposta em função do THDi.

b.3) Estimativa da Vida Útil

A figura 4.9, fornece a redução da vida útil em função da distorção harmônica total de corrente.

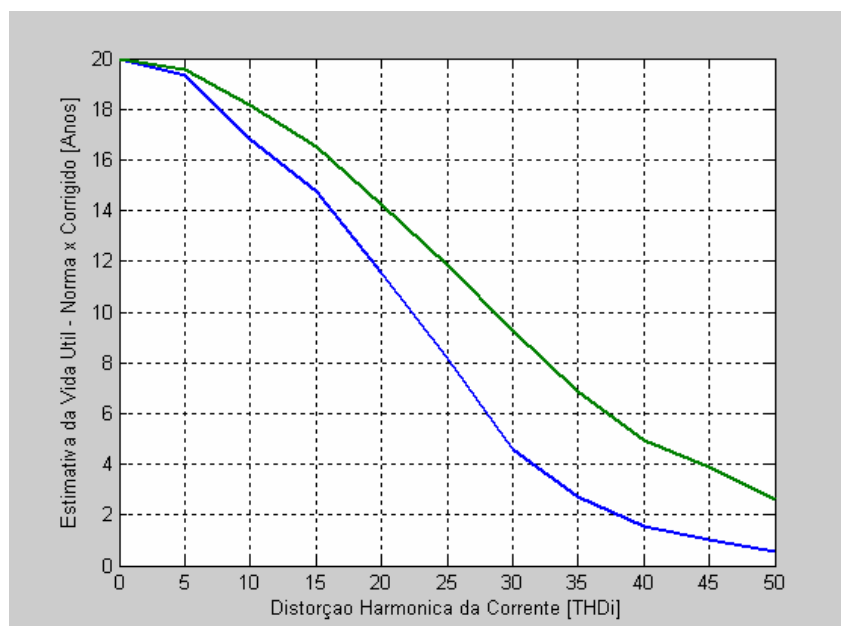


Figura 4.9 - Estimativa da Vida Útil Norma x Proposta em função do THDi.

b.4) Métodos de Redução de Corrente de Carga de Transformadores “Derating”.

A figura 4.10, fornece a redução do carregamento do transformador em função da distorção harmônica total de corrente.

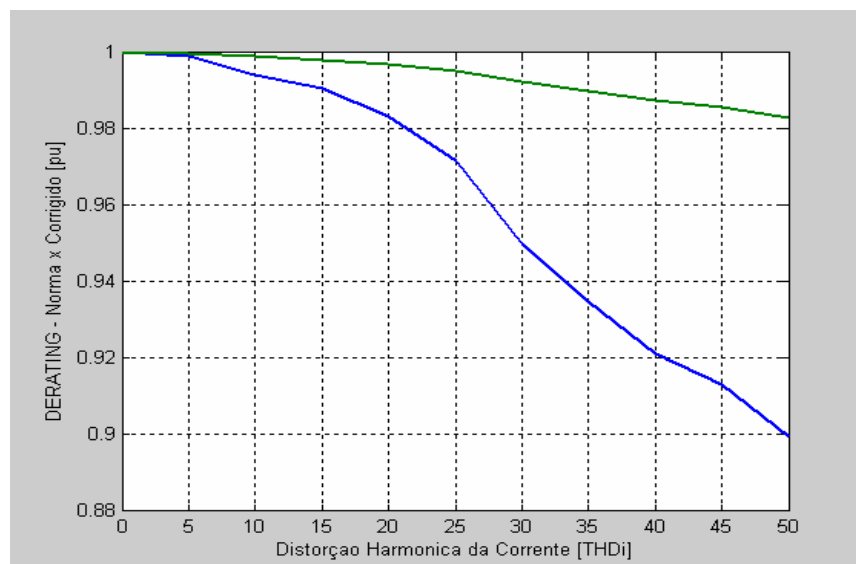


Figura 4.10 – Análise do “Derating” em função do THDi – (pu).

b.5) Rendimento do transformador

A figura 4.11, fornece a redução do rendimento do transformador em função da distorção harmônica total de corrente.

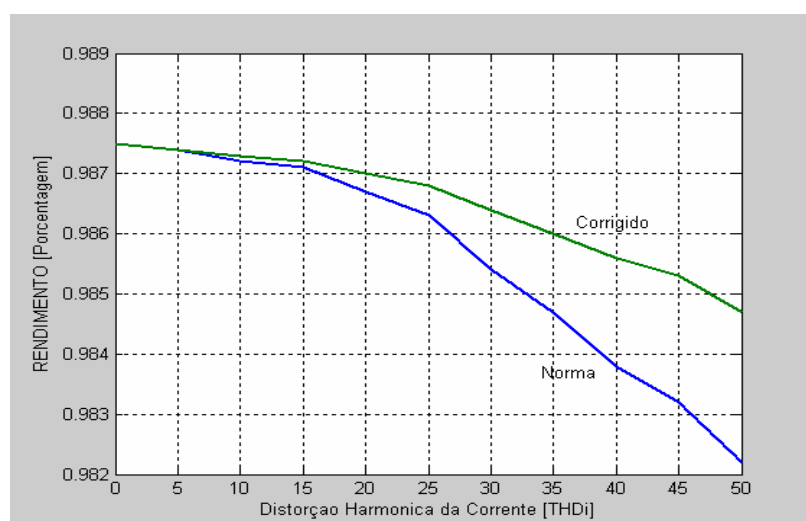


Figura 4.11 – Rendimento Norma x Proposta em função do THDi.

c) Comentários

Acredita-se ser desnecessário realizar comentários para este caso, pois as próprias figuras são auto esclarecedoras do comportamento elétrico e térmico do equipamento.

4.4.6 - CASO 6 – TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO SENOIDAL E CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL

a) Características

Este caso descreve o desempenho elétrico e térmico do transformador a seco quando o mesmo encontra-se operando com uma distorção harmônica de corrente igual a 26%. A distorção harmônica de tensão foi desprezada. Esta situação difere dos casos anteriores, pois a largura do condutor do enrolamento de baixa tensão foi alterado para 6 mm. Pode-se considerar ainda que este caso é um caso particular do anterior (caso 5) apenas diferente na consideração da largura do condutor, conforme se observa na tabela 4.2.

b) Resultados

As grandezas elétricas e térmicas investigadas são as mesmas do caso anteriores, e os resultados obtidos são fornecidos pelas figuras de 4.12 a 4.16 e pela tabela 4.6.

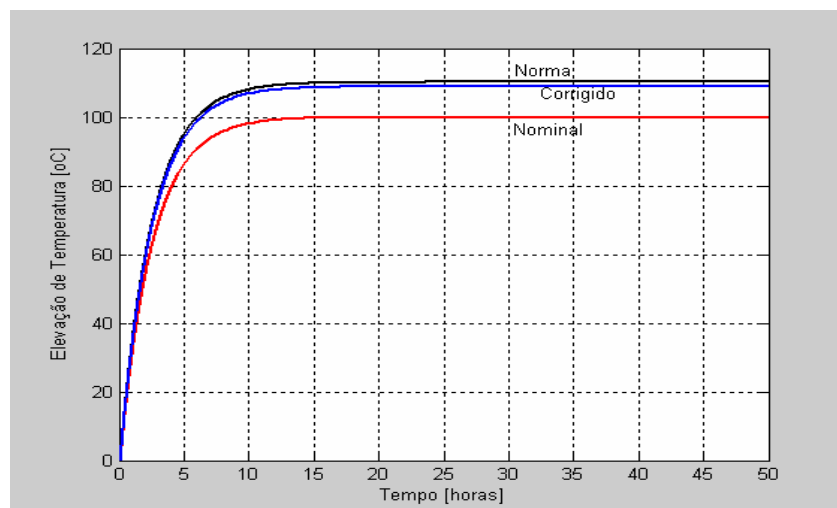


Figura 4.12 – Elevação de temperatura Norma x Proposta, THDi = 26%.

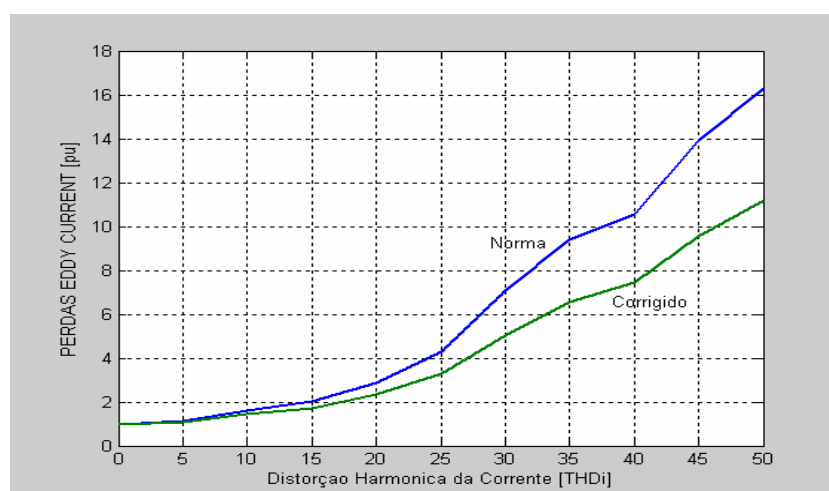


Figura 4.13 – Perdas por Correntes Parasitas no enrolamento Norma x Proposta em função do THDi.

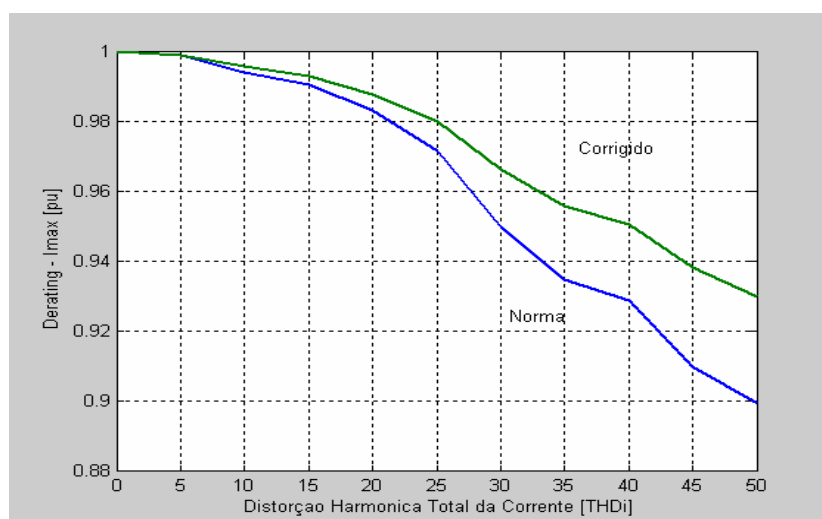


Figura 4.14 - Corrente máxima Norma x Proposta em função do THDi.

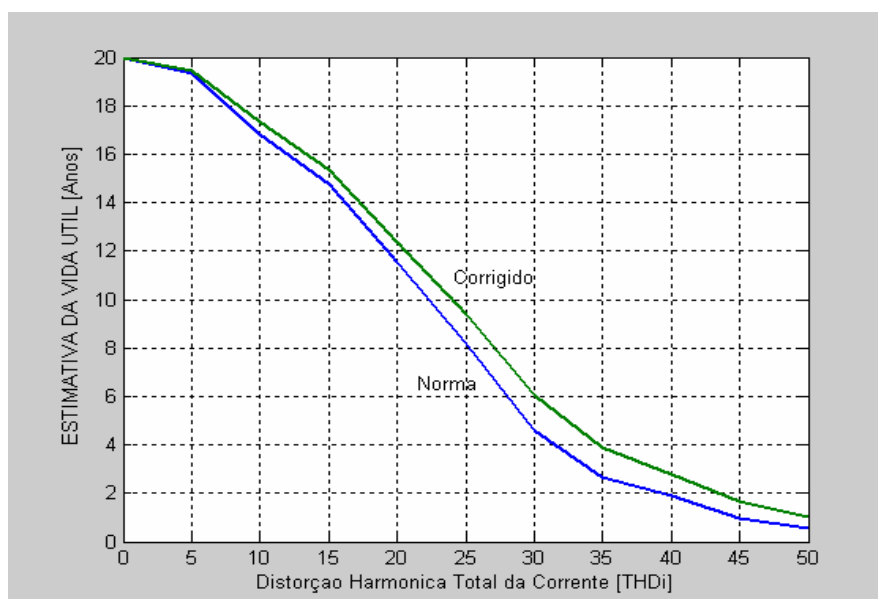


Figura 4.15 – Estimativa da Vida Útil Norma x Proposta em função do THDi.

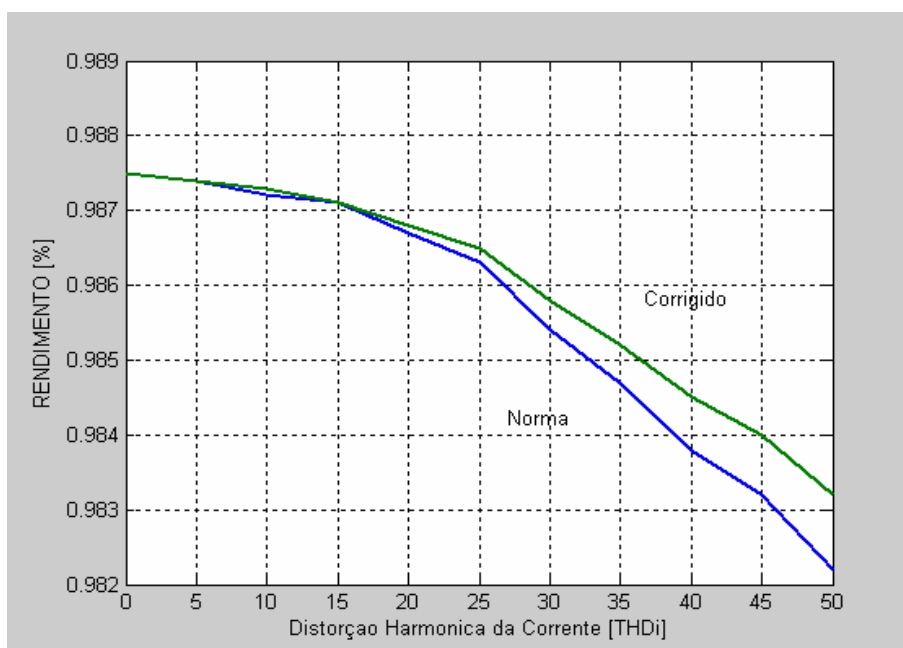


Figura 4.16 – Rendimento Norma x Proposta em função do THDi.

Tabela 4.6 - Cálculo do Aumento das Perdas no enrolamento.

Grandezas Elétricas e Térmicas	Nominais	Com Distorção	Diferença	Porcentagem [%]
P_{Hn} [W]	1250	1250	0	0
P_{Fn} [W]	1250	1250	0	0
P_{Jn} [W]	10000	10697	697	6,97
$P_{ECnorma}$ [W]	200	820,5	620,5	410,25
$P_{ECcorrigido}$ [W]	200	649,75	449,75	324,87
Elevação da temperatura $P_{ECnorma}$ [°C]	100	110,37	10,37	10,37
Elevação da temperatura $P_{ECcorrigido}$ [°C]	100	109,03	9,03	9,03
EVu com $P_{ECnorma}$ [anos]	20	7,92	12,08	39,60
EVu com $P_{ECcorrigida}$ [anos]	20	8,90	11,10	44,5
Derating $P_{ECnorma}$ [A]	1521	1480	40,61	97,33
Derating $P_{ECcorrigido}$ [A]	1521	1491	29,52	98,06
Rendimento $P_{ECnorma}$ [%]	0,9874	0,9862	0,0012	99,87
Rendimento $P_{ECcorrigido}$ [%]	0,9874	0,9863	0,0011	99,88

c) Comentários

Com base na tabela 4.6 e figuras 4.12 a 4.16, pode-se constatar que:

- As perdas no núcleo não foram alteradas. Isto pode ser justificado, pois desprezou-se a distorção harmônica total de tensão;

- As perdas por efeito Joule nos enrolamentos aumentou aproximadamente 7 % em relação as perdas nominais;
- As perdas por correntes parasitas calculadas segundo a metodologia da norma aumentou 410% em relação as suas perdas nominais;
- As perdas por correntes parasitas calculadas segundo a metodologia apresentada no capítulo III aumentou 324% em relação as suas perdas nominais. Deve-se destacar que uma simples comparação entre os valores destas perdas, percebe-se que aquela oriunda das normas, leva a valores bem superiores em relação aos calculados pela metodologia alternativa apresentada no capítulo anterior;
- A elevação da temperatura do enrolamento aumentou em aproximadamente 10%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- A elevação da temperatura do enrolamento aumentou em aproximadamente 9%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- A expectativa da vida útil do transformador foi reduzida de 60%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- A expectativa da vida útil do transformador foi reduzida de 55%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;

- O “derating” do transformador foi de 97%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- O derating do transformador foi de 98%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- O rendimento do transformador foi de 98,62%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base na norma;
- O rendimento do transformador foi de 98,63%, quando nas perdas totais, a parcela relativa as perdas por correntes parasitas foi calculada com base no capítulo III;
- Diante do exposto, percebe-se que ao utilizar a metodologia empregada pela norma, os valores encontrados para as perdas, elevações de temperatura, redução de vida útil, “derating” e rendimento, são sempre bem superiores aos níveis calculados pela metodologia alternativa apresentada e discutida no capítulo III.
- A diferença apresentada entre os resultados computacionais em relação aos casos anteriores, justifica-se pela largura do condutor que foi alterada de 12 mm para 6 mm.

4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo verificar o comportamento térmico do transformador em condições de carregamento não linear, analisando computacionalmente para esta condição de carga as elevações de temperatura.

Considerando o aquecimento adicional provocado pelas componentes harmônicas de forma que não provoque a redução da vida útil do equipamento e mantenha as perdas em condições nominais de projeto, provocando-se, para que isso ocorra, o “derating” do transformador, ou seja, redução de sua corrente de carga.

Neste contexto, percebe-se que ao utilizar a metodologia empregada pela norma, os valores encontrados para as perdas, elevações de temperatura, redução de vida útil, “derating” e rendimento, são sempre bem superiores aos níveis calculados pela metodologia alternativa apresentada e discutida no capítulo III.

Observou-se que a distorção da tensão de alimentação provoca um aumento nas perdas do núcleo do transformador, muito pouco afeta o equipamento em termos de elevação de temperatura e redução de vida útil.

Entretanto com a distorção de corrente, observou-se que pequenos acréscimos nas perdas em cargas do transformador afetam significativamente suas temperaturas de operação e conseqüentemente sua vida útil.

O efeito das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos é muito mais crítico e preocupante para valores altos de distorções harmônicas de correntes na qual o transformador encontra-se submetido.

As perdas por correntes parasitas nos enrolamentos calculadas pelo método alternativo do capítulo anterior, mostrou uma possibilidade de um ganho de vida útil maior, um aumento do carregamento da corrente de carga e um ganho de rendimento, em comparação com os resultados da metodologia empregada pela norma IEEE.

CAPÍTULO V

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As análises precedentes fundamentaram-se em investigações analíticas, e simulações computacionais sobre o comportamento elétrico e térmico dos transformadores, sob condições distorcidas de tensão e/ou corrente.

Complementando essas discussões, este capítulo tem como meta apresentar e discutir os resultados de medições conduzidas em um protótipo de uma unidade trifásica a seco de 5 kVA, 220/220 V isolado com resina epóxi.

Este procedimento viabiliza a comparação entre os resultados computacionais e experimentais com vistas à validação da proposta de modelagem térmica de primeira ordem desenvolvida no capítulo III.

Deve-se ressaltar que o transformador empregado nos estudos foi especialmente construído para realização de testes de temperatura com a instalação de sensores térmicos localizados em vários pontos do equipamento. Os ensaios realizados retrataram, a fim de validar o modelo teórico, condições semelhantes às aquelas simuladas computacionalmente.

Os ensaios experimentais analisaram o desempenho elétrico e térmico do equipamento, quando este alimenta cargas lineares ou não lineares. Nestas condições, são obtidas e analisadas as seguintes grandezas:

- Elevação da temperatura do enrolamento da AT (externo) acima da temperatura ambiente;
- Elevação da temperatura do enrolamento da BT (interno) acima da temperatura ambiente;
- Elevação da temperatura do núcleo acima da temperatura ambiente;
- Temperatura ambiente.

5.2 – MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental foi realizada de acordo com a figura 5.1.

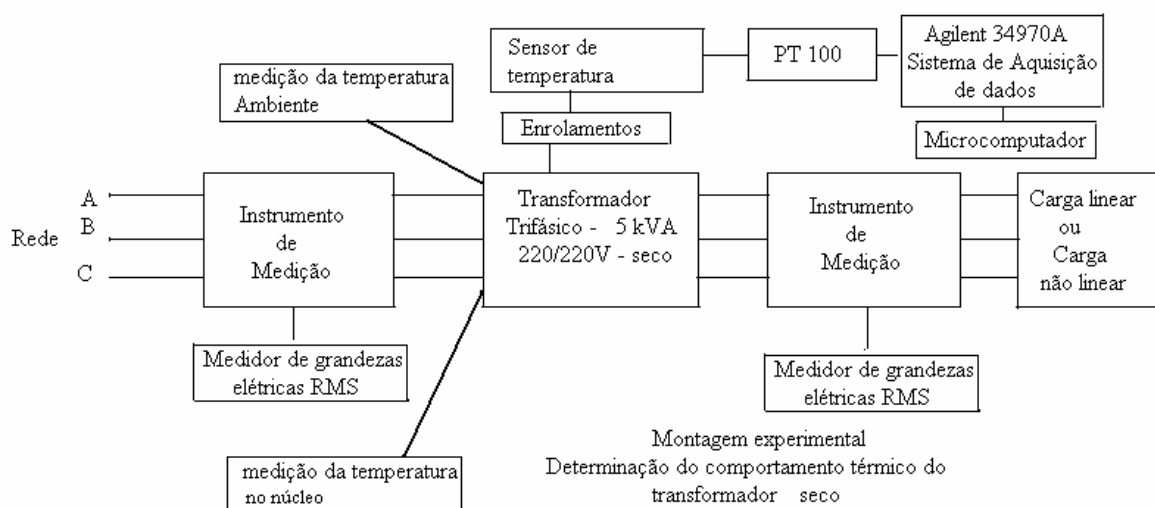


Figura 5.1 – Montagem experimental utilizada nos ensaios.

Com a finalidade de analisar a operação térmica do equipamento, optou-se por realizar os ensaios sob duas condições. A primeira compreendeu o transformador alimentando uma carga linear, constituída de uma carga resistiva conectada em estrela e compostas por lâmpadas incandescentes. A segunda foi semelhante a anterior, porém, substituindo-se a carga linear por uma não linear, empregando-se para tanto um retificador não controlado de seis pulsos.

5.2.1 – Equipamentos Utilizados

Os componentes e/ou equipamentos empregados nos ensaios experimentais são descritos, a seguir:

5.2.1.1 - Transformador de 5 k VA – 220/220 Volts

O transformador utilizado é trifásico, conexão Δ/Y , de 5 kVA, a seco e especialmente construído com sensores de temperatura nos enrolamentos para possibilitar a determinação do perfil da temperatura da alta (parte externa), baixa (parte interna) e do núcleo.

As figuras a seguir ilustram as montagens experimentais.



Figura 5.2 – Detalhe do transformador trifásico a seco de 5 kVA.

5.2.1.2 - Termoresistência tipo PT 100

Conforme mostrado na figura 5.2 o transformador foi especialmente construído para permitir a medição da temperatura nos enrolamentos e no núcleo. Para tanto, as bobinas foram construídas de maneira a permitir que sensores de temperatura do tipo PT 100 fossem instalados interiormente nos enrolamentos.

5.2.1.3 – Agilent 34970 A

Esta unidade constitui na unidade de aquisição de dados com identificação 34970A composta de um estojo compacto propiciando, uma solução econômica, para registrar os dados, de uma aquisição, com finalidade de chaveamento e de controle.

O agilent é constituído de: um multímetro de 6,5 dígitos embutido, com 8 interruptores e controles, e um registro de dados independente com 50.000 leituras de memória interna. Inclui também as relações GPIB e RS-232 para a conexão ao computador, e também o software do registro de dados II do

“Agilent BenchLink”, que fornece uma maneira fácil de coletar e analisar os dados em tempo real.



Figura 5.3 – Agilent 34970A - unidade de aquisição de dados.

O “software” do registrador de dados II do “Agilent BenchLink” fornece uma maneira conveniente de coletar e analisar os dados coletados.

O “software” é uma aplicação baseada no “Windows”, é necessário simplesmente identificar as medidas que se deseja adquirir, para iniciar o processo, com os dados indicados em tempo real.

Pode-se usar uma das várias opções para analisar os dados: histogramas com análise estatística, resultados individuais da canaleta, e outros.



Figura 5.4 – Equipamentos para aquisição de dados.

Utilizou-se o “agilent” para aquisição dos dados fornecidos pelos sensores térmicos, possibilitando assim a ilustração das figuras informativas no trabalho.

Após a fase de validação procedeu-se a avaliação do desempenho de transformadores a seco submetidos a sobrecargas e distorções harmônicas, com vistas à análise térmica e vida útil.

5.2.1.4 – Osciloscópio Digital Portátil – THS 720P

Com o objetivo de registrar para cada ensaio, as formas de onda de tensão na entrada e saída do transformador, foi utilizado um osciloscópio multímetro digital, da marca Tektronic, com as seguintes características principais:

- Dois canais isolados para medição de tensão e/ou corrente.
- Fabricante: Tektronix/USA.
- Portátil, tela de cristal líquido monocromático.
- Análise Harmônica: (até 50a ordem) e THD's.
- Amostragem das formas de onda e espectro harmônico.
- Transferência das informações para microcomputador via interface RS-232.
- Função multímetro.

5.2.1.5 – Computador

Para a complementação da análise dos resultados experimentais foi utilizado um computador com as seguintes características:

- AMD Duron (tm) processador 1,30 GHz, 120 MB de Ram.

5.2.1.6 – Medidor de grandezas elétricas RMS MARH-21.

É um medidor e registrador de grandezas em tempo-real para sistemas elétricos monofásicos, bifásicos e trifásicos em baixa, média e alta tensão. Possui três canais de entrada para sinais de tensão, três canais de entrada para sinais de corrente e ainda três canais de entrada para grandezas auxiliares definidas pelo usuário.



Figura 5.5 – Equipamento MARH-21.

Tendo em vista as características deste medidor a partir dos sinais de entrada de tensão e corrente o MARH-21 calcula e indica no mostrador alfanumérico os valores de tensão, corrente, fator de potência, potências, energia, etc. Grandezas como temperatura, pressão, pressão sonora e outras, convertidas previamente para sinais com padrão de instrumentação, podem também ser indicadas pelo MARH-21 através dos canais auxiliares.

O MARH-21 pode também captar as formas de ondas das tensões e correntes de várias formas diferentes.

Os circuitos internos, responsáveis pelo funcionamento do MARH-21, podem ser alimentados diretamente pela entrada de sinal de medição de tensão, pela entrada auxiliar em tensão alternada de 70 a 600 Vca ou por uma entrada em tensão contínua de 11 a 60 Vcc.

O motivo principal da utilização deste equipamento foi obter as formas de onda na saída e na entrada do transformador, quando este está operando com cargas lineares e não lineares. Além deste aspecto, foram obtidos também para cada ensaio, as distorções harmônicas totais e individuais da tensão e da corrente, tanto no lado primário como no lado secundário.

5.3 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS – MONTAGENS EXPERIMENTAIS

As figuras 5.6 e 5.7 mostram, respectivamente, as montagens experimentais com carga linear e não linear. Em virtude da dificuldade de obtenção de cargas, ajuste e limitação do laboratório, fixou-se a corrente de carga em um patamar igual a 13,66 A, na frequência fundamental, para o ensaio com carga linear. Para o ensaio com carga não linear a corrente na frequência fundamental foi de 13,99 A.

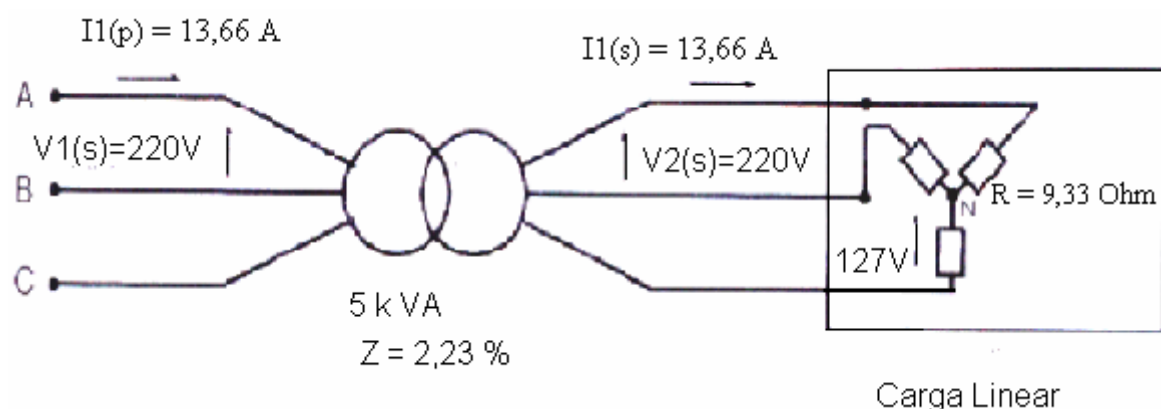


Figura 5.6 – Montagem experimental – carga linear.

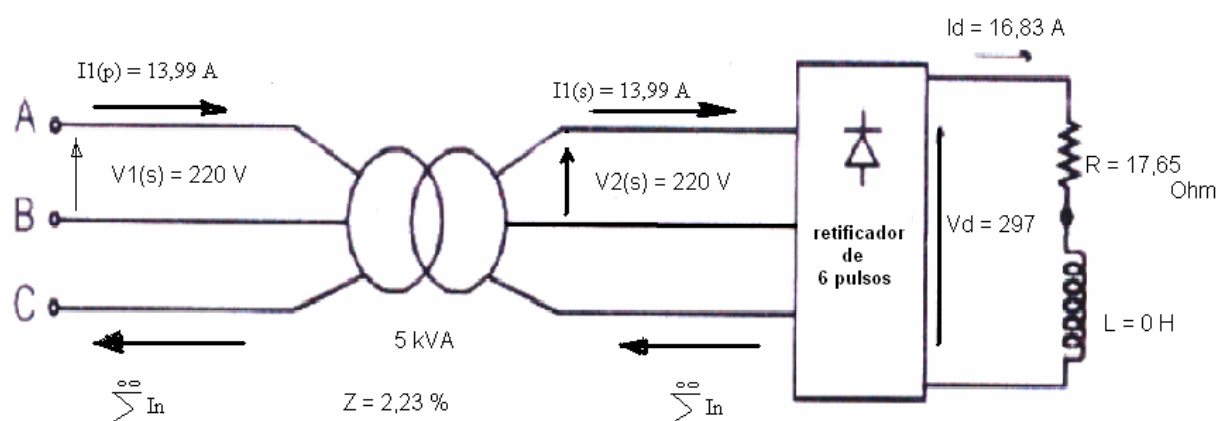


Figura 5.7 – Montagem experimental – carga não linear.

5.4 – RESULTADOS COM CARGA LINEAR

a) Análise de grandezas elétricas

Com a montagem do transformador suprimindo carga linear, obteve-se as formas de onda das tensões e/ou correntes no primário e secundário do transformador, bem como, os seus respectivos conteúdos harmônicos, como mostram as figuras 5.8 a 5.11. Deve-se ressaltar que, por questões de similaridade entre os resultados, optou-se por apresentar somente os resultados referentes ao enrolamento de baixa tensão. Portanto, as correntes

mostradas referem-se as fases A, B e C, enquanto que a forma de onda da tensão é representada sòmente pela fase A.

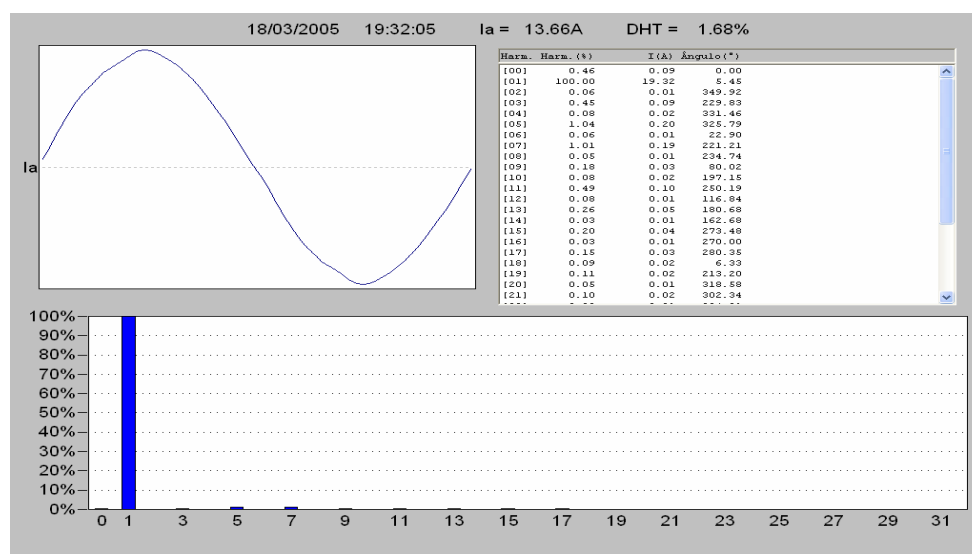


Figura 5.8 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase A.

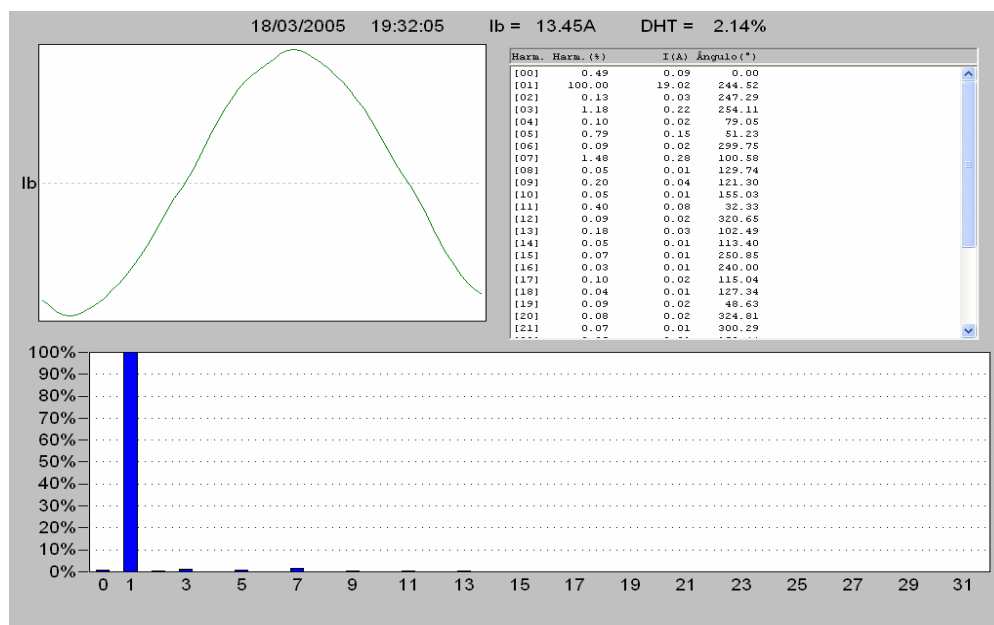


Figura 5.9 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase B.

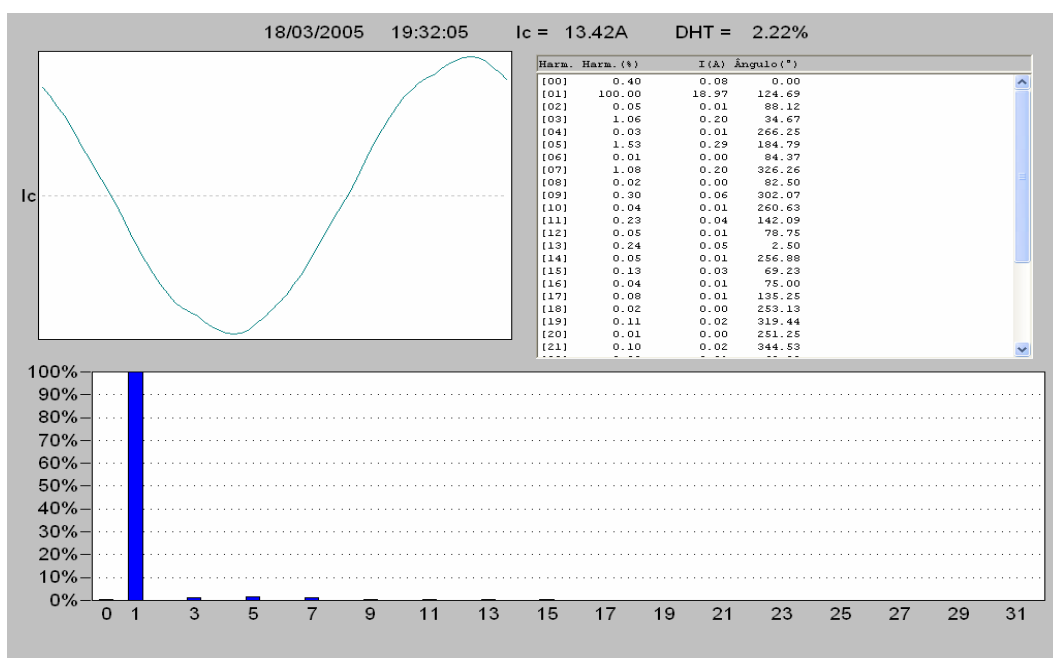


Figura 5.10 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase C.

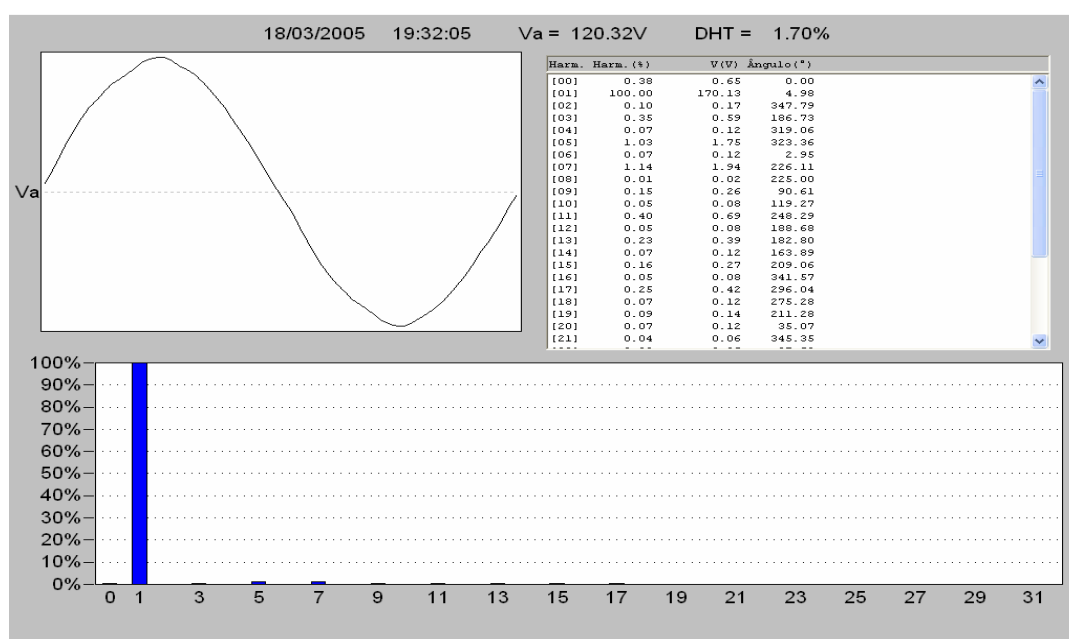


Figura 5.11 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão no secundário do transformador – fase A.

Pode-se observar que as formas de onda são praticamente senoidais e que o transformador está operando próximo de sua condição nominal. As pequenas distorções na tensão e corrente apresentadas são inerentes ao sistema elétrico que alimenta o transformador.

b) Análise Térmica

Os resultados dos ensaios experimentais seguem no sentido de verificar o comportamento térmico, com as 3 fases monitoradas continuamente durante todo o tempo de funcionamento do transformador. As temperaturas dos enrolamentos AT (externo), BT (interno) e núcleo são monitoradas por sensores de temperatura até que o transformador atinja o seu equilíbrio térmico.

Com vistas a melhor ilustrar os resultados obtidos no laboratório, a figura 5.12 apresenta o comportamento das elevações de temperatura dos enrolamentos do primário e secundário, bem como aquela associada ao núcleo magnético, para um suprimento com carga linear.

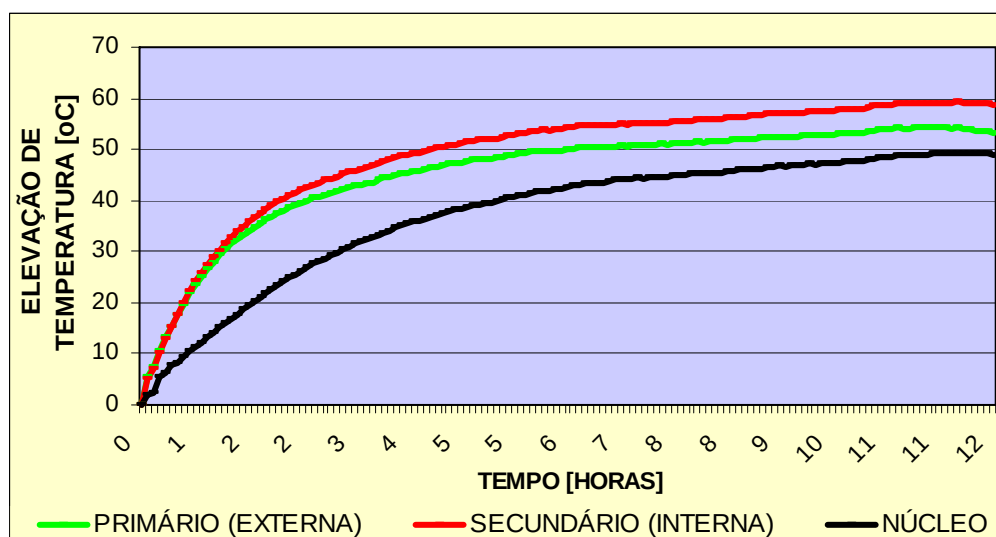


Figura 5.12 – Elevação da temperatura no núcleo, nos enrolamentos internos e externos do transformador com carga linear.

Analisando os levantamentos gráficos, pode-se contatar que:

- Neste ensaio, a elevação de temperatura máxima do enrolamento externo (AT), interno (BT) e núcleo atingiram em regime permanente, respectivamente 53,2 °C, 58,6 °C e 48,8 °C. Assim, estes resultados são apresentados na tabela 5.1, cujas elevações de temperatura interna são obtidas quando o transformador está operando em regime permanente.

Tabela 5.1 – Elevação de temperatura máxima - aquisição experimental.

Elevação de Temperatura - Ensaio Carga Linear [°C]		
Alta	Baixa	Núcleo
53,2	58,6	48,8

- Como era de se esperar, a temperatura do ponto mais quente está localizado na parte superior do enrolamento da baixa tensão (enrolamento interno).

5.5 – RESULTADOS COM CARGA NÃO LINEAR

a) Análise de grandezas elétricas

Nesta etapa dos trabalhos, substituiu-se a carga linear pela não linear, que é composta de uma ponte retificadora não controlada de 6 pulsos. Apesar da mudança do tipo de carga, deve-se salientar que as componentes fundamentais da tensão e corrente foram mantidas aproximadamente iguais às condições nominais do transformador.

Repetindo-se o procedimento adotado anteriormente, obtêm-se as formas de ondas das tensões e/ou correntes, bem como os seus conteúdos harmônicos. Estes resultados são ilustrados nas figuras 5.13 a 5.16 a seguir.

Deve-se salientar que foi monitorado as correntes e as tensões nas três fases, tanto no enrolamento secundário como no primário. No entanto, por similaridades dos resultados nas três fases, optou-se por mostrar apenas as formas de onda da tensão e da corrente e seus respectivos harmônicos, apenas no enrolamento secundário.

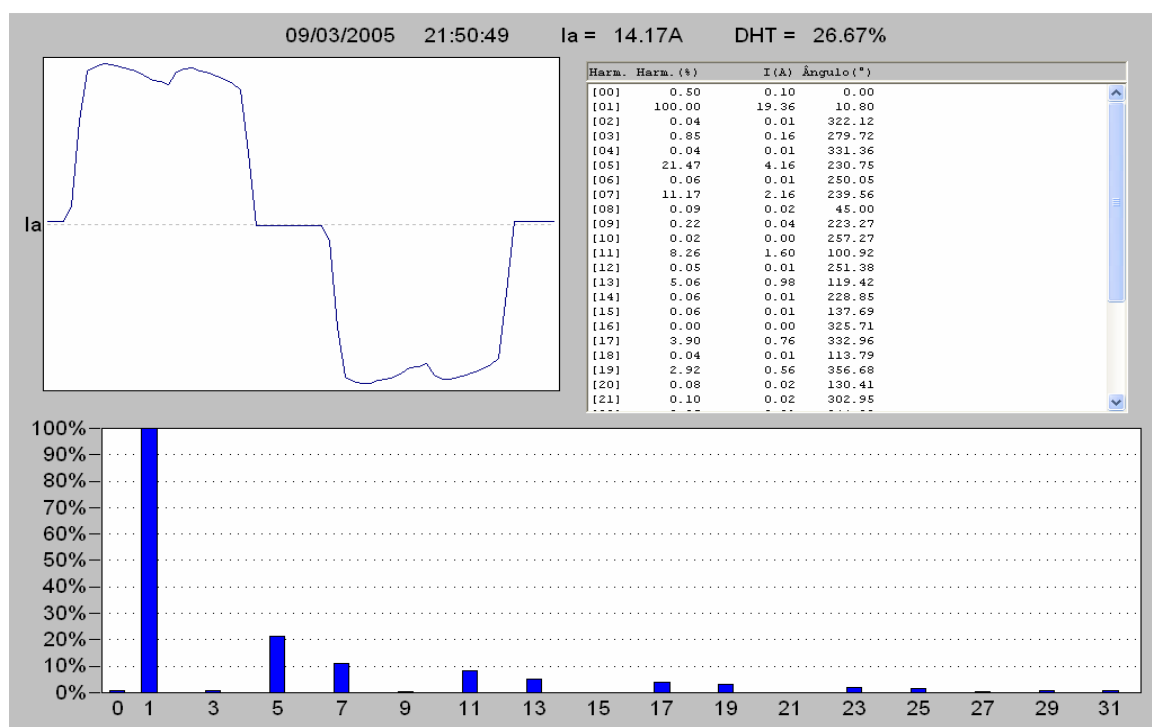


Figura 5.13 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase A.

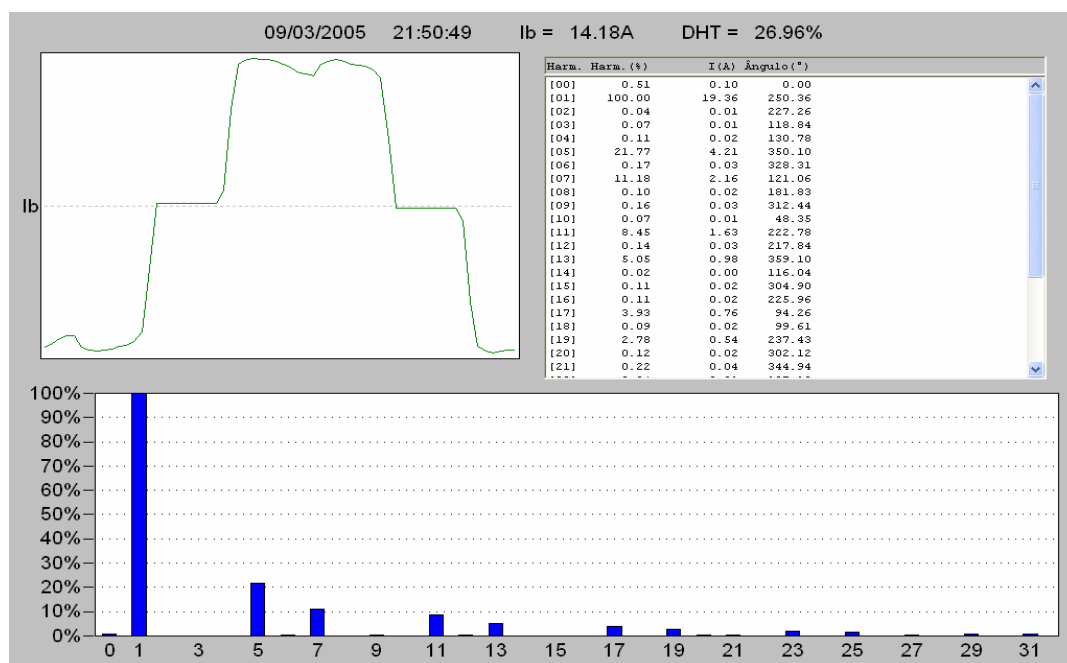


Figura 5.14 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase B.

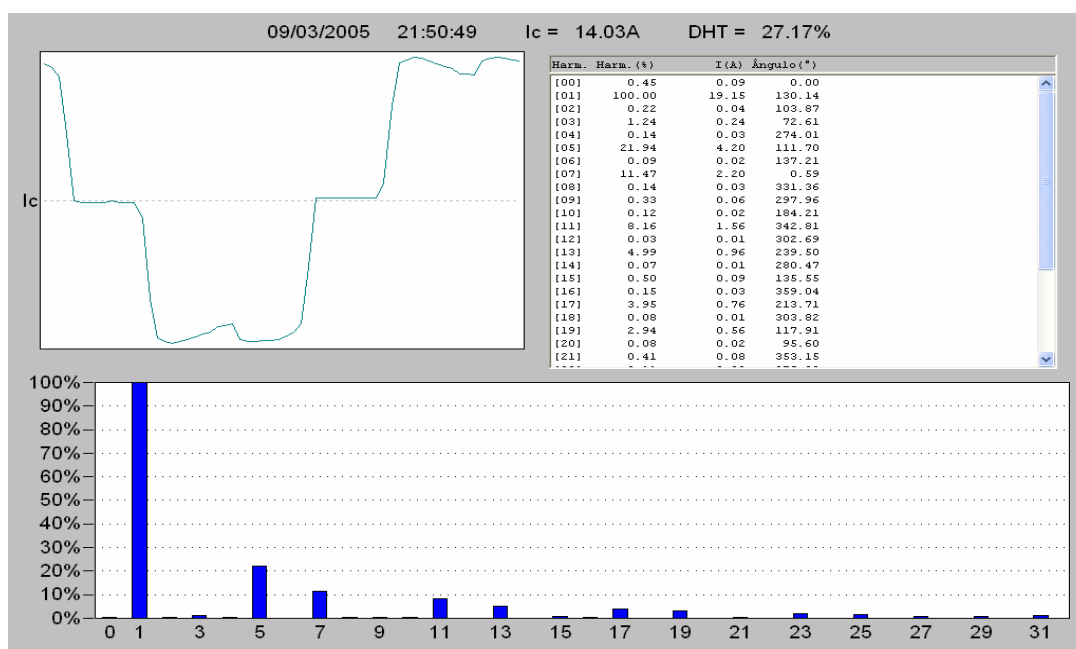


Figura 5.15 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase C.

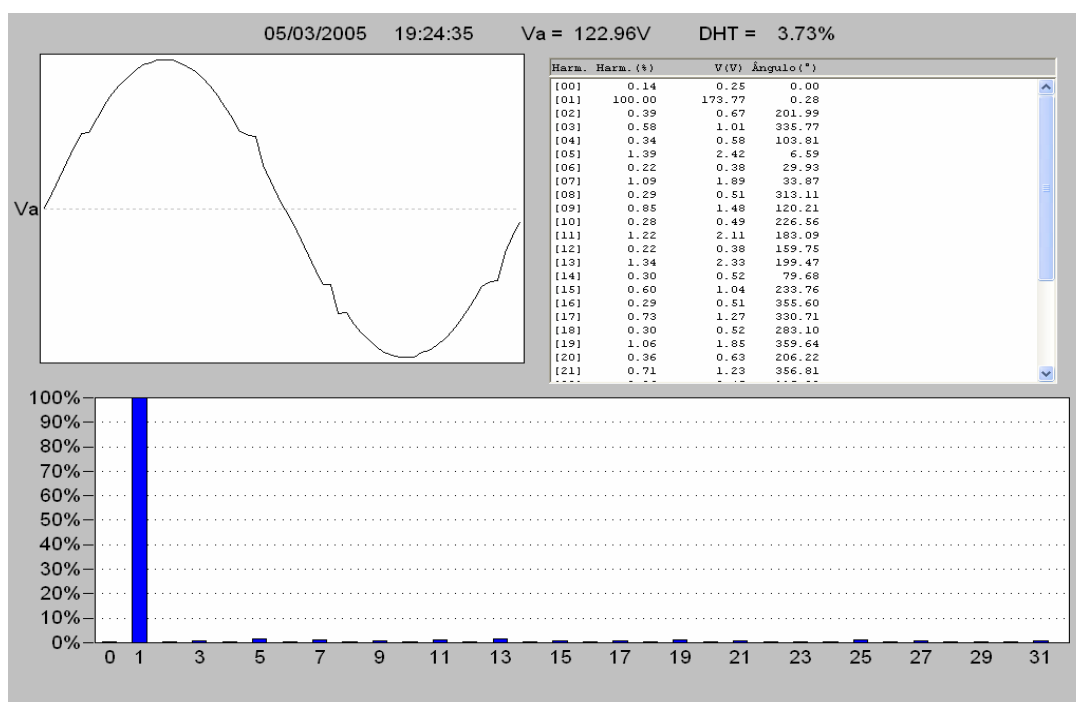


Figura 5.16 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão no secundário do transformador – fase A.

As formas de onda da tensão e da corrente bem como os seus respectivos espectros harmônicos encontrados são compatíveis, quando da operação do transformador alimentando um conversor não controlado de 6 pulsos. Quanto aos níveis dos harmônicos de corrente e de tensão, aqueles de ordem 5, 7, 11, 13, 17 são os mais significativos características típicas de uma ponte retificadores de 6 pulsos. Os valores encontrados para as distorções totais de corrente e de tensão foram, respectivamente 27% e 3,7%.

b) Análise Térmica

Ainda com vistas a melhor ilustrar os resultados obtidos no laboratório, a figura 5.17 apresenta o comportamento das elevações de temperatura dos enrolamentos do primário e secundário, bem como aquela associada ao núcleo magnético, para um carregamento com carga não linear.

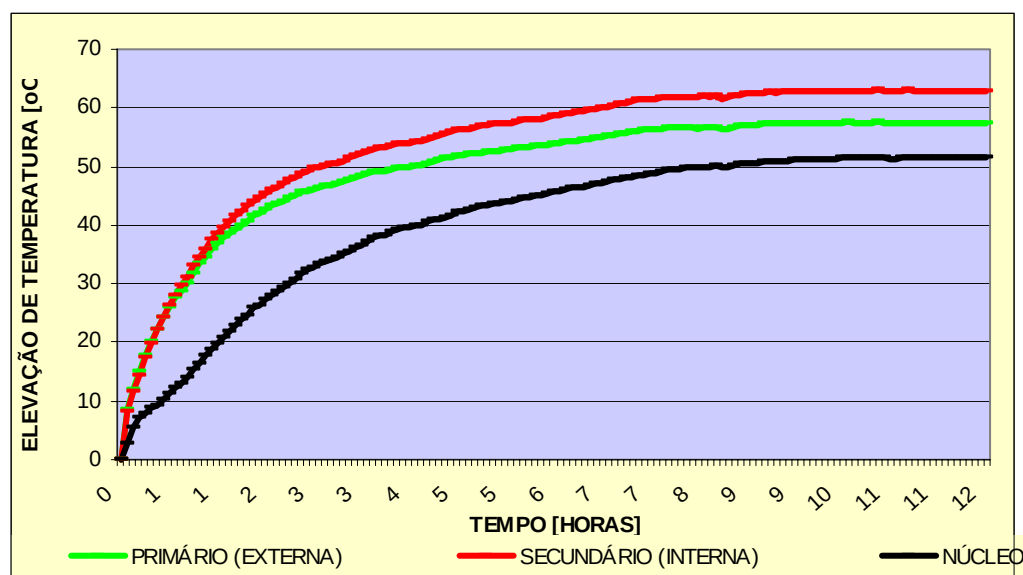


Figura 5.17 – Elevação da temperatura no núcleo e nos enrolamentos internos e externos do transformador com carga não linear.

Pode-se ainda observar que na figura 5.17, há um aumento nas temperaturas dos enrolamentos do transformador superior ao do núcleo quando opera com a carga não linear.

A elevação de temperatura do núcleo e enrolamentos externos (alta) e internos (baixa) atingiu em regime permanente uma estabilização conforme, os valores mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Elevação de temperatura máxima, aquisição experimental.

Elevação de Temperatura Ensaio Carga Não Linear [°C]		
Núcleo	Alta	Baixa
51,6	57,3	62,9

5.6 – SÍNTESE DOS RESULTADOS MAIS SIGNIFICATIVOS ASSOCIADOS ÀS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA

A tabela 5.3 e a figura 5.18 ilustram para efeito comparativo o desempenho térmico do transformador alimentando uma carga linear ou não linear.

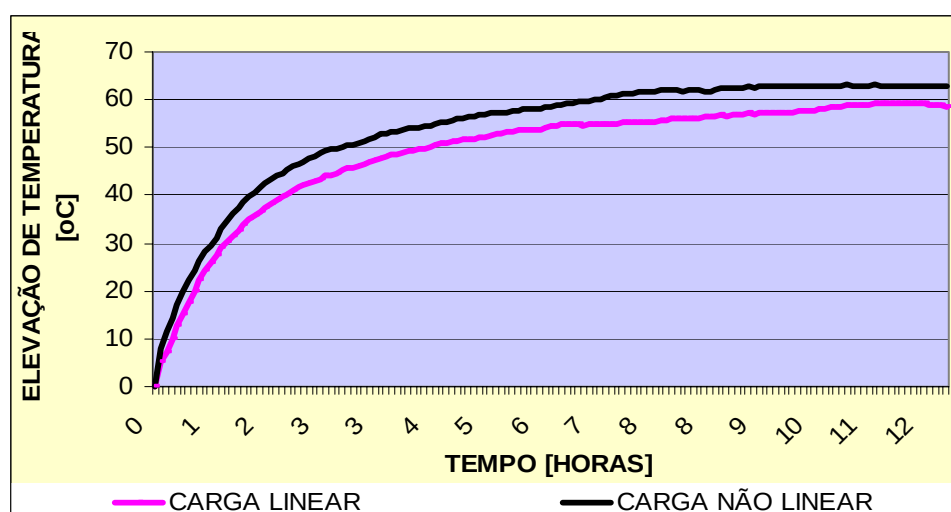


Figura 5.18 – Elevação da temperatura do enrolamento secundário (interna).

Tabela 5.3 – Elevação de temperatura do transformador.

Ensaio e Grandezas Térmicas	Ensaio com Carga Linear	Ensaio com Carga Não Linear
Elevação da Temp. do Enrolamento Externo AT [°C]	53,60	57,30
Elevação da Temp. do Enrolamento Interno BT [°C]	58,60	62,90
Elevação da Temp. do Núcleo [°C]	48,8	51,6

Observa-se que na tabela 5.3, mostram os valores das elevações de temperatura nos enrolamentos interno, externo e núcleo para a condição de operação com carga linear e não linear. Como era de se esperar, para as situações com carga linear ou não linear, a maior elevação de temperatura ocorreu no enrolamento interno (BT) do transformador.

Os resultados indicaram também que, o carregamento não linear é mais crítico, conduzindo a temperaturas mais elevadas. Este efeito, pode resultar em substanciais diminuições da vida útil do equipamento.

5.7 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS.

Com o objetivo de verificar a validade da metodologia desenvolvida, mostra-se o comparativo entre os valores determinados via simulação computacional e aqueles obtidos experimentalmente.

5.7.1 - Comparação Teórico/Experimental - carga linear

Para uma melhor compreensão analisou-se a elevação de temperatura do transformador com carga linear experimental e computacionalmente.

A figura 5.19 e tabela 5.4, retratam uma comparação de resultado experimental e computacional, onde a condição operacional consiste no suprimento de carga linear com medição de temperatura no enrolamento secundário (interno).

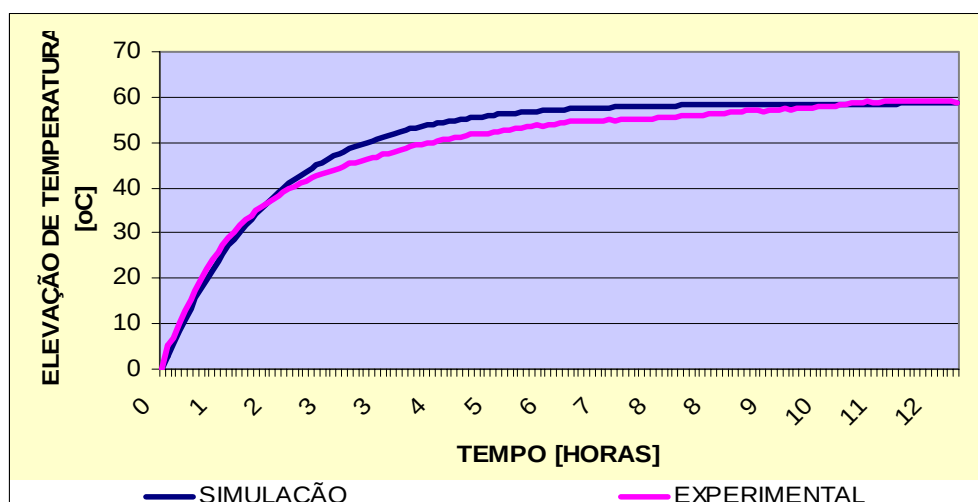


Figura 5.19 – Elevação de temperatura com carga linear no transformador.

Tabela 5.4 – Comparação com carga Linear do ensaio Experimental x Simulação.

Elevação de temperatura Teórico/Experimental (Secundário)		
Tipo de carga	Experimental [°C]	Simulação [°C]
Linear	58,60	58,54

5.7.2 - Comparação Teórico/Experimental – carga não linear

As figuras 5.20, 5.21 e a tabela 5.5 retratam uma comparação dos resultados obtidos no ensaio experimental e computacional, obtidos do suprimento com carga não linear. Deve-se observar que os resultados apresentados referem-se às elevações de temperatura presentes no enrolamento da baixa tensão.

Finalmente, deve-se salientar que as metodologias de cálculo empregadas para a obtenção das perdas totais e por correntes parasitas foram definidas no capítulo III.

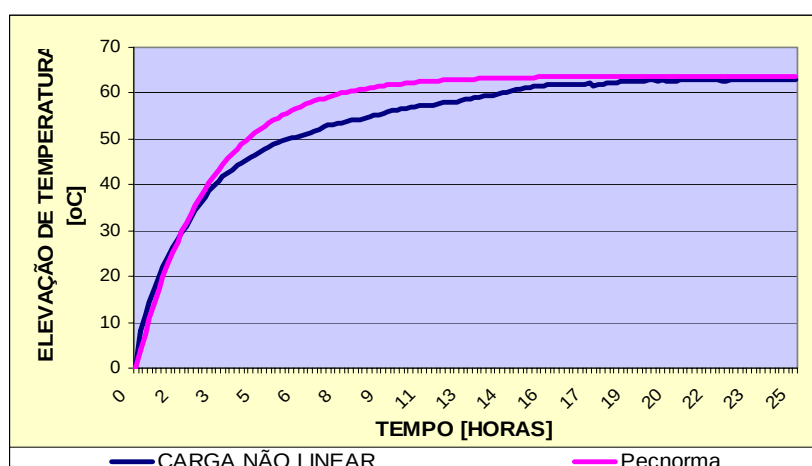


Figura 5.20 – Comparação elevação de temperatura experimental e computacional, enrolamento interno com carga não linear no transformador.

A figura 5.21 retrata uma comparação dos resultados experimental e computacional, com elevação de temperatura no enrolamento interno do transformador.

Considerou-se o cálculo das perdas por correntes parasitas no enrolamento pelo método corrigido computacional e carga não linear experimental.

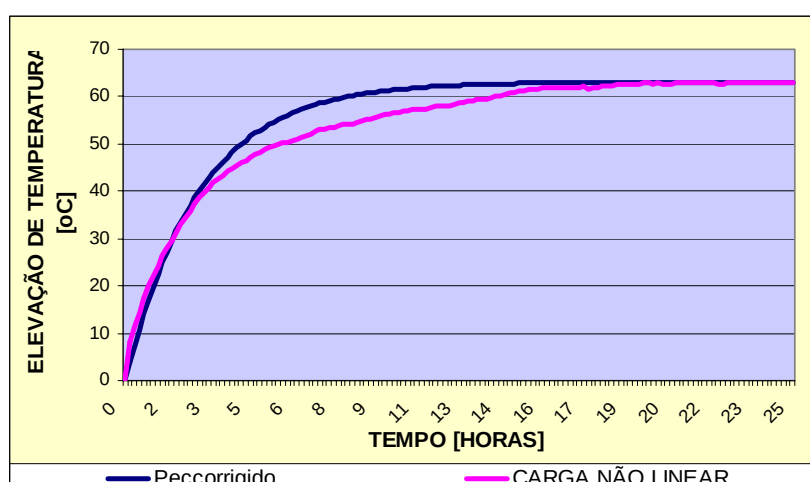


Figura 5.21 – Comparação elevação de temperatura experimental e computacional, enrolamento interno do transformador suprimindo carga não linear.

Tabela 5.5 – Comparação com carga não linear do ensaio experimental x simulada.

Elevação de temperatura Teórico/Experimental			
Tipo de Carga	Experimental [°C]	Simulação $P_{ECnorma}$ [°C]	Simulação $P_{ECcorrigido}$ [°C]
Não Linear	62,9	63,74	63,09

Observando-se as figuras e tabelas anteriores conclui-se que há uma boa correlação entre os resultados. Os valores em regime permanente para a simulação computacional e experimental atingiram valores bem próximos.

5.7.3 - Comparação Teórico/Experimental - carga linear e não linear

A tabela 5.6, a título de comparação, apresenta os valores obtidos através de simulações computacionais bem como aqueles medidos em laboratórios.

A tabela evidencia, uma vez mais, a ótima correlação entre os valores obtidos via simulação computacional com os resultados experimentais.

Tabela 5.6 – Comparação Experimental x Simulação (Linear x Não Linear).

Elevação de temperatura Teórico/Experimental			
Tipo de carga	Experimental [°C]	Simulação com $P_{ECnorma}$ [°C]	Simulação com $P_{ECcorrigido}$ [°C]
Não Linear	62,9	63,74	63,09
Linear	58,6	58,6	58,6
Diferença Percentual [%]	7	9	7,5

- Os resultados computacionais, obtidos a partir da metodologia já discutida, apresentaram valores próximos quando comparado com os níveis oriundos dos ensaios experimentais.
- A similaridade entre os resultados computacionais é justificado, pois a largura do condutor do transformador é bem pequena.
- Diante do exposto, conclui-se que para transformadores de condutor com dimensões menores, pode se aplicar a metodologia alternativa apresentada e discutida no capítulo III, para cálculo com boa precisão

das perdas totais. Para condutores com dimensões maiores esta suposição conduz a resultados conservativos.

5.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo finalizou-se com a validação dos procedimentos computacionais fundamentados na modelagem clássica, com aplicação do princípio da superposição, para a análise do comportamento térmico de transformadores.

Desenvolveu-se a apresentação dos resultados de elevações de temperatura em diferentes pontos do transformador, considerando condições lineares e não lineares de suprimento do transformador, a partir de simulações computacionais e de resultados experimentais.

As estratégias foram conduzidas em um transformador trifásico a seco, especialmente construído de forma a possibilitar a medição de temperatura nos principais pontos do seu interior. A carga linear consistiu-se de um arranjo de lâmpadas incandescentes, e para o carregamento não linear utilizou-se uma ponte conversora de seis pulsos.

Os resultados computacionais e experimentais obtidos foram suficientemente próximos para se concluir que a metodologia teórica apresentada se mostra apropriada aos objetivos pretendidos. Esta afirmativa se fundamenta nos resultados obtidos para os mais diferentes pontos do transformador.

Os resultados indicaram também que, como seria esperado, o carregamento não linear é mais crítico, conduzindo a temperaturas mais elevadas. Este efeito, como é conhecido, resulta em substanciais diminuições da vida útil do equipamento.

Finalmente, pode-se concluir que a modelagem matemática desenvolvida no domínio da frequência atende plenamente os objetivos que se pretendeu atingir.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

Esta dissertação estabeleceu como principal alvo de análise o transformador, que dentre os equipamentos existentes no sistema elétrico, apresenta-se com grande destaque, pela sua importância e grande quantidade de unidades em operação no sistema.

Os resultados experimentais usando o transformador a seco é uma contribuição significativa, tendo em vista o fato de que a maioria dos trabalhos na literatura tratam de transformadores com óleo isolante.

Dentro deste contexto, este capítulo tem por meta apresentar as principais conclusões obtidas nas investigações, assim como apresentar os resultados esperados dos temas propostos.

No Capítulo I, destacou-se o estado da arte com um panorama geral do transformador, procedeu-se com a introdução de uma proposta do tema de investigação dos aspectos relacionados ao comportamento térmico de transformadores submetido a situações de operação não-ideais, através de simulações computacionais e experimentais. Este capítulo finaliza com os principais objetivos e estrutura da dissertação.

O Capítulo II, de caráter introdutório e didático, constitui-se de um breve histórico do transformador a seco, enfocou questões relacionadas com os isolantes mais utilizados e o estudo a respeito da vida útil do transformador e sua redução quando de um aumento adicional de temperatura. Realizou-se também uma comparação com transformador seco e óleo isolante. Finalmente, construiu-se tabelas e gráficos mostrando a expectativa de vida da isolação.

No Capítulo III, fez-se um relato sobre as perdas totais em transformadores que são constituídas basicamente por duas parcelas: perdas a vazio (perdas no núcleo) e perdas em carga. Destaca-se o efeito “stray loss”, que afetam substancialmente o desempenho térmico e, conseqüentemente, diminuem a vida útil desses equipamentos. Confirmou-se que realmente as distorções harmônicas têm uma influência considerável no aumento das perdas. Apresentou-se o cálculo da máxima corrente de carregamento do transformador suprindo cargas não lineares. Concluiu-se que o método corrigido possibilita um maior carregamento sem afetar a vida útil do equipamento. Adotou-se o modelo térmico clássico para o estudo, em que o transformador é considerado como sendo um corpo homogêneo, e a temperatura obtida é aquela associada ao enrolamento. Finalmente,

apresentou-se equacionamento alternativo para o rendimento e vida útil, levando-se em conta as distorções harmônicas.

O Capítulo IV, constituiu-se de várias simulações computacionais feitas com a finalidade de verificar o aquecimento adicional provocado pelas componentes harmônicas de forma que não provoque a redução da vida útil do equipamento. Observou-se que a distorção da tensão de alimentação provoca um aumento nas perdas do núcleo do transformador, muito pouco afeta o equipamento em termos de elevação de temperatura e redução de vida útil. Entretanto à distorção harmônica total de corrente, apresentou pequenos acréscimos nas perdas em cargas do transformador afetando significativamente suas temperaturas de operação e conseqüentemente sua vida útil. O efeito das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos é muito mais crítico para valores altos de distorções harmônicas de correntes na qual o transformador encontra-se submetido. As perdas por correntes parasitas calculada pelo método corrigido, mostram uma possibilidade de um ganho de vida útil maior e um aumento do carregamento da corrente de carga, em comparação com os resultados apresentados pelo método da norma.

O Capítulo V, consistiu-se na validação dos procedimentos computacionais através da comparação com os resultados experimentais fundamentados na modelagem clássica para a análise do comportamento térmico de transformadores. Foram apresentados resultados de elevações de temperatura em diferentes pontos do transformador, considerando condições lineares e não lineares de funcionamento, a partir de simulações computacionais e de resultados experimentais. Os resultados computacionais e experimentais foram suficientemente próximos para se concluir que a metodologia teórica apresentada se mostra apropriada aos objetivos pretendidos.

Os resultados indicaram também que, o carregamento não linear é mais crítico, conduzindo a temperaturas mais elevadas. Este efeito, como é conhecido, resulta em substanciais diminuições da vida útil do equipamento.

Observou-se que a distorção harmônica de tensão praticamente não influi no comportamento térmico do transformador, enquanto que a distorção harmônica da corrente afeta significativamente as temperaturas de operação e a redução da vida útil do equipamento.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar a análise econômica correlacionando, perdas, elevação de temperatura, vida útil, “derating” e rendimento, em transformadores operando na presença de distorções harmônicas de corrente e tensão.
- Avaliação dos custos financeiros considerando-se as diferentes formas de tarifação de energia praticadas pelas concessionárias de energia elétrica.
- Avaliação estatística, e econômica dos custos associados as duas metodologias desenvolvidas neste trabalho, para cálculo das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Gunther E. W., Samotyj M., ***“Overview of voltage quality from a global approach in terms of power systems”***, VI Encontro Regional Latino-Americano de CIGRE – Foz do Iguaçu, 1995.
- [2] Domijan A., Heydt G.T., Meliopoulos A.P.S., Venkata S.S., West S., ***“Directions of research on Electric Power Quality”***, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, n° 1, January/1993.
- [3] ANSI/IEEE C57.110/D7, ***“Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, when Supplying Non-sinusoidal Load Currents”***, IEEE, NY, /febr. 1998.
- [4] Linden W. Pierce, ***“Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers”***, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, n° 4, July/August 1994.
- [5] Emanuel A. E., S.N. Makarov, ***“Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents”***, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA, 2000/IEEE.
- [6] Fuchs E. F., Yildirim D., and Grady W. M., ***“Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient P_{EC-R} , Derating of Single-Phase Transformers and Comparison with K-Factor Approach”*** IEEE Trans. On Power Delivery, Paper 99WM104, accepted for publication.

- [7] Yildirim D., Fuchs E-F, "***Measured Transformer Derating Comparison with Harmonic Loss Factor (FHL) Approach***," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.15, No.1, pp.186-91, Jan. 2000.
- [8] Emanuel A. E., "***The effect of harmonic randomness upon temperature rise of electrical equipment***", Proceedings of International Conferences on Harmonics in Power Systems, ICHIPS III, Nashville, Indiana, pp. 257-262, October/1988.
- [9] Santana J., Rezende M. J., Pierrat L., "***Thermal Loss of Life for Transformers Subjected to Random Load and Ambient Temperature***", PMAPS'97 Vancouver, B.C.
- [10] Patrick K. Dooley, Social IEEE, "***A Comparison of Liquid-Filled and Dry-Type Transformers for Industrial Applications***", IEEE Transactions on industry applications, vol. 34, n° 1, January/February 1998.
- [11] Pierrat L., Rezende M. José, Santana J., "***Power Transformers Thermal Model and Life Expectancy Under Changing Load***", IST-Secção Máquinas Eléctricas e Elec. Potência. Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa, Portugal.
- [12] McNutt W. J., "***Insulation thermal life considerations for transformer loading guides***", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, n° 1, January/1992.

- [13] Ali M., Eley C., Emsley A. M., Heywood R., Xaio X., ***“Measuring and understanding the ageing of kraft insulating paper in power transformers”***, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.12, n^o 3, pp. 28-34, may/jun 1996.
- [14] Funchs E.F., Yildirim D. and Batan T., ***“Innovative procedure for measurement of losses of transformers supplying nonsinusoidal loads”***, IEE proc. Gener Distrib. Vol. 146, no 6, November 1999.
- [15] Kerszenbaum I., Mazur A., M. Mistry, J. Frank, ***“Specifying Dry-Type Distribution Transformes for Solid-State Applications”***, IEEE transactions on Industry Applications, vol. 27, n^o 1, January/February 1991.
- [16] Sen P.K., ***“Application Guidelines for Dry-Type Distribution Power Transformers”***, IEEE, 2003.
- [17] Gray Alexander, Wallace G. A., ***“Eletrotécnica - Princípios e Aplicações”***, Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1964.
- [18] Souto O. C. N., ***“Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução sob Condições Não Ideais de Alimentação”***, Tese de Doutorado, UFU, Dezembro/2001.
- [19] Fuchs E. F., Roesler D. J., Kovacs K. P., ***“Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power Systems Voltage”***, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1 n^o 3, July 1988.
- [20] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ***“Transformadores de Potência secos, especificação”***, NBR 10295, maio/1988.

- [21] Transformadores TUSA, ***“Transmissão e Distribuição de Energia”***, Av. Eng. João Fernandes Gimenes Molina, 1745, Jundiaí, SP, 2002.
- [22] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ***“Aplicação de cargas em transformadores de potência”***, NBR 5416, Dezembro/1981.
- [23] Delaiba A. C., ***“Comportamento de Transformadores com Cargas Não Lineares: Uma Abordagem Analítica, experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos”***, Tese de Doutorado, USP, SP, 1997.
- [24] Montsinger V. M., ***“Loading Transformers by Temperature”***, AIEE Transaction, vol. 32, 1913.
- [25] IEEE, ***“IEEE guide for test procedures for thermal evaluation of insulation systems for solid-cast and resin-encapsulated power and distribution transformers”***, IEEE Std C57.12.60-1998.
- [26] Dixon R. R., ***“Thermal Aging Prediction from an Arrhenius Plot with Only Data Point”***, IEEE Transaction Electrical Insulation, vol. EI-15, nº 4, 1980, pp331-334, 1980.
- [27] Pacheco Cláudio R., ***“Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Cabos Elétricos Isolados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”***, Tese de Doutorado, UFU, Abril/2002.
- [28] IEEE- 57.110, ***“Recommended practice for establishing transformers capability when supplying non-sinusoidal load currents”***, June, 1986.
- [29] Thompson J. J., ***“On the Heat Produced by Eddy Currents in an Iron Plate Exposed to an Alternating Magnetic Field”***, The Electrician, April 8, 1982, pp.509-600.

- [30] Davies E. J., ***“Conduction and Induction Heating”***, Peter Peregrinus, 1990, page 69.
- [31] IEEE Std C57.134-2000, ***“IEEE Guide for Determination of Hottest-Spot Temperature in Dry - Type Transformers”***, 2000.
- [32] Garcia, Devair R., ***“Gerenciamento de Transformadores de Distribuição Operando em Ambientes Não Senoidais”***, Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, Fevereiro de 2002.
- [33] Oliveira, J. C.; Cogo J. R. e Abreu J. P. G., ***“Transformadores – Teoria e Ensaios”***, editora Edgard Blucher, 1989.
- [34] Emanuel A. E, Wang X, ***“Estimation of loss of life of power transformers supplying nonlinear loads”***, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n 3. March/1985.
- [35] Pierce L. W., ***“Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents”***, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, n° 3, pg. 633-645, May/June/1996.
- [36] Susa D.; Lehtonen M., Nordman, H. – ***“Dynamic Thermal modeling of distribution transformer”***, IEEE transactions on Power Delivery, vol. 20, n° 3, july 2005.
- [37] Bishop, M. T.; Gilker, C.- ***“Portable harmonics meter evaluates transformer heating”*** Computer Applications in Power System, pp. 41-44, October 1992.
- [38] Jardini J. A., Tahan C. M. V., Ferrari E. L., ***“Seleção de Transformadores por critérios econômicos e de vida útil”***, Revista Eletricidade Moderna, Março/1997.