

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Cálculo das Perdas Técnicas dos
Transformadores de Distribuição,
Operando em Ambiente Não-Senoidal”**

Luciano Dos Santos

Orientador

Prof. Dr. José Carlos Rossi

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP - como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Ilha Solteira (SP), Maio de 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

S237c	<p>Santos, Luciano dos</p> <p>Cálculo das perdas técnicas dos transformadores de distribuição, operando em ambiente não-senoidal / Luciano dos Santos. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006 xxii, 97 p. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006</p> <p>Orientador: José Carlos Rossi Bibliografia: p. 94-97</p> <p>1. Transformadores elétricos. 2. Distorções harmônicas. 3. Perdas ôhmicas. 4. Vida útil.</p>
-------	---

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Cálculo das Perdas Técnicas dos Transformadores de Distribuição, Operando em Ambiente Não Senoidal

AUTOR: LUCIANO DOS SANTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE CARLOS ROSSI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE CARLOS ROSSI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

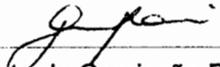
Prof. Dr. FABIO TOSHIKI WAKABAYASHI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. KLEIBER DAVID RODRIGUES

Departamento de Engenharia Elétrica/Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 02 de maio de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JOSE CARLOS ROSSI

DEDICATÓRIA

**À Deus, por conceder-me o dom
da vida e a alegria de viver esse
momento.**

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus amados pais Gerson dos Santos e Cecília Maria dos Santos.

Agradecimentos

À UNESP – Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira.

Ao professor José Carlos Rossi, não só pela orientação precisa, mas também pela amizade, incentivo e confiança em mim depositada.

Aos professores Fábio Toshiaki Wakabayashi e Luiz Carlos Origa de Oliveira, pela participação direta na elaboração desse trabalho, pelo incentivo, pela grande amizade e presteza que sempre me proporcionaram.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento sem o qual esse trabalho não seria possível.

À empresa WR Projetos e Construções da cidade de Três Lagoas, pelo empréstimo da unidade transformadora de 15 kVA necessária para a realização dos ensaios.

Aos professores Júlio Borges e Carlos Alberto Canesin pela grande amizade e pelas contribuições dadas a esse trabalho.

Aos meus irmãos Edson dos Santos e Daniella Maria dos Santos, pelo companheirismo e amor que sempre me proporcionaram.

Ao companheiro de laboratório Rodrigo A. Nunes de Oliveira, pelas contribuições dadas a esse trabalho e por todo apoio e amizade.

Ao meu primo Cleberson Ricardo Bueno, pelo empréstimo do veículo necessário para buscar e entregar a unidade transformadora utilizada nos ensaios.

Aos companheiros de laboratório Wilson, Ricardo, Flávio, Fausto, Tiago e Guilherme por todo apoio e amizade.

A todos os amigos da pós-graduação pela agradável convivência em especial Tadao, Rodrigo e Sérgio.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação, Adelaide Amaral dos S. Passipierri, Maria de Fátima Sabino e Onilda Akasaki, pelo excelente trabalho desenvolvido.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Elétrica, José Anderson Anhussi, Adílson Antônio Palombo e Valdemir Chaves, pela plena disposição e pelos préstimos realizados quando da implementação laboratorial do trabalho.

Aos funcionários Deoclécio e Beto pelo excelente trabalho desenvolvido.

A todos os professores do departamento de engenharia elétrica da UNESP – Campus de Ilha Solteira pela contribuição na minha formação da pós-graduação.

A todos os professores do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela contribuição na minha formação da graduação.

Sumário

Lista de Tabelas.....	x
Lista de Figuras.....	xiii
Simbologia.....	xvi
Resumo.....	xxi
Abstract.....	xxii

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

I.1 – Introdução.....	01
I.4 – Estrutura da Dissertação.....	18

CAPÍTULO II

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CA DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR DE 15 kVA, ATRAVÉS DE ANÁLISE EXPERIMENTAL

II.1 - Introdução.....	20
II.2 - Montagem Experimental Para Execução do Ensaio.....	21
II.2.1 - Equipamentos Utilizados e Suas Respectivas Funções.....	24
II.2.2 - Procedimentos Experimentais.....	29
II.2.3 - Considerações Experimentais.....	29
II.3 – Equacionamento Utilizado.....	32
II.4 - Resultados Experimentais.....	34
II.5 - Conclusões.....	39

CAPÍTULO III

CÁLCULO DAS PERDAS NO COBRE DOS TRANSFORMADORES DE

DISTRIBUIÇÃO EM AMBIENTES NÃO-SENOIDAIIS, ATRAVÉS DA DHT_1 (DISTRORÇÃO

HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE).

III.1 - Introdução	40
III.2 - Análise do Comportamento das Perdas em Transformadores em Função do DHT_1	41
III.2.1 - Espectros Harmônicos Utilizados.....	43
III.3 – Equação Proposta Para Simplificação do Cálculo das Perdas do Transformador em Função do DHT_1	57
III.3.1 – Desenvolvimento da Modelagem Proposta.....	57
III.3.2 – Metodologia para Calibração da Constante α	62
III.3.3 – Determinação da Constante α do Transformador de 10 kVA.....	63
III.3.4 – Determinação da Constante α do Transformador de 50 kVA.....	66
III.3.5 – Determinação da Constante α do Transformador de 15 kVA.....	68
III.4 – Análise das Perdas no Cobre dos Transformadores.....	71
III.4.1 – Análise das Perdas no Cobre para o Transformador 10 kVA.....	71
III.4.2 – Análise das Perdas no Cobre para o Transformador 50 kVA.....	73
III.4.3 – Análise das Perdas no Cobre para o Transformador 15 kVA.....	74
III.5 – Conclusões.....	75

CAPÍTULO IV

4 – CONCLUSÕES GERAIS.....	78
----------------------------	----

APÊNDICE A

TABELAS DOS ESPECTROS HARMÔNICOS REFERENTES ÀS MEDIÇÕES REALIZADAS

A.1 – Dados das Medições.....	82
A.1.1 – Medição 01.....	82
A.1.2 – Medição 02.....	83
A.1.3 – Medição 03.....	84
A.1.4 – Medição 04.....	85
A.1.5 – Medição 05.....	86
A.1.6 – Medição 06.....	87
A.1.7 – Medição 07.....	88
A.1.8 – Medição 08.....	89
A.1.9 – Medição 09.....	90
A.1.10 – Medição 10.....	91
A.1.11 – Medição 11.....	92
A.1.12 – Medição 12.....	93

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas.....94

LISTA DE TABELAS

Número	Descrição	Página
2.01	Ângulos de defasagem para as harmônicas múltiplas de três.	31
2.02	Grandezas elétricas oriundas das medições realizadas na atividade experimental.	35
2.03	Valores médios de resistência entre as três medições realizadas para cada ordem harmônica.	37
3.01	Medições de resistência CA de transformadores de distribuição da 1ª até 19ª Ordem Harmônica.	42
3.02	Dados complementares dos transformadores analisados	43
3.03	Distorções harmônicas totais de corrente (Período 01 a 06) oriundas das medições em ramais de uma concessionária do estado de São Paulo.	44
3.04	Variação do erro quadrático em função do valor de α para a Unidade Transformadora de 10 kVA.	65

3.05	Varição do erro quadrático em função do valor de α para a Unidade Transformadora de 50 kVA	67
3.06	Varição do erro quadrático em função do valor de α para a Unidade Transformadora de 15 kVA	70
A.01	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 01, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.	82
A.02	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 01, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	83
A.03	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 03, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	84
A.04	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 04, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	85
A.05	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 05, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	86
A.06	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 06, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.	87

A.07	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 07, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	88
A.08	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 08, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	89
A.09	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 09, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.	90
A.10	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 10, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.	91
A.11	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 11, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.	92
A.12	Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 12, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.	93

LISTA DE FIGURAS

Número	Descrição	Página
1.01	Relação entre as resistências CA e CC em função da frequência harmônica para condutores de diferentes secções.	8
1.02	Efeitos skin e proximidade em função da frequência para um condutor de secção circular de 95 mm ² .	9
1.03	Resistência do enrolamento de alta tensão em função da frequência.	10
1.04	Resistência do enrolamento de baixa tensão em função da frequência.	11
2.01	Arranjo experimental – determinação da resistência CA do transformador.	21
2.02	Aquisição de dados e fonte de alimentação utilizada no ensaio.	22
2.03	Transformador utilizado no ensaio.	23
2.04	Transformador de 15 kVA utilizado no experimento.	24
2.05	Fonte de alimentação utilizada no ensaio.	25
2.06	Diagrama multifilar da montagem experimental do ensaio curto-circuito.	29
2.07	Comportamento da resistência CA do transformador de 15 kVA em função da frequência.	38

3.01	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 18/12/2003 (23:40) a 25/12/2003 (00:20) – quinta-feira a quinta-feira.	45
3.02	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 06/01/2004 (17:10) a 06/01/2004 (21:50) – terça-feira	46
3.03	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 06/01/2004 (20:00) a 06/01/2004 (21:50) – terça-feira	47
3.04	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 04/01/2004 (03:10) a 04/01/2004 (04:10) – domingo.	48
3.05	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 07/01/2004 (01:10) a 07/01/2004 (02:20) – quarta-feira.	49
3.06	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 18/12/2003 (18:58) a 18/12/2003 (21:44) – quinta-feira.	50
3.07	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 01/01/2004 (00:20) a 01/01/2004 (01:30) – quinta-feira.	51
3.08	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 03/01/2004 (13:20) a 03/01/2004 (17:20) – sábado.	52
3.09	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 04/01/2004 (13:30) a 04/01/2004 (17:30) – domingo.	53

3.10	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 27/12/2003 (08:15) a 27/12/2003 (09:38) – sábado.	54
3.11	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 28/12/2003 (01:30) a 28/12/2003 (03:30) – sábado	55
3.12	Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 18/12/2003 (16:10) a 18/12/2003 (18:50) – quarta-feira.	56
3.13	Gráfico de comparação do produto entre a equação 2.05 e uma quadrática com uma exponencial.	59
3.14	Detalhe do Ponto de valor mínimo do erro quadrático em função do valor de α para a unidade transformadora de 10 kVA (intervalo (0,0 a 4,0)).	64
3.15	Detalhe do Ponto de valor mínimo do erro quadrático em função do valor de α para a unidade transformadora de 50 kVA (intervalo (0,0 a 4,0)).	66
3.16	Detalhe do Ponto de valor mínimo do erro quadrático em função do valor de α para a unidade transformadora de 15 kVA (intervalo (0,0 a 4,0)).	69
3.17	Gráfico das Perdas No Cobre Transformador 10 kVA Utilizando as Equações Convencional e Proposta.	72
3.18	Gráfico das Perdas No Cobre Transformador 50 kVA Utilizando as Equações Convencional e Proposta.	73
3.19	Gráfico das Perdas No Cobre Transformador 15 kVA Utilizando as Equações Convencional e Proposta.	74

SIMBOLOGIA

1 - Símbolos Usados em Expressões Matemáticas

Símbolo	Descrição	Unid.
P_{jn}	Perdas totais devido ao efeito Joule nos enrolamentos do transformador para condições de operação não-senoidais.	W
$R_n(p)$	Resistência do enrolamento primário para o n-ésimo harmônico.	Ω
$R_n(s)$	Resistência do enrolamento secundário para o n-ésimo harmônico.	Ω
$I_n(p)$	Valor eficaz da n-ésima corrente harmônica do primário.	A
$I_n(s)$	Valor eficaz da n-ésima corrente harmônica do secundário.	A
n	Ordem harmônica.	--
P_{EC}	Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para condições de operação não-senoidais.	W
P_{OSL}	Perdas suplementares (adicionais) nas partes metálicas (núcleo, paredes do tanque, etc.) para condições de operação não-senoidais.	W
P_{cc-h-T}	Valor da potência ativa de curto-circuito total do transformador para cada ordem harmônica.	W
P_{cc-h-f}	Valor da potência ativa de curto-circuito total por fase do transformador para cada ordem harmônica.	W

$I_{1cc-h-f}$	Valor eficaz da corrente primária de curto-circuito para cada ordem harmônica na fase.	A
$I_{1cc-h-L}$	Valor eficaz da corrente primária de curto-circuito para cada ordem harmônica na linha.	A
R_h	Valor da resistência CA para cada ordem harmônica vista pelo primário.	Ω
R_h'	Valor da resistência CA para cada ordem harmônica vista pelo primário e referida ao secundário.	Ω
N_1	Número de espiras do enrolamento primário.	--
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário.	--
P_T	Perdas totais no cobre para condição não-senoidal.	W
P_1	Perdas no cobre em função apenas da componente fundamental.	W
DHT_1	Distorção harmônica total de corrente.	--
α	Constante de calibração que depende da capacidade e das características construtivas do transformador.	--
S	Valor do erro entre os cálculos efetuados através da equação proposta pelo presente trabalho e a equação proposta pela literatura;	--
a	Valor das perdas obtido através dos cálculos utilizando a equação proposta pela literatura.	W
b	Valor das perdas obtido através dos cálculos utilizando a equação proposta pelo presente trabalho.	W
i	Número do intervalo da medição.	--

n	Valor da quantidade de intervalos.	--
P_{HI}	Perdas por histerese para freqüência fundamental.	W
λ	Constante do material do núcleo.	--
f	Freqüência de alimentação da rede.	Hz
V_1	Tensão eficaz da fundamental.	V
N	Número de espiras do enrolamento.	--
ω	Velocidade angular.	rad/s
P_{F1}	Perdas por correntes parasitas no núcleo para a freqüência fundamental.	W
λ	Condutividade elétrica do núcleo.	eV
S	Área da seção transversal do núcleo.	m ²
P_{cobre}	Perdas no cobre para condição senoidal.	W
R_p, R_s	Resistências dos enrolamentos primário e secundário respectivamente.	Ω
I_p, I_s	Corrente eficaz nos enrolamentos primário e secundário respectivamente.	A
P_{EC}	Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para condições senoidais.	W
P_{OSL}	Perdas suplementares (adicionais) nas partes metálicas (núcleo, paredes do tanque, etc.) para condições senoidais.	W
P_{Hn}	Perdas totais por histerese para um suprimento distorcido.	W
V_n	Tensão eficaz do n-ésimo harmônico.	V
φ_n	Ângulo de fase do n-ésimo harmônico;	°

S	Coeficiente de Steimmetz que depende do material do núcleo.	--
P_{Fn}	Perdas por correntes parasitas no núcleo para um suprimento distorcido.	W
P_{F1}	Perdas por correntes parasitas no núcleo para a frequência fundamental.	W

2 - Símbolos de Unidades de Grandezas Físicas do SI (Sistema Internacional de Unidades).

Ω	Ohm.
A	Ampère.
Hz	Hertz
F	Farad.
m	Metro.
rad/s	Radianos por Segundo.
s	Segundo.
V	Volt.
W	Watt.

3 – Acrônimos e Abreviaturas.

CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente contínua.
CI	Circuito Integrado.
DHT _I	Distorção Harmônica Total de Corrente.
DHI _I	Distorção Harmônica Individual de Corrente.
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
UNESP	Universidade Estadual Paulista.

4 – Simbologias de Unidades de Grandezas Físicas Fora do SI (Sistema Internacional de Unidades), Usados Pela Prática.

°	Grau trigonométrico.
°C	Graus Celsius.

RESUMO

Este trabalho está direcionado à implementação de uma modelagem que venha possibilitar a realização dos cálculos das perdas técnicas no cobre do transformador trifásico de distribuição operando em condições não-senoidais, através da utilização do valor médio de Distorção Harmônica Total de Corrente drenada por suas cargas. Essa implementação visa facilitar a obtenção dos valores das perdas técnicas para múltiplas unidades transformadoras. Para atingir o objetivo mencionado, realizou-se um ensaio em curto-circuito através de ensaios experimentais aplicadas em uma unidade transformadora trifásica de distribuição com 15 kVA de capacidade. A fonte trifásica de alimentação utilizada na atividade proporciona o ajuste de tensão e da frequência, possibilitando obter os valores de resistências CA dos enrolamentos do transformador para diferentes ordens harmônicas. Com o propósito de validar esta nova proposta, foi realizada uma análise confrontando-se os dados obtidos através da modelagem proposta neste trabalho e de uma outra bastante difundida pela literatura atual. Os cálculos foram efetuados utilizando-se dados de distorções harmônicas de correntes oriundas de medições de ramais de distribuição. Através da comparação dos resultados obtidos é possível verificar a validade da modelagem proposta.

ABSTRACT

This work is addressed to the implementation of a modelling that comes to make possible the calculations of the technical losses in the copper of three-phase distribution transformers operating under non-sinusoidal conditions, using the medium value of Total Current Harmonic Distortion. This implementation seeks to provide easiness in the obtaining of the values of the technical losses for multiple transformer units in non-sinusoidal environment. Aiming to reach the mentioned objective, it was carried out a test in short circuit through applied experimental activities in a three-phase distribution transformer unit with 15 kVA capacity. The three-phase source used in the activity provides the voltage and the frequency adjustment, making possible to obtain the values of ca resistances of the windings of the transformer for some harmonic orders. With the purpose of validating this new proposal, an analysis was accomplished being confronted the data obtained through the modelling proposed in this work with another one quite spread in the current literature. The calculations were carried out using current harmonic distortion data of measurements in distribution branch lines. Through the comparison of the obtained results it is possible to verify the validity of the proposed modelling.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – Introdução

Dentre os vários equipamentos que compõe os sistemas elétricos, se destacam os transformadores de potência. Esse tipo de equipamento é de grande importância, sendo utilizado para proporcionar nível de tensão adequado para o transporte de energia elétrica e também para o funcionamento dos equipamentos elétricos.

Os transformadores são “máquinas elétricas que transformam energia elétrica em energia elétrica, mantendo inalteradas quase todas as características da energia elétrica de saída em relação à energia elétrica de entrada, com exceção dos valores da tensão e corrente, independentemente do valor da carga que alimentam”.

As características mantidas inalteradas são a forma de onda da tensão e da corrente, a frequência, o ângulo de fase, a seqüência de fases, etc...

O transformador possui três componentes indispensáveis à sua operação: enrolamento primário, enrolamento secundário e núcleo.

Em condições normais de operação, os transformadores apresentam perdas de energia elétrica nesses componentes, que são representados através de elementos de circuitos elétricos (resistências e indutâncias) formando seu circuito equivalente [1].

Existem dois grupos fundamentais de perdas nos transformadores, sendo denominadas perdas no ferro e perdas no cobre, as quais estão associadas ao núcleo magnético e aos condutores, respectivamente [1].

As perdas no núcleo ou no ferro são constituídas por duas parcelas, sendo a primeira devido ao fenômeno de histerese e a outra, correspondente às correntes parasitas que circulam no núcleo, também denominada perda por Foucault. Estas perdas são pertinentes aos dispositivos eletromagnéticos que envolvem fluxos variáveis no tempo para sua operação.

Admitindo-se a frequência de operação constante, as perdas no núcleo dos transformadores dependem unicamente da tensão de alimentação. Considerando-se que a tensão varia dentro de limites estreitos e controlados é comum admitir-se as perdas no núcleo como sendo constantes ao longo de toda a vida útil do transformador. Por esta razão as perdas no núcleo são denominadas simplesmente como perdas constantes.

É importante considerar essas perdas com atenção, pois têm uma influência importante na elevação da temperatura, na eficiência e na capacidade dos dispositivos eletromagnéticos.

As perdas por histerese ocorrem no núcleo magnético dos transformadores que estão naturalmente associadas ao processo de histerese. A seguir será apresentada a expressão que fornece estas perdas em função da tensão de alimentação do transformador [1].

A equação (1.01) permite quantificar as perdas relacionadas ao fenômeno em questão:

$$P_{H1} = \lambda \cdot f^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{N S \omega} \cdot V_1 \right)^2 \quad (1.01)$$

Sendo:

P_{H1} - Perdas por histerese para frequência fundamental;

λ - Constante do material do núcleo;

f - Frequência de alimentação da rede;

V_1 - Tensão eficaz da fundamental;

S - Área da seção transversal do núcleo;

N - Número de espiras do enrolamento;

ω - Velocidade angular.

As perdas por correntes parasitas são também chamadas de perdas por Foucault. Esse termo é empregado para descrever as perdas de potência associadas com as correntes circulantes que existem em percursos fechados dentro do corpo de um material ferromagnético e causam uma perda indesejável por aquecimento.

Essas correntes circulantes são geradas pelas diferenças de potencial magnético existentes por todo o corpo do material, devido à ação do fluxo variável. Se o circuito magnético for composto de ferro sólido, a perda de potência resultante é significativa porque as correntes circulantes encontram relativamente pouca resistência. Para se aumentar de forma significativa a resistência encontrada por essas correntes parasitas, o circuito magnético é invariavelmente composto de lâminas finas sempre que o dispositivo magnético é tal que um fluxo variável se difunde nele, em operação normal. Esse é o caso com transformadores e também em todos os motores e geradores em CA. Para uma tensão senoidal, estas perdas são determinadas pela equação 1.02, conforme descrito em [1].

$$P_{F1} = \lambda \cdot f^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{N S \omega} \cdot V_1 \right)^2 \quad (1.02)$$

Sendo:

- P_{F1} - Perdas por correntes parasitas no núcleo para a frequência fundamental;
- λ - Condutividade elétrica do núcleo;
- f - Frequência de alimentação da rede;
- V_1 - Tensão eficaz da fundamental;
- S - Área da seção transversal do núcleo;
- N - Número de espiras do enrolamento;
- ω - Velocidade angular.

Conforme mencionado anteriormente, as perdas nos enrolamentos são denominadas perdas no cobre e possuem duas componentes. A principal parcela se refere às perdas por efeito Joule devidas à resistência ôhmica dos enrolamentos. Essas perdas variam de acordo com o aumento ou diminuição da carga no transformador. Mais precisamente com o quadrado da corrente drenada pela carga. A outra parcela é consequência do fluxo de dispersão do transformador, que dá origem à circulação de correntes parasitas em seus condutores e nas suas partes metálicas. Estas perdas dependem da corrente, do carregamento elétrico e da geometria dos condutores das bobinas. Sua determinação analítica não é simples, entretanto sua contribuição para as perdas totais no cobre, quando da operação normal dos transformadores é relativamente pequena. Estas perdas são obtidas juntamente com as perdas no cobre através do ensaio experimental de curto-circuito [2].

Considerando-se os enrolamentos primário e secundário, tem-se:

$$P_{cobre} = R_p I_p^2 + R_s I_s^2 + P_{EC} + P_{OSL} \quad (1.03)$$

Sendo:

P_{cobre} - Perdas no cobre para condição senoidal;

R_p, R_s - Resistências dos enrolamentos primário e secundário respectivamente;

I_p, I_s - Corrente eficaz nos enrolamentos primário e secundário respectivamente;

P_{EC} - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para condições senoidais;

P_{OSL} - Perdas suplementares (adicionais) nas partes metálicas (núcleo, paredes do tanque, etc.) para condições senoidais.

Atualmente os transformadores são alvos de diversos estudos que visam analisar as condições elétricas, térmicas, a vida útil e também as perdas técnicas, quando estes estão suprindo cargas não-lineares. A grande utilização de cargas não-lineares é consequência da atual e crescente evolução tecnológica da eletrônica de potência. Isto se deve a vários fatores, dentre as quais, pode-se citar:

- A fabricação de componentes eletrônicos com maiores velocidades e capacidades de interrupção de tensão e condução de corrente;
- A fabricação de CI's (Circuito Integrados) cada vez mais compactos, eficientes e baratos;
- Constante crescimento do mercado de utilidades domésticas alimentadas por circuitos com tecnologia baseada na eletrônica de potência.

Hoje em dia já se fala em medir o desenvolvimento de um país através do nível de utilização da eletrônica de potência. Quanto maior a utilização de cargas alimentadas através da eletrônica de potência, maior é o seu crescimento econômico [3].

Essa evolução tecnológica contribui para uma imensa utilização de equipamentos tais como retificadores, inversores, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, acionamento a frequências e velocidades variáveis, etc, cujas características das suas correntes drenadas são não-lineares, ou seja, a forma de onda da corrente é não-linear.

Estes equipamentos apresentam algumas vantagens técnicas e econômicas, mas por outro lado, eles podem eventualmente provocar o comprometimento do sistema elétrico supridor, vindo a afetar a qualidade da energia elétrica fornecida, em função das distorções harmônicas provocadas nas tensões dos barramentos de alimentação [4].

O termo “Qualidade de Energia Elétrica” está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente. Esta designação também se aplica as interrupções de natureza permanente ou transitória, que afetam o desempenho da transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Este assunto atualmente tem despertado cada vez mais o interesse por parte das concessionárias, consumidores e pesquisadores [4].

Considerando-se que o transformador é o elemento de ligação entre o sistema elétrico e estes equipamentos, o mesmo também é submetido às distorções harmônicas oriundas da não-linearidade das correntes drenadas por estas cargas, podendo estes ser encontrados em ambientes residenciais, comerciais e principalmente nos industriais. Devido a grande diversidade de equipamentos com características não-lineares supridas pelo sistema elétrico, pode-se dizer que atualmente é quase impossível encontrar transformadores operando em ambientes com processamento de formas de onda puramente senoidais.

Como apresentado em [4-9], as harmônicas nas tensões e nas correntes (condições de operação não-senoidal) contribuem para o aumento das perdas técnicas dos transformadores.

Como consequência direta, tem-se a diminuição do carregamento máximo admissível, a diminuição da vida útil e o aumento dos custos operacionais [9].

O aumento das perdas técnicas nos enrolamentos dos transformadores é provocado pela presença de alguns fenômenos físicos que se manifestam nos enrolamentos do transformador com maior intensidade quando o mesmo opera alimentando cargas que drenam correntes com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental (correntes harmônicas).

Existem dois fenômenos físicos que estão presentes simultaneamente nos enrolamentos de um transformador. O efeito pelicular e o efeito proximidade.

O fenômeno denominado por **efeito pelicular ou efeito skin** acontece porque a indutância própria através das seções retas do condutor não é uniforme. Como o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo que a superfície, sua indutância (reatância) nesse ponto, ou seja, no centro, é maior que na superfície fazendo com que a corrente circule com menor densidade no centro do condutor, e assim, aumenta-se a resistência do condutor. Esse aumento dependerá das características físicas do condutor e também do valor da frequência da corrente que por ele circula.

O **efeito proximidade** acontece devido à interação entre dois ou mais condutores. Nesse caso, os campos magnéticos dos condutores próximos interagem entre si, distorcendo a distribuição de correntes dos mesmos e, conseqüentemente, aumentando-se o valor da resistência CA do condutor. Esse também aumento dependerá das características físicas do condutor, do valor da frequência da corrente que por ele circula e principalmente da quantidade de condutores próximos entre si.

Em [10], são apresentados estudos no sentido de incorporar variações nos modelos de transformadores convencionais e especiais no simulador SABER. São realizados estudos com transformadores monofásicos e trifásicos no domínio do tempo, considerando os efeitos da não-linearidade no núcleo e das capacitâncias de fuga presentes nestes dispositivos.

O trabalho ainda apresenta também uma análise do efeito da variação de frequência nos parâmetros resistivos do circuito equivalente do transformador, com o intuito de verificar a necessidade ou não da inclusão desses efeitos na sua modelagem.

Para ilustrar melhor esses fenômenos podemos recorrer figura 1.01 extraída da referência [10], que mostra a relação entre as resistências CA e CC em função da frequência para diferentes condutores.

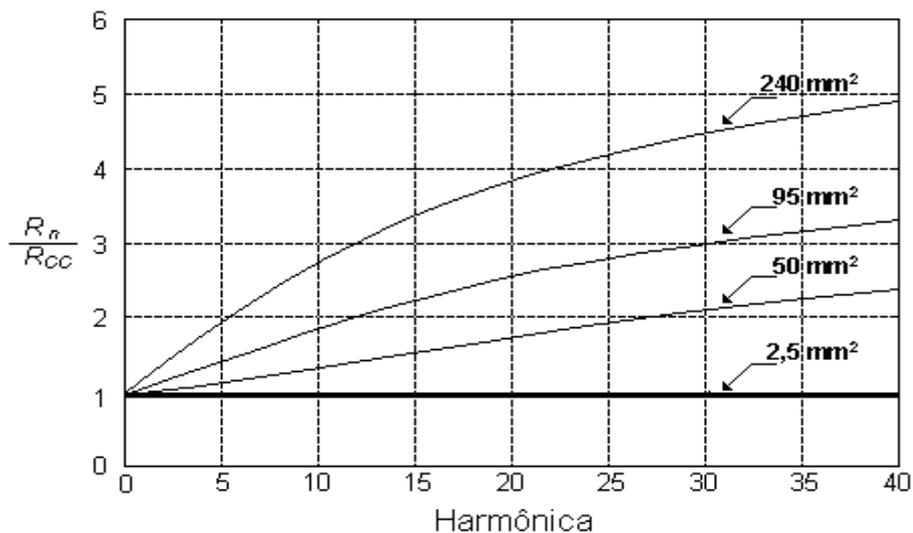


Figura 1.01 – Relação entre as resistências CA e CC em função da frequência harmônica para condutores de diferentes seções.

Nota-se na figura 1.01 que a elevação da resistência CA em função das altas ordens harmônicas para cabos de pequena seção transversal, são praticamente desprezíveis. Já para os cabos de seções maiores, os fenômenos aqui abordados aumentam consideravelmente.

A figura 1.02 permite verificar o comportamento dos efeitos mencionados (Pelicular e Proximidade) separadamente, em função da frequência para um cabo de 95 mm^2 .

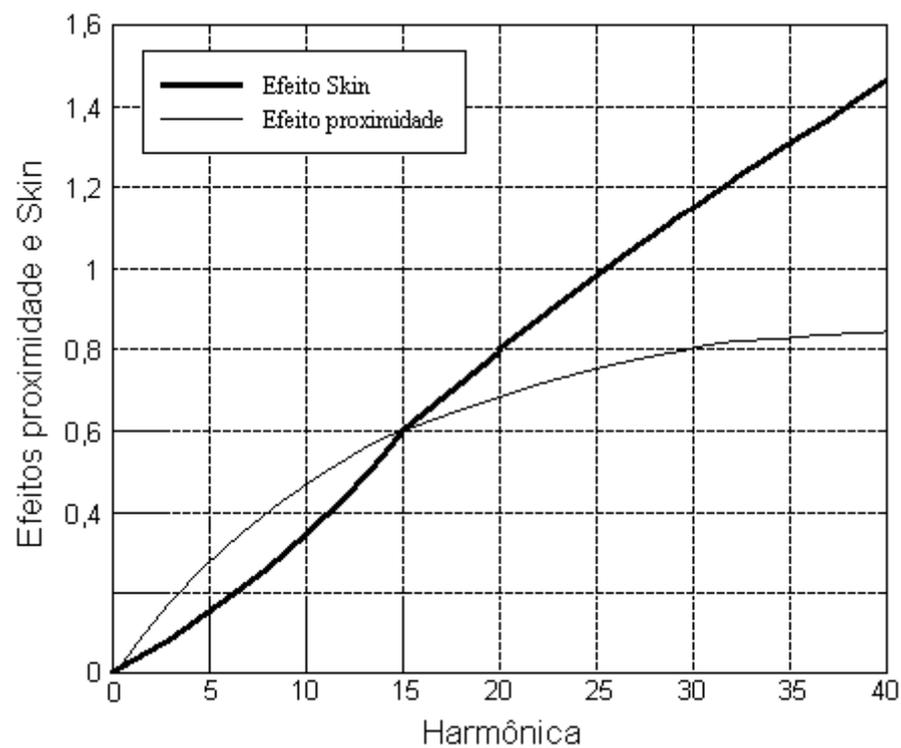


Figura 1.02 – Efeitos skin e proximidade em função da frequência para um condutor de secção circular de 95 mm^2 .

Com base na figura 1.02, pode-se constatar que o efeito Skin e o efeito Proximidade em um cabo de 95 mm² apresentam elevações semelhantes até aproximadamente a 15ª ordem harmônica. Porém, observa-se também que a partir desta ordem harmônica as amplitudes dos fenômenos começam a se diferenciar, sendo que o efeito Skin possui uma maior elevação em função do aumento da ordem harmônica.

Ressalta-se que esses efeitos se manifestam em todos os condutores. Entretanto condutores com pequenas secções transversais necessitam de correntes com elevadas frequências para que o efeito venha manifestar. A manifestação desse efeito será diferenciada para condutores com secções transversais diferentes mesmo que a frequência das correntes que circulam pelos mesmos seja igual.

As figuras 1.03 e 1.04 também extraídas de [10], ilustram as variações das resistências ôhmicas dos enrolamentos de alta e baixa tensão respectivamente, em função da frequência para um transformador Siemens de 300 KVA.

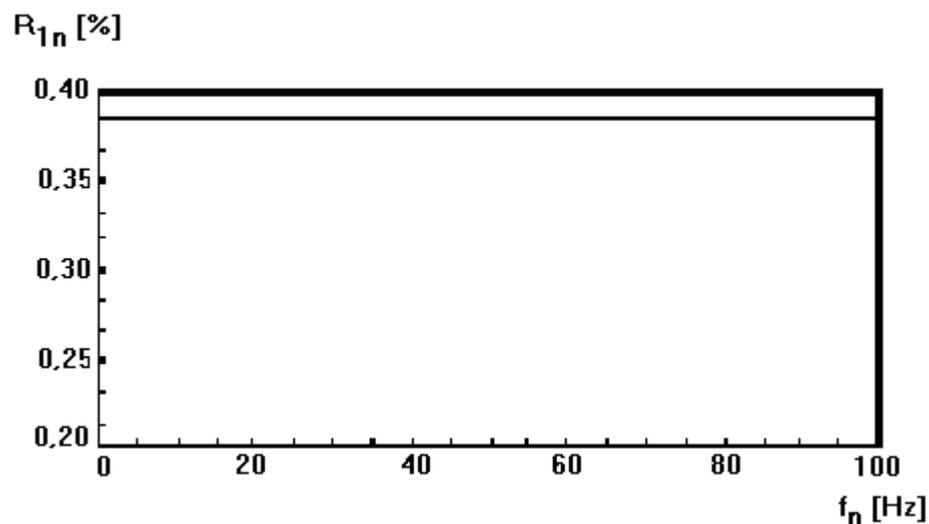


Figura 1.03 – Resistência do enrolamento de alta tensão em função da frequência.

A figura 1.03 mostra que a resistência percentual do enrolamento de alta tensão é praticamente invariável com o aumento da frequência. Isso é justificado pela pequena secção transversal do enrolamento de alta tensão desse transformador. Contrário ao enrolamento de alta tensão, o enrolamento de baixa tensão indica uma significativa alteração com a frequência, justificada pela necessidade desse enrolamento possuir condutor com grande secção transversal. O aumento da resistência para o enrolamento de baixa tensão transformador mencionado pode ser visualizado na figura 1.04.

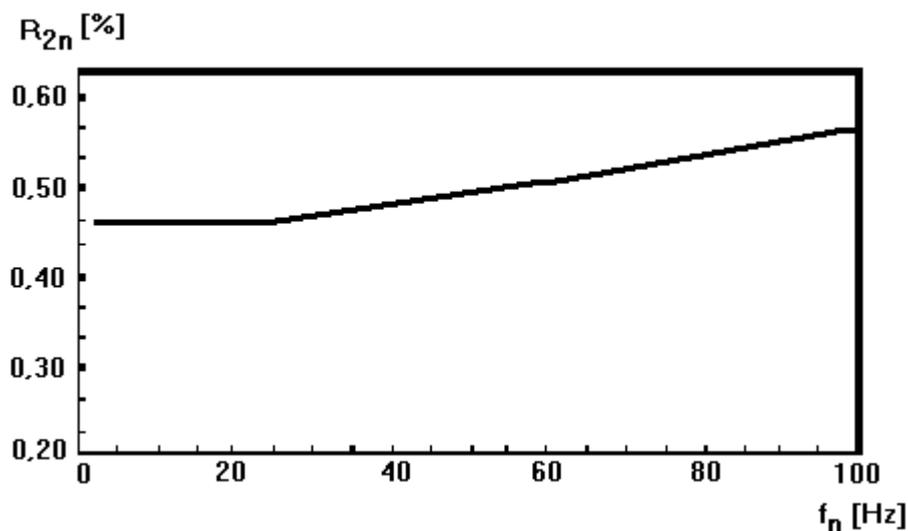


Figura 1.04 – Resistência do enrolamento de baixa tensão em função da frequência.

A quantificação da resistência CA em função da frequência tem sido alvo de diversos pesquisadores que estudam este fenômeno em cabos, motores e transformadores.

Os estudos relacionados ao aumento da resistência CA em função da elevação da frequência têm como um dos objetivos efetuar a quantificação das perdas para condições de regime não-senoidal.

Uma metodologia destinada a medir o valor da resistência CA dos enrolamentos do transformador em função da frequência é apresentada em [11]. A instrumentação utilizada tem como parte fundamental um analisador de impedância de rede. A metodologia é fundamentada na injeção de correntes harmônicas nos enrolamentos do transformador e através de uma análise matemática, são extraídos os valores de resistência para cada ordem harmônica. Outro benefício apresentado pelo trabalho é que para efetuar estas medições, o transformador pode estar energizado ou não, suprindo carga ou não, pois estes fatores não têm influência nos resultados obtidos. Sua modelagem é baseada em uma recomendação do IEEE (ANSI/IEE C57110/D7), que apresenta uma metodologia de “Derating” para transformadores que operam em ambientes não-senoidais.

Seus experimentos são validados através de comparações com simulações computacionais utilizando a Análise dos Elementos Finitos.

Outro trabalho realizado no segmento de determinação da resistência CA em transformadores é apresentado em [12]. O mesmo apresenta uma metodologia em que utiliza um gerador de sinais acoplado a um amplificador de potência para suprir correntes com diferentes frequências, e assim, possibilitar a realização de um ensaio em curto-circuito de uma unidade monofásica de 25 kVA. Através do ensaio baseado no princípio da superposição de efeitos, foram obtidos valores de resistência CA para algumas ordens harmônicas injetadas na unidade transformadora mencionada. O trabalho apresenta também estudos onde a relação entre potência aparente “derating” e fator-K, onde os mesmos são determinados levando-se em conta as perdas no núcleo e as perdas “stray loss”. Este método leva em consideração os efeitos “skin” e proximidade nos enrolamentos do transformador.

As perdas no ferro sob condições de operação senoidal, foram apresentadas anteriormente. Porém, quando um transformador opera sob o impacto de sinais elétricos distorcidos, é de extrema importância estudar o comportamento do equipamento.

A referencia [13] apresenta as perdas associadas ao fenômeno da histerese, sob condições não-senoidais, sendo calculadas pela equação (1.04).

$$\frac{P_{Hn}}{P_{H1}} = \left[1 + \left(\sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{V_n}{V_1} \cos \varphi_n \right)^S \right] \quad (1.04)$$

Sendo:

P_{Hn} - Perdas totais por histerese para um suprimento distorcido;

P_{H1} - Perdas por histerese para frequência fundamental;

n - Ordem harmônica;

V_n - Tensão eficaz do n -ésimo harmônico;

V_1 - Tensão eficaz para fundamental;

φ_n - Ângulo de fase do n -ésimo harmônico;

S - Coeficiente de Steimmetz (Depende do material do núcleo. Para os materiais mais comumente usados ele varia de 1,5 a 2,5).

Para os harmônicos de alta frequência, a reação causada pelas correntes parasitas 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 parasitas, e tal efeito é considerado pela inclusão do parâmetro “ C_{en} ” na expressão apresentada a seguir. Nessas condições as perdas totais associadas ao efeito das correntes de *Foucault* no núcleo, sob condições não-senoidais são apresentadas pela referencia [13], podendo ser expressas pela equação (1.05).

$$\frac{P_{Fn}}{P_{F1}} = \left[1 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \cdot \cos \varphi \right)^2 C_{en} \right] \quad (1.05)$$

$$C_{en} = 1 - 0,0017\xi^{3,61}, \quad \xi < 3,6$$

Sendo:

P_{Fn} - Perdas por correntes parasitas no núcleo para um suprimento distorcido;

P_{F1} - Perdas por correntes parasitas no núcleo para a frequência fundamental.

Sob condições senoidais, as perdas nos enrolamentos dos transformadores são bem conhecidas e dispensam quaisquer comentários complementares. Entretanto, sob o impacto de correntes com frequências múltiplas da fundamental, as perdas totais nos enrolamentos dos transformadores podem ser calculadas aplicando-se o princípio da superposição de efeitos.

As perdas totais nos enrolamentos, sob condições não-senoidais, são calculadas através da equação (1.06) apresentada no trabalho realizado em [14].

$$P_{jn} = \sum_{n=0}^{50} R_n(p) \cdot I_n^2(p) + \sum_{n=0}^{50} R_n(s) \cdot I_n^2(s) + P_{EC} + P_{OSL} \quad (1.06)$$

Sendo:

$R_n(p)$ - Resistência do enrolamento primário para o n-ésimo harmônico;

$R_n(s)$ - Resistência do enrolamento secundário para o n-ésimo harmônico;

$I_n(p)$ - Valor eficaz da n-ésima corrente harmônica do primário;

$I_n(s)$ - Valor eficaz da n-ésima corrente harmônica do secundário;

n - Ordem harmônica;

PEC - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para condições não-senoidais;

$POSL$ - Perdas suplementares (adicionais) nas partes metálicas (núcleo, paredes do tanque, etc.) para condições não-senoidais.

Sob condições não-senoidais, a determinação analítica da variação dessas perdas com a frequência não é uma tarefa simples e, normalmente, requer estudos detalhados envolvendo aspectos construtivos. Entretanto estas perdas são freqüentemente obtidas com considerável precisão através de ensaios experimentais que determinam os valores de resistência CA para cada ordem harmônica.

De acordo com o trabalho realizado em [7], as perdas no núcleo do transformador em condições senoidais ficarão unicamente em função da tensão de alimentação, e, se a tensão de alimentação variar dentro de limites estreitos e controlados, é comum admitir-se que as perdas no núcleo serão constantes ao longo de toda a vida útil do transformador.

Todavia, quando os transformadores são alimentados com tensões que apresentam distorções harmônicas, suas perdas têm uma pequena elevação. Resultados dos estudos de [4] referentes às perdas técnicas no núcleo de transformadores em ambientes não-senoidais demonstram que estas perdas possuem elevações relevantes quando as distorções harmônicas da tensão da rede são de amplitudes muito acima dos valores normalizados.

Contrário às perdas no ferro, as perdas nos enrolamentos do transformador em nenhuma hipótese podem ser consideradas constantes, pois estas variam exatamente com o quadrado da corrente drenada pela carga, e que, nos casos dos transformadores de distribuição, variam constantemente ao longo do dia.

As perdas nos enrolamentos para condições não-senoidais conforme verificado em (1.06), possuem um acréscimo devido as componentes de correntes harmônicas drenadas pelas cargas não-lineares. Estas componentes harmônicas variam também ao longo do dia de acordo com a quantidade e as características das cargas conectadas ao sistema supridor.

A determinação das perdas técnicas totais do transformador em ambientes não-senoidais tem como um dos objetivos estabelecer critérios para o seu carregamento de forma a não degradar a sua vida útil [12 e 13].

O estudo da estimativa de vida útil dos transformadores é apresentado em [15], que enfoca as perdas por efeito joule e adicionais “eddy current loss”, quando os transformadores estão operando em condições não-senoidais.

O objetivo maior desse documento é apresentar uma metodologia de cálculo de “derating” (a capacidade do transformador é reduzida de forma a compensar a sobrecarga oriunda das distorções harmônicas), que tem o objetivo de garantir a preservação da vida útil do equipamento.

Outro objetivo de grande importância que necessita da determinação precisa dessas perdas é a obtenção de requisitos nos processos de análises dos custos operacionais dos transformadores de potência pertencentes aos parques de distribuição de energia elétrica de uma concessionária [16]. A referência relata ainda um caso de simulação computacional onde a presença de uma distorção harmônica de corrente na ordem de 25,2% proporcionou o aumento das perdas técnicas de um transformador em aproximadamente 6,5%, elevando-se assim, os seus custos operacionais.

Os transformadores de distribuição são equipamentos existentes em grande quantidade nas redes de distribuição de energia elétrica, de modo que, embora sejam de baixo custo unitário, entretanto, em conjunto representam boa parte dos investimentos das concessionárias de energia elétrica.

Dentro deste contexto observa-se que o assunto é de relevante importância e tem sido fortemente explorado. Entretanto sua complexidade exige a necessidade de estudos adicionais. Verifica-se que os estudos pertinentes ao comportamento de transformadores quando suprindo cargas não-lineares são contínuos e de fato contribuem para um melhor entendimento de aspectos técnicos e econômicos relacionados ao mesmo.

Desta forma, o enfoque desta dissertação é apresentar mais um estudo sobre a variação da resistência CA em função da frequência e do comportamento das perdas técnicas dos enrolamentos do transformador em ambiente não-senoidal.

O estudo é fundamentado na realização de um ensaio em curto-circuito com tensão e frequência ajustáveis, realizado em uma unidade transformadora trifásica de 15 kVA.

O ensaio realizado tem como objetivo principal a determinação de valores da resistência CA da unidade transformadora mencionada. Diante desses dados de resistência serão apresentados estudos que dão origem à uma metodologia que permite quantificar as perdas dos enrolamentos de transformadores em ambientes não-senoidais utilizando-se dados de DHT_1 (Distorção Harmônica Total de Corrente).

1.2 – Estrutura da Dissertação

Objetivando efetuar a apresentação do presente trabalho de forma clara e didática, além do capítulo de introdução teórica, o mesmo foi estruturado conforme descrição a seguir:

CAPÍTULO II: descrição detalhada das atividades experimentais desenvolvidas, que têm como objetivo determinar a resistência CA para algumas ordens harmônicas, de uma unidade transformadora trifásica de 15 kVA.

CAPÍTULO III: apresentação de uma modelagem matemática que permite calcular, com considerável precisão, as perdas no cobre de um transformador em ambiente não-senoidal, utilizando para tal, o valor da DHT_1 (distorção harmônica total de corrente). Uma análise matemática adicional é efetuada no sentido de validar esta nova metodologia.

CAPÍTULO IV: finalização da apresentação do presente trabalho enfocando as principais discussões relativas às suas contribuições efetivas, conclusões gerais, bem como algumas sugestões para futuros desenvolvimentos que visam dar continuidade ao mesmo.

CAPÍTULO II – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CA DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR DE 15KVA, ATRAVÉS DE ANÁLISE EXPERIMENTAL.

II.1 – Introdução

As perdas técnicas nos enrolamentos dos transformadores suprindo cargas senoidais podem ser obtidas através do conhecido ensaio em curto-circuito [2], sendo esta metodologia muito difundida no contexto da engenharia elétrica e, portanto, dispensando maiores comentários.

No presente capítulo esta metodologia é aplicada em uma unidade trifásica de distribuição com potência nominal de 15 kVA, porém, a frequência da tensão de alimentação é variada de acordo com [12], e assim se obtêm os valores de resistências CA dos enrolamentos para cada ordem harmônica. Neste sentido, as análises experimentais visam obter, de forma aproximada, os valores de resistência dos enrolamentos do transformador para cada ordem harmônica. Estes valores de resistências encontrados são de grande importância no sentido de se obter a quantificação das perdas no cobre dos enrolamentos do transformador suprindo cargas não-senoidais. Vale a pena salientar que o acréscimo das perdas em função das distorções harmônicas pode representar valores consideráveis quando a análise englobar todas as unidades transformadoras de um sistema de distribuição de uma região, necessitando-se de uma quantificação mais apurada.

Os valores de resistências obtidos neste ensaio serão analisados de forma a obter uma equação simples que permita efetuar o cálculo das perdas no cobre, utilizando-se para este, simplesmente o valor de DHT_1 e as perdas no cobre para a componente fundamental. Esta metodologia será apresentada detalhadamente no capítulo III.

O próximo subitem apresenta e detalha algumas das principais características dos equipamentos utilizados nas atividades experimentais deste capítulo.

II.2 – Montagem Experimental Para Execução do Ensaio

Para atingir os objetivos citados anteriormente, utilizou-se o arranjo experimental baseado no Teorema de Blondel [17], que é amplamente utilizado na medição de potência ativa de circuitos polifásicos equilibrados. A figura 2.01 apresenta o arranjo utilizado nas atividades experimentais.

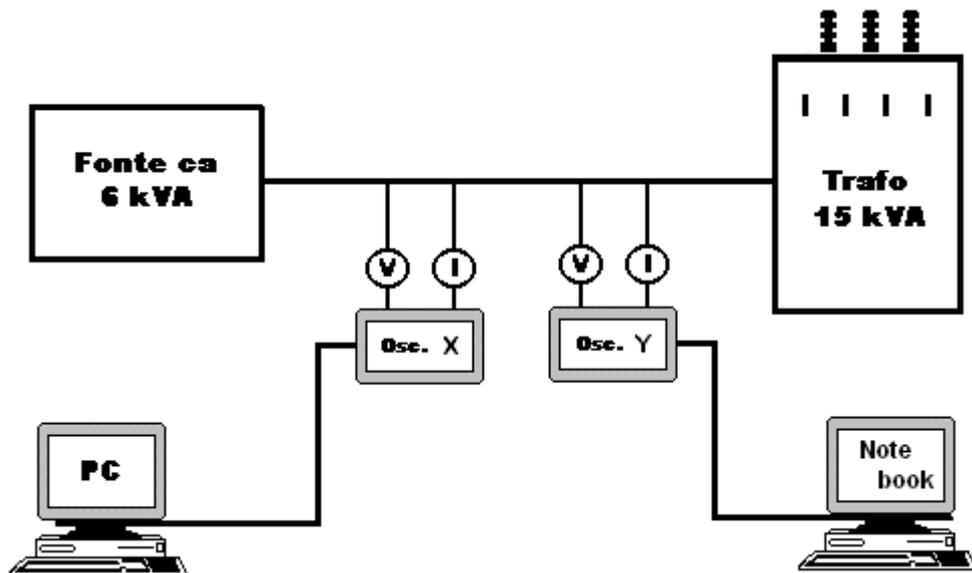


Figura 2.01 – Arranjo experimental utilizado para determinação da resistência CA da unidade transformadora de 15 kVA.

Capítulo II – Determinação da Resistência CA dos Enrolamentos de Transformador de 15 kVA, Através de Análise Experimental.

O arranjo executado no laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da UNESP (Campus Ilha Solteira) pode ser melhor visualizado através das figuras 2.02. e 2.03. A primeira mostra o arranjo efetuado para medição e aquisição dos resultados. A segunda apresenta a unidade transformadora utilizada na atividade experimental.



Figura 2.02 – Aquisição de dados e fonte de alimentação utilizada no ensaio.

Objetivando proporcionar melhor segurança ao operador da atividade experimental, a montagem foi efetuada de forma que os equipamentos de medição ficassem a uma certa distância da unidade transformadora.

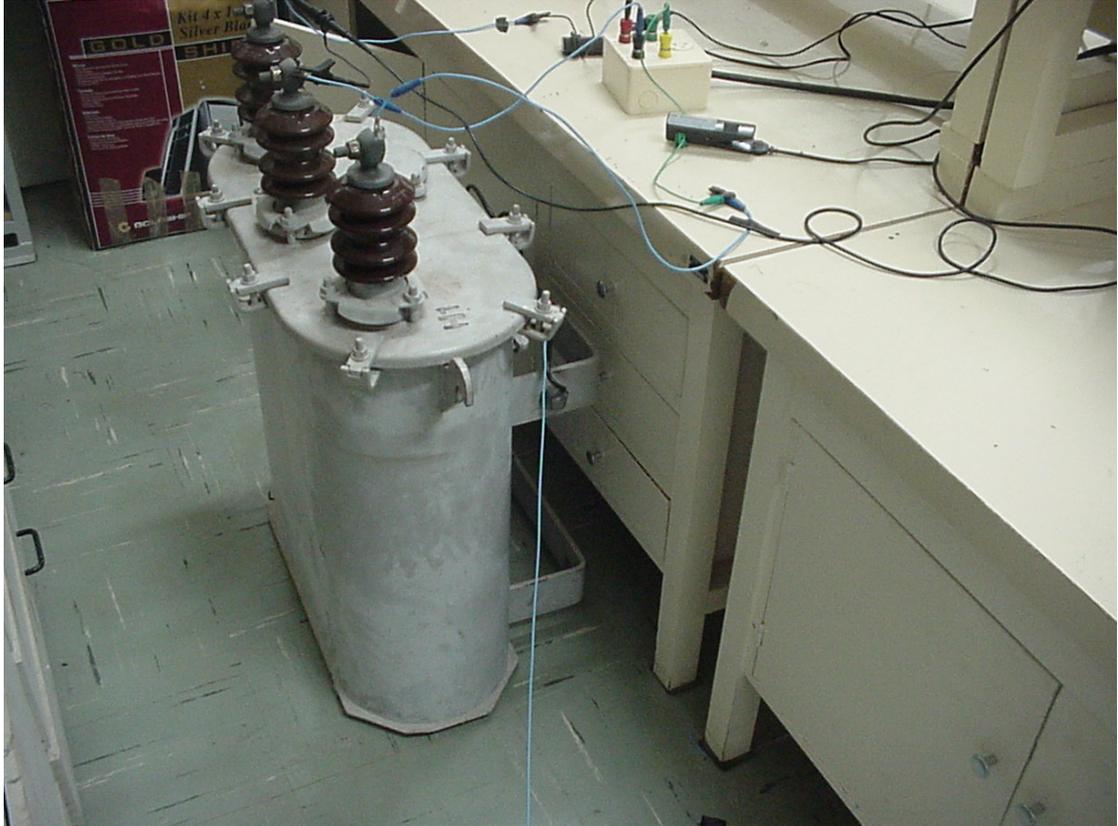


Figura 2.03 – Transformador utilizado no ensaio.

A unidade transformadora utilizada nas atividades experimentais pode ser visualizada na figura 2.03, onde é possível verificar detalhes tais como: a conexão do cabo de aterramento; os cabos de conexão da fonte de alimentação com os terminais de alta tensão do equipamento; os dispositivos utilizados nas medições (ponteiras de medição de tensão e corrente elétrica).

II.2.1 – Equipamentos Utilizados e Suas Respectivas Funções

a) – Transformador Trifásico de 15 kVA

A unidade transformadora ensaiada foi apresentada na figura 2.03. Este equipamento possui as seguintes características:

- Conexão Δ/Y , 15 kVA, 13800/220 V e $Z\% = 3,47\%$ em 13800V;
- Isolação com óleo mineral;
- Fabricante: Transformadores União Ltda.

A unidade transformadora utilizada no experimento pode ser visualizada também na figura 2.04, onde se verifica que seus terminais correspondentes aos enrolamentos de baixa tensão se encontram curto-circuitados para a realização do ensaio.



Figura 2.04 – Transformador de 15 kVA utilizado no experimento.

b) – Fonte Trifásica 6 kVA

A fonte trifásica modelo 6000L da figura 2.05 proporciona alimentação senoidal com a imposição de diferentes frequências, selecionadas pelo usuário. Suas principais características são apresentadas a seguir:

- Potência de 6 kVA em 35 °C;
- Fabricante: California Instruments;
- Frequência de Saída: 17 Hz a 5 kHz;
- Tensão Eficaz de Saída: 0 a 440 V de linha;
- Corrente Eficaz de Saída: 0 a 14,8 A.



Figura 2.05 – Fonte de alimentação utilizada no ensaio.

c) – Osciloscópio TDS 320

Diante da necessidade de se efetuar a medição da potência ativa do ensaio, utilizou-se dois osciloscópios TDS 320 para obter os dados de tensão e corrente do lado de alta tensão do transformador. Alguns dados desse equipamento seguem descritos abaixo:

- Fabricante: Tektronix;
- Modelo: TDS 320 com dois canais;
- Frequência: 100 MHz e 500 MS/s.

d) – Ponteira de Tensão

Foram utilizadas duas ponteiras de tensão para medir a tensão de linha entre as fases AB e BC. Alguns dos principais dados desse equipamento são fornecidos abaixo:

- Tensão máxima de 2500 V pp;
- Fabricante: Tektronix;
- Modelo: P5100 X 100;

e) – Ponteira de Corrente

As medições das correntes foram realizadas através de duas ponteiras de corrente, onde algumas das suas características são mencionadas abaixo:

- Fabricante: AEMC;
- Modelo: MN 114 CA;
- Corrente de Entrada: 0 a 10 A Eficaz;
- Tensão de Saída: 100 mV CA.

f) – Transformador Isolador 220/220 V

Este dispositivo foi utilizado para isolar os circuitos de força dos circuitos de medição, e assim, proporcionando melhor precisão nos dados oriundos das medições.

g) – Microcomputador Pentium I

Este microcomputador foi utilizado para efetuar a aquisição do osciloscópio A, destinado a realizar a medição da corrente da fase A e tensão entre as fases A e B. Alguns dos dados pertinentes a esse equipamento seguem descritos abaixo:

- Fabricante: IBM;
- Memória RAM de 64 Mbytes, velocidade de 233 MHz e HD de 3 Gbytes.

g) – Notebook

Este microcomputador foi utilizado para efetuar a aquisição do osciloscópio B, destinado a realizar a medição da corrente na fase C e tensão entre as fases B e C. Algumas características técnicas desse equipamento são apresentadas abaixo:

- Fabricante: Epson;
- Memória RAM de 64 Mbytes, velocidade de 166 MHz e HD de 1 Gbytes.

h) – Software Wave Star

Este software foi utilizado para efetuar a aquisição das formas de onda de tensão e corrente oriundas do ensaio e também no fornecimento dos valores de potência ativa das medições. Algumas de suas características são fornecidas abaixo:

- Fabricante Tektronix;
- Versão Demonstração.

II.2.2 – Procedimentos Experimentais

A montagem experimental pode ser melhor visualizada no diagrama multifilar que se encontra na figura 2.06.

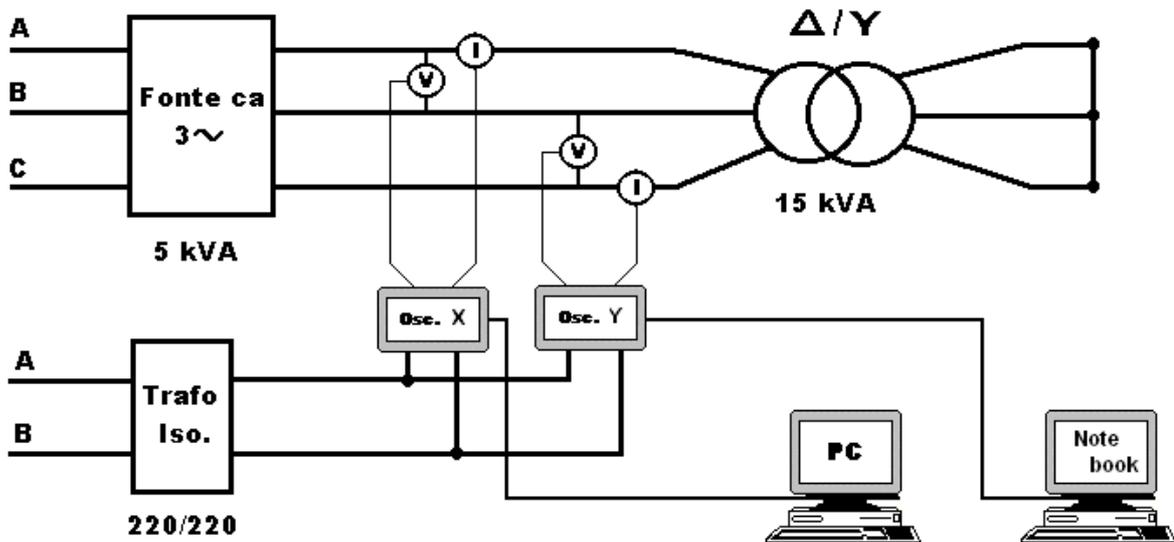


Figura 2.06 – Diagrama multifilar da montagem experimental do ensaio curto-circuito.

II.2.3 – Considerações Experimentais

A realização de experimentos envolvendo equipamentos ou dispositivos na área de engenharia elétrica sempre tem influência de fatores tais como temperatura ambiente, sinais com ruídos etc. Entretanto, alguns procedimentos foram realizados de forma a amenizar a ação desses fatores:

- A temperatura ambiente do local (Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da UNESP – Campus Ilha Solteira) no qual se efetuou a atividade estava estabilizada em aproximadamente 28 °C. Mesmo utilizando o sistema de refrigeração de ar, não foi possível obter a temperatura de 25 °C, sendo esta considerada a ideal para a realização desta atividade;
- O transformador foi alimentado com corrente nominal por aproximadamente 6 (seis) horas antes da realização dos experimentos de forma que o mesmo atingisse uma temperatura próxima à de funcionamento, ficando por volta de 45 °C. É importante salientar que a medição da temperatura do transformador foi efetuada na sua parte externa, portanto, de fato a temperatura nos seus enrolamentos é superior ao valor aqui mencionado;
- A carcaça do transformador estava conectada junto ao condutor terra do prédio em que se efetuou o ensaio;
- Baseando-se na linearidade do ensaio em curto descrito em [13], efetuou-se as aquisições das formas de onda da tensão e corrente para 3 valores de tensão entre fases aplicados no lado de alta tensão: 345, 400 e 435 volts, sendo que o valor de tensão de 435 volts corresponde ao valor necessário para obtenção da corrente nominal do transformador em 60 Hz;

- Em uma conexão trifásica em triângulo, as componentes harmônicas da corrente de seqüência zero (múltiplas de três), cujas fundamentais estão defasadas de 120 graus, estão defasadas entre si de 360 graus (3 x 120). Isto significa que elas estão em fase na linha de alimentação da conexão trifásica mencionada. Estas correntes (múltiplas de três) circulam dentro do triângulo, e assim, gera-se a impossibilidade de medir suas amplitudes na linha (alimentação do enrolamento de alta tensão do transformador). Esse problema foi solucionado através de uma imposição disponibilizada pela parametrização da fonte de alimentação do ensaio. Foram efetuados os ajustes dos ângulos de defasagem das tensões de fase da alimentação, de forma a forçar a circulação de correntes na linha e conseqüentemente proporcionando condições de se efetuar as medições das amplitudes dessas correntes. A tabela 2.01 apresenta os valores das defasagens utilizadas, sendo essas representadas em tempo (ms) e em ângulos referidos a cada freqüência harmônica:

Tabela 2.01 – Ângulos de defasagem para as harmônicas múltiplas de três.

Orden	Fase A		Fase B		Fase C	
	t (ms)	Graus	t (ms)	Graus	t (ms)	Graus
3	0,0000	0,00	1,8518	40,00	3,7036	-40,00
9	0,0000	0,00	1,1111	13,33	2,2222	-13,33
15	0,0000	0,00	0,3704	8,00	0,7407	-8,00

As considerações descritas anteriormente contribuem para que as condições das medições realizadas sejam mais próximas possíveis das reais condições de trabalho do equipamento referenciado.

II.3 – Equacionamento Utilizado

Abaixo serão apresentadas as equações utilizadas na obtenção dos valores das resistências em função da ordem harmônica para a unidade transformadora ensaiada.

A potência de curto-circuito por fase correspondente a cada ordem harmônica pode ser calculada através da equação 2.01.

$$P_{cc-h-f} = \frac{P_{cc-h-T}}{3} \quad (2.01)$$

Sendo:

P_{cc-h-T} - Valor da potência ativa de curto-circuito total do transformador para cada ordem harmônica;

P_{cc-h-f} - Valor da potência ativa de curto-circuito total por fase do transformador para cada ordem harmônica;

h - Ordem harmônica;

A unidade transformadora analisada possui conexões delta/estrela, assim sua corrente primária de fase será determinada através da equação 2.02.

$$I_{lcc-h-f} = I_{lcc-h-L} \cdot \sqrt{3} \quad (2.02)$$

Sendo:

$I_{1cc-h-f}$ - Valor eficaz da corrente primária de curto-circuito para cada ordem harmônica na fase;

$I_{1cc-h-L}$ - Valor eficaz da corrente primária de curto-circuito para cada ordem harmônica na linha.

Os valores de resistências CA do transformador, referidos para o enrolamento primário podem ser obtidos através da equação 2.03.

$$R_h = \frac{P_{cc-h-f}}{(I_{1cc-h-f})^2} \quad (2.03)$$

Sendo:

R_h - Valor da resistência CA para cada ordem harmônica vista pelo primário;

A seguir, o cálculo do valor de resistência efetuado com a equação (2.03) é referida ao enrolamento secundário. O valor da resistência vista pelo primário e referida ao secundário pode ser calculado através da equação (2.04).

$$R_h' = \frac{R_h}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} \quad (2.04)$$

Sendo:

N_1 - Número de espiras do enrolamento primário;

N_2 - Número de espiras do enrolamento secundário.

De acordo com o trabalho realizado em [12] a resistência R_h' representa a efetiva resistência para as perdas no cobre dos enrolamentos do transformador. Assim, estas perdas podem ser calculadas utilizando-se a equação apresentada a seguir:

$$P_{LL} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 R_h \quad (2.05)$$

Sendo:

P_{LL} – Perdas totais para condições de operação não-senoidal;

I_n – Valor da corrente eficaz para cada ordem harmônica;

R_n – Valor da resistência para cada ordem harmônica;

h – Ordem harmônica que se deseja efetuar os cálculos.

II.4 – Resultados Experimentais

Uma vez realizada a montagem do arranjo experimental, com o enrolamento secundário do transformador em curto-circuito, alimentou-se o enrolamento primário baseando-se no princípio da superposição de efeitos, ou seja, as medições foram efetuadas com valores de frequência correspondentes a diferentes ordens harmônicas.

**Capítulo II – Determinação da Resistência CA dos Enrolamentos de Transformador de 15 kVA,
Através de Análise Experimental.**

Esta metodologia permite obter as grandezas elétricas (potência ativa, corrente, tensão etc) e as formas de onda das tensões e/ou correntes no primário do transformador para cada ordem harmônica. Serão apresentados a seguir os valores das grandezas elétricas pertinentes ao ensaio efetuado através da tabela 2.02 que apresenta os valores das grandezas envolvidas no cálculo da resistência CA da unidade transformadora de 15 kVA.

Tabela 2.02 – Valores das grandezas elétricas oriundas das medições realizadas na atividade experimental.

Med.	h	P _x (W)	I _x (A)	P _y (W)	I _y (A)	P _x + P _y (W)	(I _x + I _y) / 2 (A)	R _h (Ohms)	R _h ' (Ohms)
1	1	256,00	0,6380	35,30	0,6570	291,30	0,6475	694,8020	0,0589
2	1	218,00	0,5890	33,10	0,6040	251,10	0,5965	705,7094	0,0598
3	1	164,00	0,5120	26,70	0,5260	190,70	0,5190	707,9720	0,0600
1	3	79,30	0,2550	-29,30	0,2590	50,00	0,2570	757,0139	0,0641
2	3	67,50	0,2350	-24,10	0,2380	43,40	0,2365	775,9389	0,0657
3	3	53,30	0,2040	-17,30	0,2100	36,00	0,2070	840,1598	0,0712
1	5	-21,90	0,155	43,70	0,1560	21,80	0,1555	901,5624	0,0764
2	5	-18,10	0,143	36,70	0,1440	18,60	0,1435	903,2526	0,0765
3	5	-15,80	0,123	29,30	0,1260	13,50	0,1245	870,9539	0,0738
1	7	30,80	0,109	-19,40	0,1100	11,40	0,1095	950,7727	0,0805
2	7	25,80	0,1	-16,00	0,1010	9,80	0,1005	970,2732	0,0822
3	7	21,10	0,0869	-13,90	0,0876	7,20	0,0873	945,8053	0,0801
1	9	23,90	0,0829	-17,10	0,0831	6,80	0,0830	987,0811	0,0836
2	9	20,30	0,0766	-14,60	0,0752	5,70	0,0759	989,4444	0,0838
3	9	14,90	0,0669	-10,30	0,0669	4,60	0,0669	1027,7931	0,0871
1	11	-13,70	0,0643	19,10	0,0683	5,40	0,0663	1228,4763	0,1041
2	11	-11,40	0,0593	15,90	0,0619	4,50	0,0606	1225,3703	0,1038
3	11	-9,27	0,0525	12,60	0,0532	3,33	0,0529	1192,2144	0,1010
1	13	17,10	0,0547	-13,50	0,0524	3,60	0,0536	1255,4044	0,1064
2	13	13,60	0,0506	-10,60	0,0467	3,00	0,0487	1267,5225	0,1074
3	13	10,80	0,0439	-8,41	0,0433	2,39	0,0436	1257,2598	0,1065
1	15	11,40	0,0418	-8,36	0,0397	3,04	0,0408	1830,7054	0,1551
2	15	14,00	0,0456	-10,30	0,0434	3,70	0,0445	1868,4514	0,1583
3	15	16,50	0,0502	-12,10	0,0470	4,40	0,0486	1862,8601	0,1578
1	17	-9,65	0,0359	13,10	0,0397	3,45	0,0378	2414,5466	0,2046
2	17	-7,80	0,0336	10,80	0,0371	3,00	0,0354	2400,7256	0,2034
3	17	-6,43	0,0285	8,60	0,0309	2,17	0,0297	2460,0670	0,2084
1	19	10,30	0,0293	-7,80	0,0309	2,50	0,0301	2759,3521	0,2338
2	19	9,50	0,0264	-7,43	0,0286	2,07	0,0275	2737,1907	0,2319
3	19	6,88	0,0278	-5,07	0,0237	1,81	0,0258	2729,7584	0,2313

A tabela 2.02 apresenta os dados pertinentes às medições e também aos cálculos necessários para se obter os valores de resistência CA para cada ordem harmônica do transformador ensaiado.

Ressalta-se que as medições 1, 2 e 3 foram efetuadas com valores de tensões de alimentação de 345, 400 e 435 volts respectivamente.

As colunas I_X e P_X correspondem respectivamente aos valores de correntes eficazes e potências ativas medidas pelo osciloscópio X (obtem dados de corrente eficaz na fase A e de tensão eficaz entre as fases A e B).

As colunas I_Y e P_Y correspondem respectivamente às medições de correntes eficazes e potências ativas efetuadas pelo osciloscópio Y (obtem dados de corrente eficaz na fase C e de tensão eficaz entre as fases B e C).

As colunas $(P_X + P_Y)$ correspondem à potência ativa total para cada ordem harmônica. A média das duas correntes é apresentada na coluna $((I_X + I_Y)/2)$. E finalmente, os valores de resistência total por fase para cada ordem harmônica são apresentados nas colunas R_h e R_h' , estando a primeira grandeza referida pelo primário e a segunda pelo secundário.

É possível verificar na tabela mencionada, a presença de alguns valores negativos de potência ativa. Isso se deve ao fato do ângulo de defasagem entre a tensão de fase e corrente na linha utilizado nos cálculos, ser superior a noventa graus e inferior a duzentos e setenta graus (co-seno dos ângulos compreendidos nesse período é negativo). Como o cálculo dessa potência utiliza o produto entre a corrente, a tensão e o co-seno desse ângulo, conseqüentemente os valores de potência serão negativos, entretanto a potência total da medição será efetuada através da soma aritmética dos valores de potência ativa referente às aquisições dos dois osciloscópios, ou seja, ao se efetuar a soma das indicações de potência, o valor utilizado deverá continuar negativo.

**Capítulo II – Determinação da Resistência CA dos Enrolamentos de Transformador de 15 kVA,
Através de Análise Experimental.**

Através dos dados de resistência da tabela 2.02, gerou-se a tabela 2.03 que apresenta os valores médios dessa grandeza para cada ordem harmônica. Estes valores foram obtidos através da média dos três valores de resistência correspondentes às medições 01, 02 e 03 da tabela mencionada, sendo esta metodologia baseada no princípio da linearidade do ensaio em curto-circuito aplicado em transformadores [2].

Tabela 2.03 – Valores médios de resistência entre as três medições realizadas para cada ordem harmônica.

h	R_h Med. (Ohms)	R_h ' Med. (Ohms)
1	702,83	0,0595
3	791,04	0,0670
5	891,92	0,0756
7	955,62	0,0810
9	1001,44	0,0848
11	1215,35	0,1030
13	1260,06	0,1230
15	1854,01	0,1736
17	2425,11	0,2152
19	2742,10	0,2323

A figura 2.05 apresenta o gráfico que permite verificar o comportamento da resistência CA da unidade ensaiada, em função da ordem harmônica.

Capítulo II – Determinação da Resistência CA dos Enrolamentos de Transformador de 15 kVA, Através de Análise Experimental.

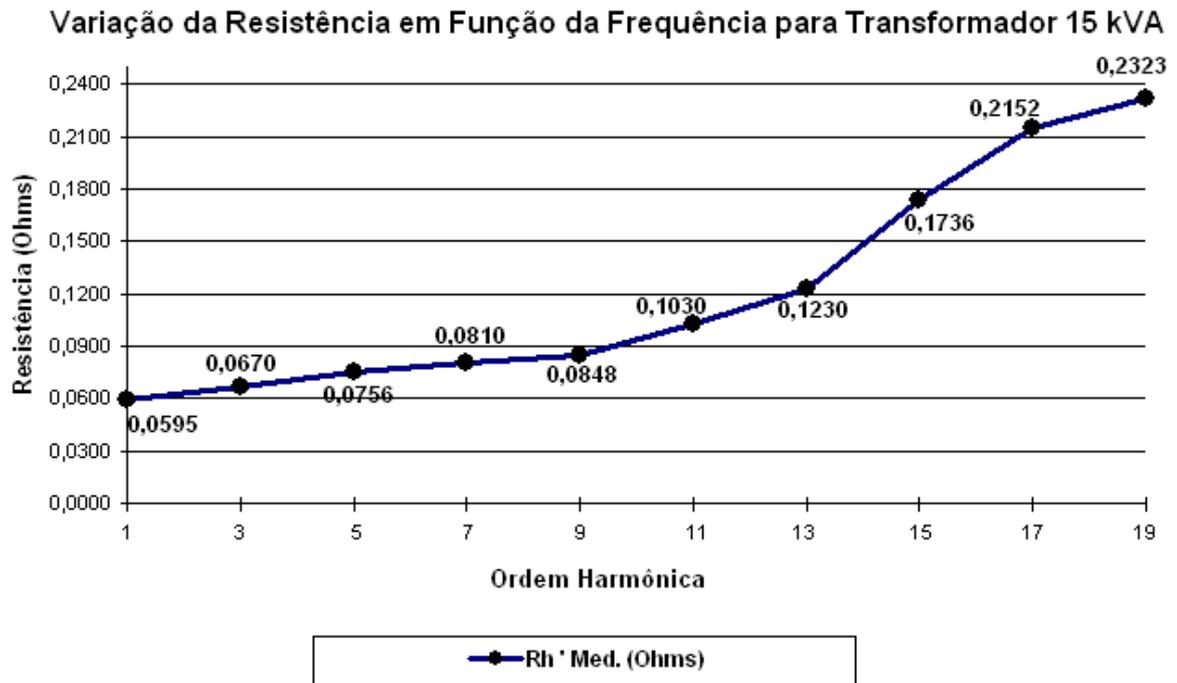


Figura 2.07 – Comportamento da resistência CA do transformador de 15 kVA em função da frequência.

Através da figura 2.07, verifica-se que a resistência CA do referido transformador tem uma pequena variação até a 11^a (décima primeira) ordem harmônica, entretanto a partir da 13^a (décima terceira) visualiza-se uma variação de maior amplitude.

II.5 – Conclusões

Conforme apresentado no item introdutório deste capítulo, este teve por meta principal apresentar os procedimentos e resultados oriundos da determinação da resistência CA de uma unidade transformadora de 15 kVA, através do ensaio em curto-circuito com tensão e frequência distinta.

Esta atividade envolveu diversos equipamentos onde se destaca a fonte de alimentação que proporcionou a variação da frequência e também do ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão múltiplas de três.

Foi comprovado que a resistência dos enrolamentos de um transformador, de fato, aumentam consideravelmente à medida que frequência se eleva. As variações de resistência verificadas na tabela 2.02 são de consideráveis amplitudes, pois correspondem a um transformador de pequeno porte, entretanto, para unidades transformadoras de maior capacidade (e que conseqüentemente possuem enrolamentos cujos condutores possuem seção transversal superior) certamente este efeito será de proporções maiores.

A medição da temperatura interna do transformador ensaiado não foi possível, pois as características construtivas do equipamento utilizado não possibilitam efetuar tal medição. Esta questão foi parcialmente solucionada através do tempo no qual o equipamento ficou ligado em condições nominais de operação antes do início do ensaio. De acordo com [18], estima-se que sua temperatura interna ficou entre 62,8 a 64,1 °C.

Os valores de resistência aqui obtidos são de grande importância para a implementação da equação que permite calcular as perdas nos enrolamentos de transformadores em ambientes não-senoidais utilizando-se o valor da DHT_1 . Os estudos pertinentes às mesmas são apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO III – CÁLCULO DAS PERDAS NO COBRE DOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO EM AMBIENTES NÃO-SENOIDAIIS, ATRAVÉS DA DHT₁ (DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE)

III.1 – Introdução

Sabe-se que as cargas não-lineares geram distorções harmônicas (componentes harmônicas de corrente com frequência múltipla da fundamental). Estas correntes harmônicas, assim como a corrente fundamental, também circulam pelos enrolamentos do transformador proporcionando um acréscimo considerável das perdas do mesmo. Diante da equação (1.01) apresentada no capítulo introdutório, é possível verificar que a tarefa de se calcular as perdas no cobre de um transformador suprindo cargas não-senoidais é muito trabalhosa, em função das diversas etapas necessárias, tais como:

- Correção da resistência CA dos enrolamentos em função da frequência, de modo que se tenha um valor de resistência para cada ordem harmônica. Este processo é efetuado normalmente até a quadragésima nona ordem harmônica, de acordo com [15].
- Medições das distorções harmônicas individuais de corrente que circulam pelos enrolamentos primário e secundário do transformador;
- Efetuar o somatório entre o produto do quadrado dos valores eficazes das correntes harmônicas e as suas respectivas resistências;

- Determinação das perdas por correntes parasitas e as perdas suplementares do equipamento.

Através das etapas descritas anteriormente, percebe-se que calcular com boa precisão, as perdas no cobre de um transformador suprimindo carga não-linear é um procedimento trabalhoso. Este trabalho cresce fortemente quando se trata do sistema elétrico de distribuição, pois estes sistemas possuem uma enorme quantidade de unidades transformadoras.

Diante dos fatos relacionados neste item introdutório, este capítulo tem como objetivo apresentar a proposta de uma metodologia otimizada, na qual se utiliza uma simples equação para efetuar o cálculo aproximado das perdas totais no cobre de um transformador de distribuição em ambientes não-senoidais, utilizando apenas a DHT_1 (obtido do espectro harmônico das correntes das cargas que o mesmo alimenta) e o seu carregamento nominal.

III.2 – Análise do Comportamento das Perdas em Transformadores em Função do DHT_1

O capítulo II deste trabalho apresentou as atividades experimentais que permitiram obter a resistência CA para algumas ordens harmônicas de uma unidade trifásica de 15 kVA.

Utilizando-se os valores de resistência da tabela 3.01, obtidos através de medições realizadas em [11] nos transformadores de 10 e 50 kVA e dos valores obtidos no experimento realizado com a unidade transformadora de 15 kVA, conforme apresentado no capítulo II do presente trabalho, efetuou-se uma análise do comportamento das perdas no cobre nos enrolamentos destes transformadores, utilizando-se em seus cálculos diversos valores de DHT₁'s característicos dos ramais de distribuição.

Tabela 3.01 – Medições de resistência CA de transformadores de distribuição da 1ª até 19ª Ordem Harmônica.

h	F (Hz)	10 kVA – R_h (Ω)	50 kVA – R_h (Ω)	15 kVA – R_h (Ω)
DC	10	0.0894	0.0125	----
1	60	0.0896	0.0132	0.0595
3	180	0.0899	0.0187	0.0670
5	300	0.0909	0.0291	0.0756
7	420	0.0922	0.0426	0.0810
9	540	0.0939	0.0585	0.0848
11	660	0.0961	0.0739	0.1030
13	780	0.0991	0.0895	0.1230
15	900	0.1020	0.1070	0.1736
17	1020	0.1060	0.1250	0.2152
19	1140	0.1100	0.1380	0.2323

As principais características das unidades transformadoras no qual efetuou-se o estudo das perdas no cobre, são apresentadas na tabela 3.02.

Tabela 3.02 – Dados complementares dos transformadores analisados

Potência	Tensão Primária	Tensão Secundária	Corrente Secundária
10 kVA	7200 V	200 V	27 A
50 kVA	200 V	200 V	145 A
15 kVA	13800 V	220/127	40 A

III.2.1 – Espectros Harmônicos Utilizados

Com o objetivo de avaliar o desempenho da equação proposta, foram selecionados 12 períodos, extraídos de duas medições efetuadas em ramais distintos. A primeira medição foi efetuada em um ramal de distribuição residencial e o segundo em um ramal de distribuição industrial, ambos da área de concessão de uma concessionária do estado de São Paulo.

Estes dados de distorções harmônicas de corrente (média dos períodos selecionados) dos ramais foram utilizados nos cálculos das perdas no cobre de três unidades transformadoras (item III.4 do presente capítulo) submetidas às análises. Estes períodos foram selecionados de forma a proporcionarem as mais variadas distorções harmônicas nos ramais mensurados.

A tabela 3.03 apresenta apenas os valores médios (correspondentes aos períodos selecionados) das distorções harmônicas totais de corrente. As distorções harmônicas individuais e totais de corrente e tensão destes períodos selecionados podem ser visualizados com melhor detalhamento no apêndice A. A tabela 3.03 apresenta apenas os valores médios dos períodos das distorções harmônicas totais de corrente utilizadas nas análises.

Tabela 3.03 – Distorções harmônicas totais de corrente (Período 01 a 12) oriundas das medições em ramais de uma concessionária do estado de São Paulo.

N°	Distorções de Corrente			Período Selecionado
	Medição	Fase A	Fase B	
01	9,87	9,71	10,27	18/12/2003 (23:40) a 25/12/2003 (00:20) - quinta-feira a quinta-feira.
02	8,09	6,35	6,45	06/01/2004 (17:10) a 06/01/2004 (21:50) - terça-feira.
03	9,05	6,30	7,43	06/01/2004 (20:00) a 06/01/2004 (21:50) - terça-feira.
04	7,20	6,39	8,26	04/01/2004 (03:10) a 04/01/2004 (04:10) - domingo.
05	6,10	5,70	5,87	07/01/2004 (01:10) a 07/01/2004 (02:20) - quarta-feira.
06	19,00	14,95	22,87	18/12/2003 (18:58) a 18/12/2003 (21:44) - quinta-feira.
07	8,95	4,29	5,74	01/01/2004 (00:20) a 01/01/2004 (01:30) - quinta-feira.
08	9,48	9,25	8,75	03/01/2004 (13:20) a 03/01/2004 (17:20) - sábado.
09	11,59	10,98	10,48	04/01/2004 (13:30) a 04/01/2004 (17:30) - domingo.
10	20,22	26,98	17,09	27/12/2003 (08:15) a 27/12/2003 (09:38) - sábado.
11	12,58	12,30	11,07	28/12/2003 (01:30) a 28/12/2003 (03:30) - sábado.
12	28,34	26,80	28,67	18/12/2003 (16:10) a 18/12/2003 (18:50) - quinta-feira.

Conforme informação anterior, a tabela 3.03 apresenta os valores médios das distorções harmônicas de corrente correspondentes aos períodos selecionados. Salienta-se que as distorções harmônicas totais de corrente que foram selecionadas nas medições realizadas no ramal industrial estão identificadas com cor vermelha. É possível verificar que as distorções oriundas dos ramais residenciais apresentam valores com amplitudes medianas. Já para as distorções harmônicas de correntes oriundas do ramal industrial, apresentam valores de grandes amplitudes, sendo justificado pela grande utilização de cargas de características não-lineares pelas indústrias alimentadas pelo ramal.

A seguir são apresentados os espectros harmônicos de correntes correspondentes aos valores médios dos períodos selecionados. A figura 3.01 apresenta o espectro harmônico de corrente referente ao período da medição 01, sendo este oriundo do ramal de distribuição industrial.

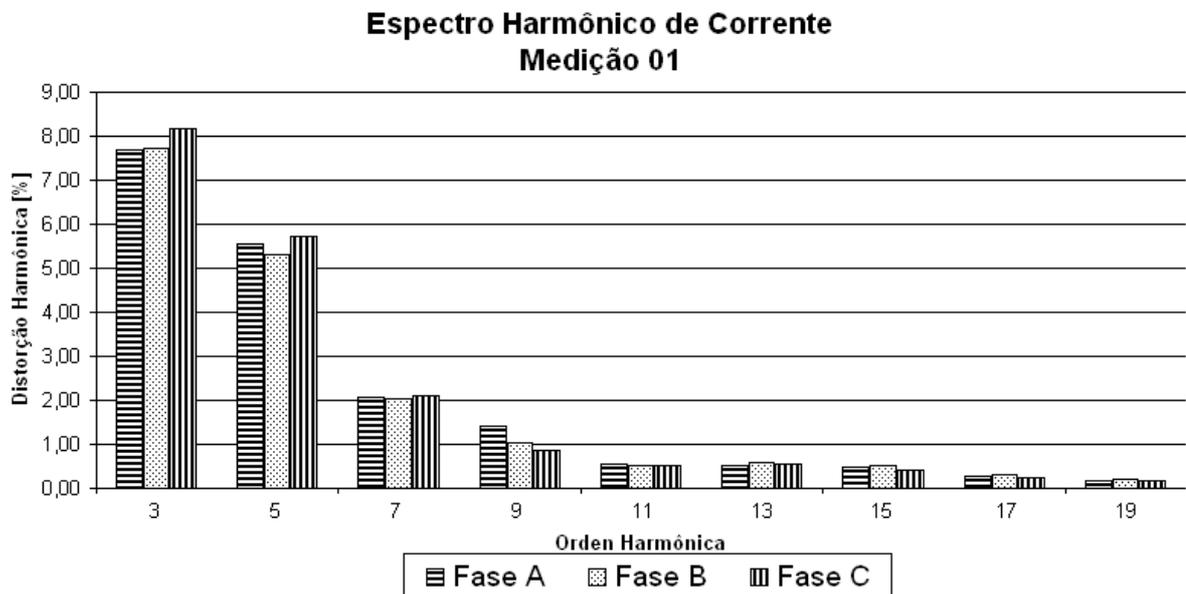


Figura 3.01 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 18/12/2003 (23:40) a 25/12/2003 (00:20) – quinta-feira a quinta-feira.

Conforme mencionado anteriormente, a figura 3.01 ilustra o valor médio de um espectro harmônico de corrente de um ramal industrial correspondente ao período de uma semana. Pode-se observar que a 3ª componente harmônica possui maior amplitude apresentando valores de aproximadamente 8%.

Esta medição é de grande importância no sentido de se verificar o desempenho da equação proposta nos cálculos das perdas para o ciclo semanal deste ramal.

A figura 3.02 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 02, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

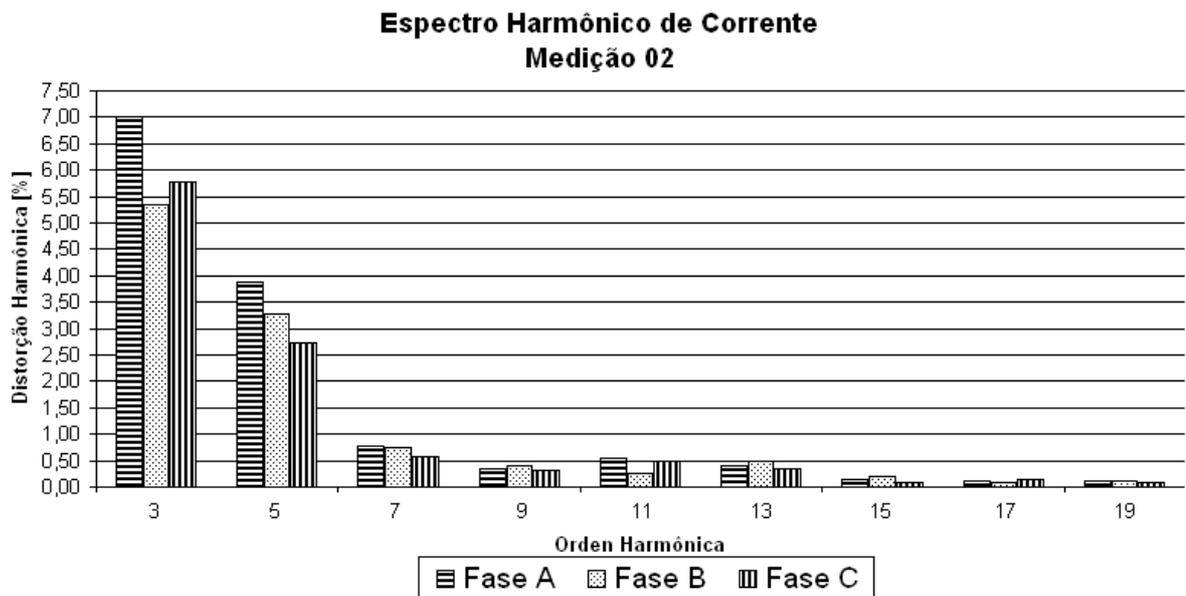


Figura 3.02 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 06/01/2004 (17:10) a 06/01/2004 (21:50) – terça-feira

A figura 3.02 apresenta os valores médios de um espectro harmônico de corrente referente a um determinado período selecionado. O mesmo é oriundo de uma medição do ramal de distribuição residencial. O período selecionado corresponde a horários de diversas cargas não-lineares tais como televisores, DVD, etc, sendo alimentadas pelos ramais de distribuição.

A figura 3.03 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 03, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

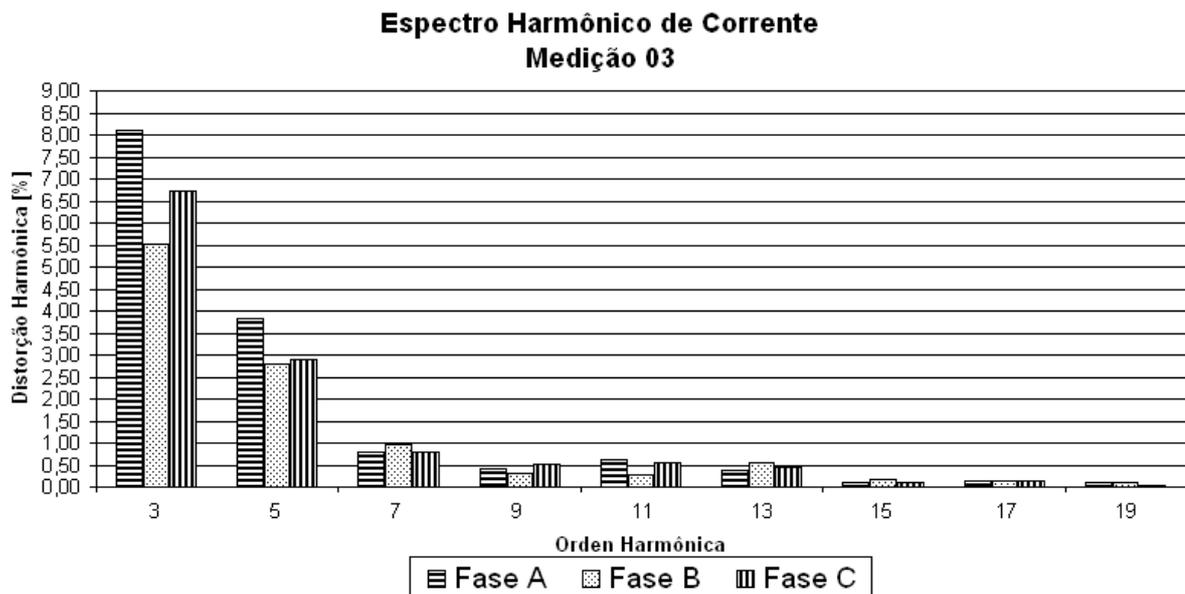


Figura 3.03 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 06/01/2004 (20:00) a 06/01/2004 (21:50) – terça-feira.

Já na figura 3.03, é apresentado outro espectro harmônico que teve como objetivo, verificar a distorção harmônica de corrente no chamado horário nobre das emissoras de TV, e verifica-se que seus valores não se distinguem muito dos espectros anteriores apresentados na figura 3.02.

A figura 3.04 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 04, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

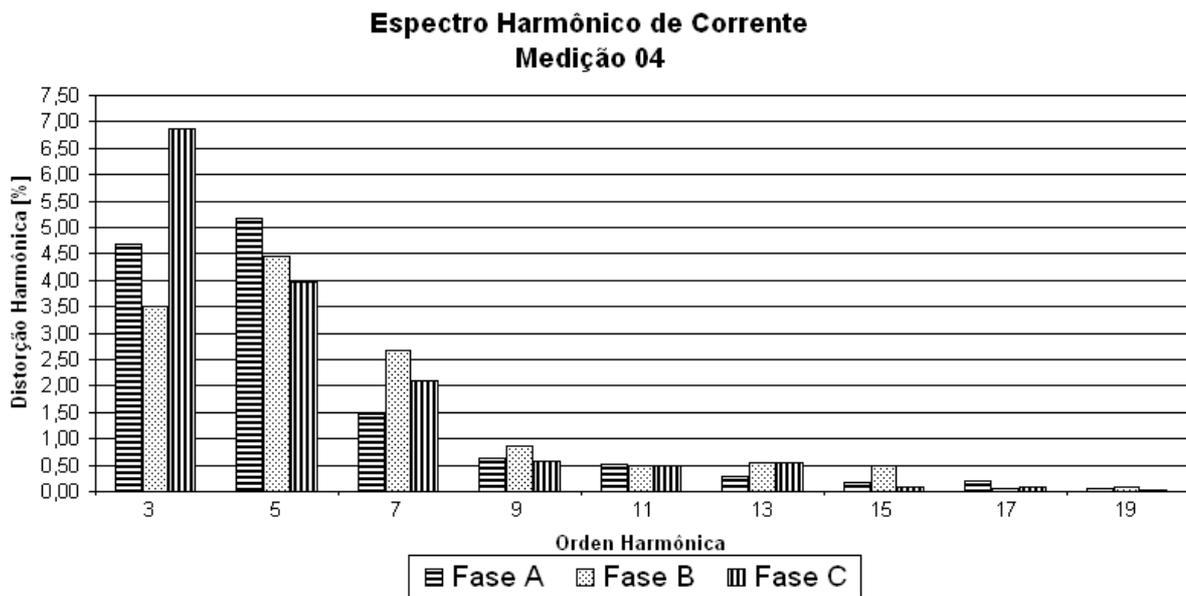


Figura 3.04 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 04/01/2004 (03:10) a 04/01/2004 (04:10) – domingo.

O período 04, ilustrado na figura 3.04 foi obtido em um horário de poucas cargas alimentadas pelos transformadores de distribuição, entretanto, o período selecionado corresponde a uma distorção harmônica de corrente onde as componentes harmônicas de 3^a e 5^a ordem apresentam valores expressivos e muito próximos entre si, assim representam uma situação não muito comum nos ramais de distribuição, sendo de grande importância para a validação da equação proposta neste trabalho, pois proporciona diferentes situações para efetuar os cálculos.

A figura 3.05 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 05, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

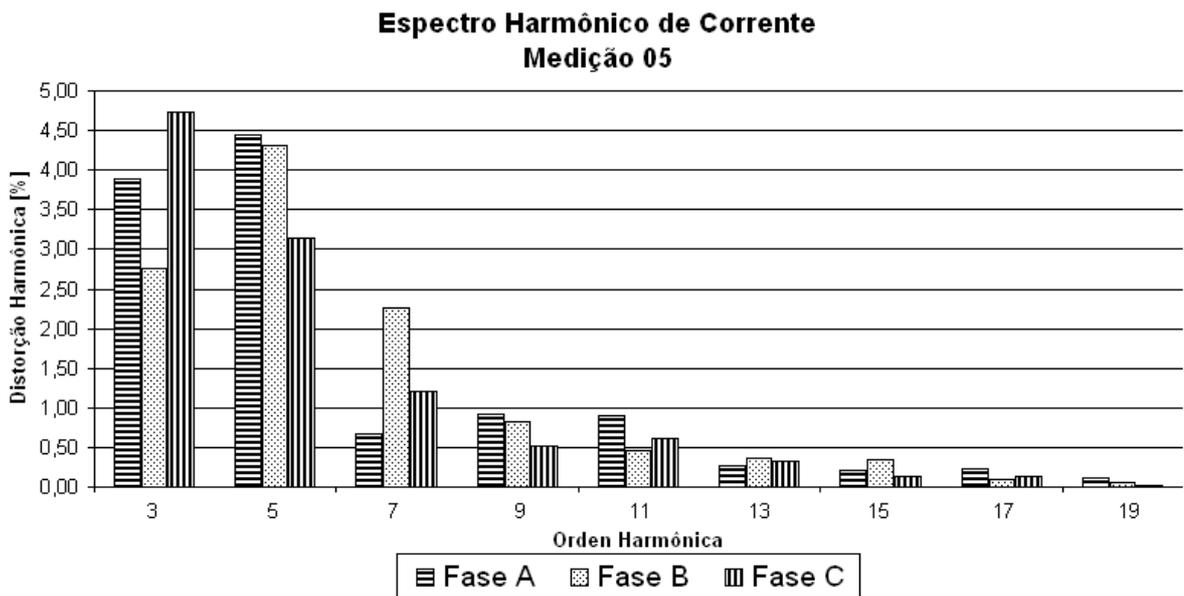


Figura 3.05 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 07/01/2004 (01:10) a 07/01/2004 (02:20) – quarta-feira.

Um espectro de corrente diferenciado pode ser visualizado na figura 3.05, onde as componentes de corrente de 3ª e 5ª ordens, apesar de suas amplitudes não serem muito altas, também apresentam valores próximos entre si. Vale a pena ressaltar que este espectro não é o mais aconselhável para representar a média das distorções dos ramais de distribuição, em função do seu período de medição de apenas uma hora aproximadamente.

A figura 3.06 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 06, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição industrial.

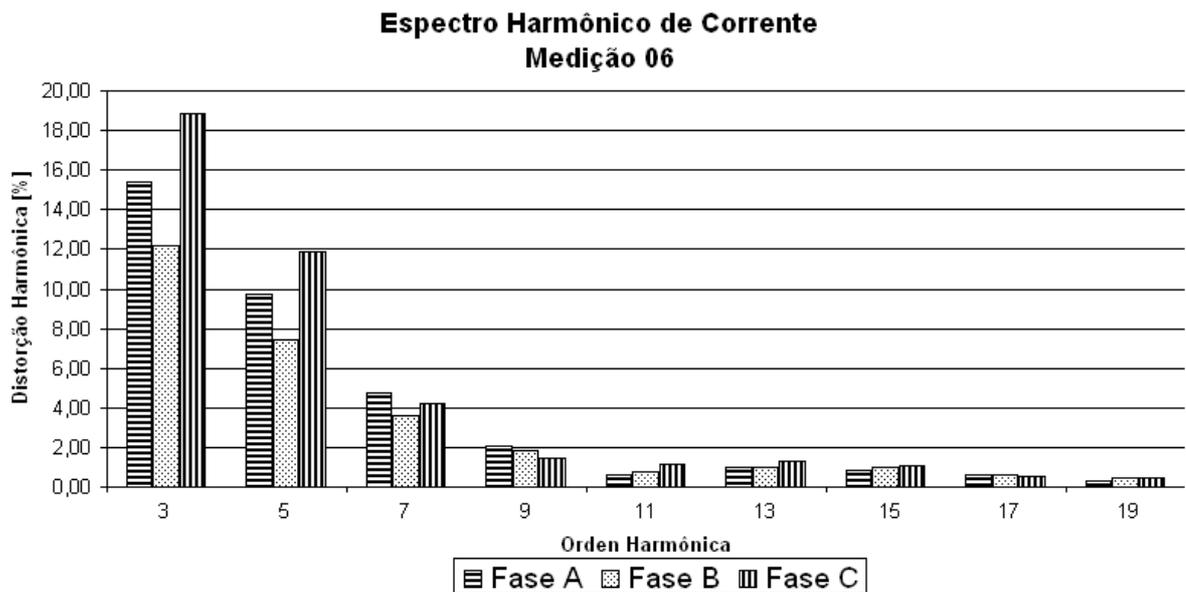


Figura 3.06 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 18/12/2003 (18:58) a 18/12/2003 (21:44) – quinta-feira.

Na figura 3.06 podem ser visualizados espectros harmônicos de valores médios (média do período selecionado) muito expressivos sendo selecionado na medição do ramal industrial. Nota-se mais uma vez que as harmônicas de 3^a e 5^a ordens apresentam valores muito próximos. Medições desta natureza são de grande importância no sentido de se verificar o desempenho da equação proposta em diferentes situações.

A figura 3.07 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 07, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

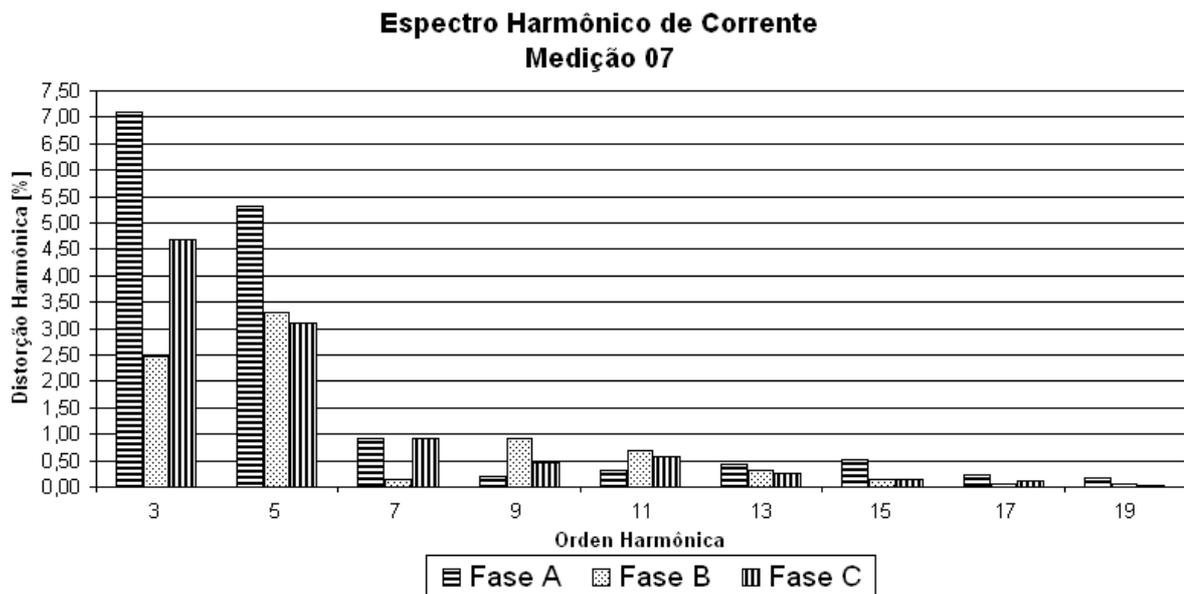


Figura 3.07 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 01/01/2004 (00:20) a 01/01/2004 (01:30) – quinta-feira.

Um grande desequilíbrio nas fases pode ser visualizado na figura 3.07. Tomando-se a 3ª ordem harmônica como base verifica-se que a distorção harmônica da fase A é quase três vezes maior que da fase B. Com relação ao período selecionado, percebe-se que esta distorção pode não ser muito freqüente em função de ter sido efetuada no primeiro dia do ano de 2004.

A figura 3.08 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 08, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

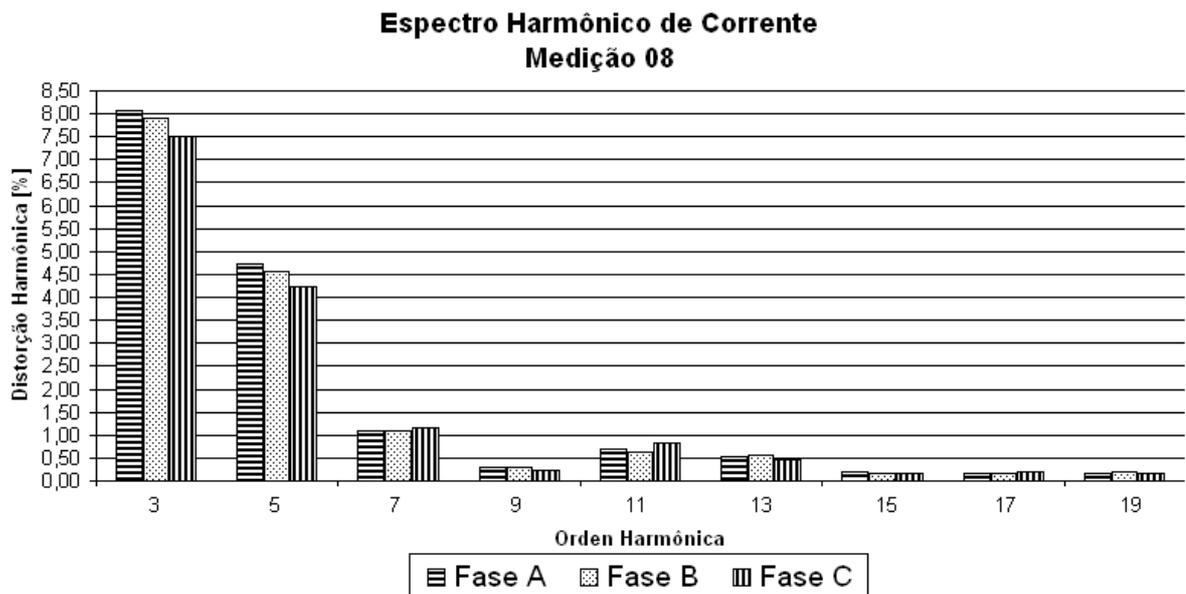


Figura 3.08 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 03/01/2004 (13:20) a 03/01/2004 (17:20) – sábado.

O gráfico da figura 3.08 apresenta um espectro harmônico de corrente onde as componentes de 11^a e 13^a ordens apresentam intensidades pouco maiores que a 9^a ordem. Esta medição é correspondente ao período da tarde de um sábado, onde cargas não-lineares tais como televisores, aparelhos de som e vídeo são predominantes.

A figura 3.09 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 09, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição residencial.

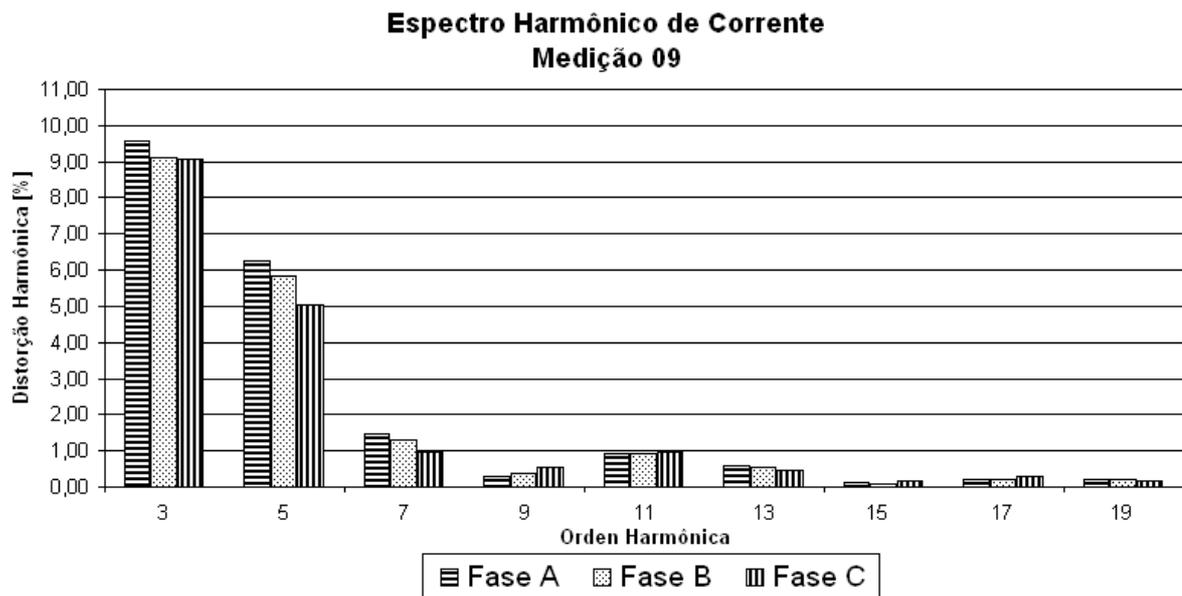


Figura 3.09 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 04/01/2004 (13:30) a 04/01/2004 (17:30) – domingo.

O espectro harmônico de mais um período de grande incidência de cargas não-lineares sendo alimentadas (domingo à tarde) pode ser visualizado no gráfico da figura 3.09, onde mais uma vez as componentes de 3^a e 5^a ordens apresentam intensidades de valores muito significativos.

A figura 3.10 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 10, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição industrial.

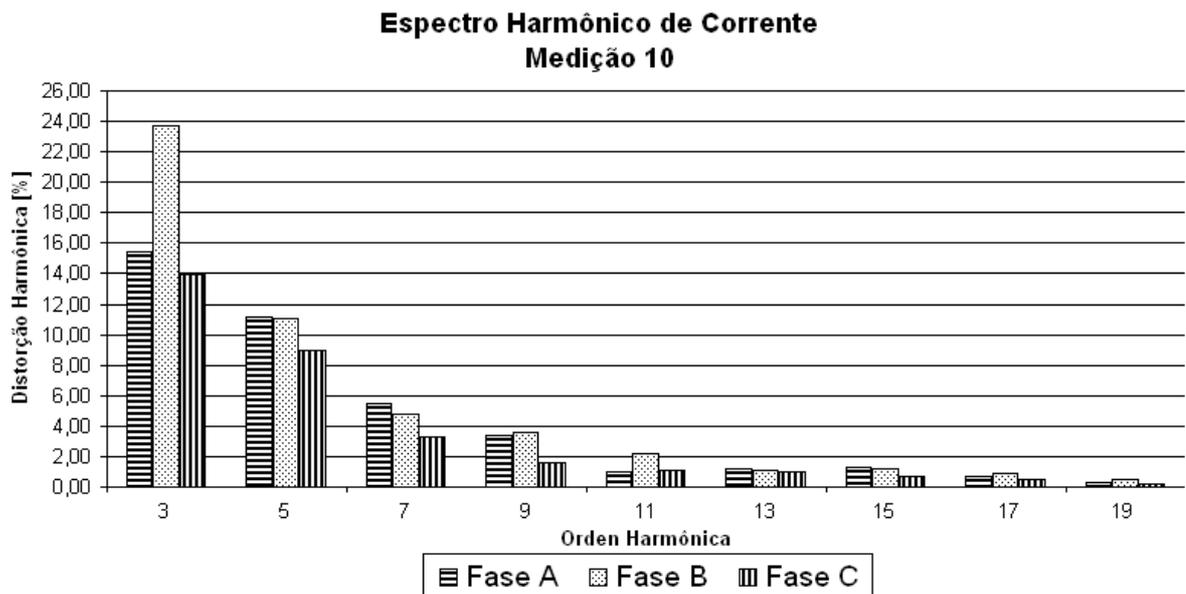


Figura 3.10 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 27/12/2003 (08:15) a 27/12/2003 (09:38) – sábado.

A figura 3.10 apresenta o período de número 10 selecionado da medição do ramal de distribuição industrial. O mesmo possui um grande desequilíbrio de corrente nas fases para a 3ª ordem harmônica. Observa-se neste espectro que as componentes harmônicas de 7ª e 9ª ordens possuem valores relevantes da ordem de aproximadamente 5% e 4%, respectivamente.

A figura 3.11 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 11, sendo este oriundo da medição realizada no ramal de distribuição industrial.

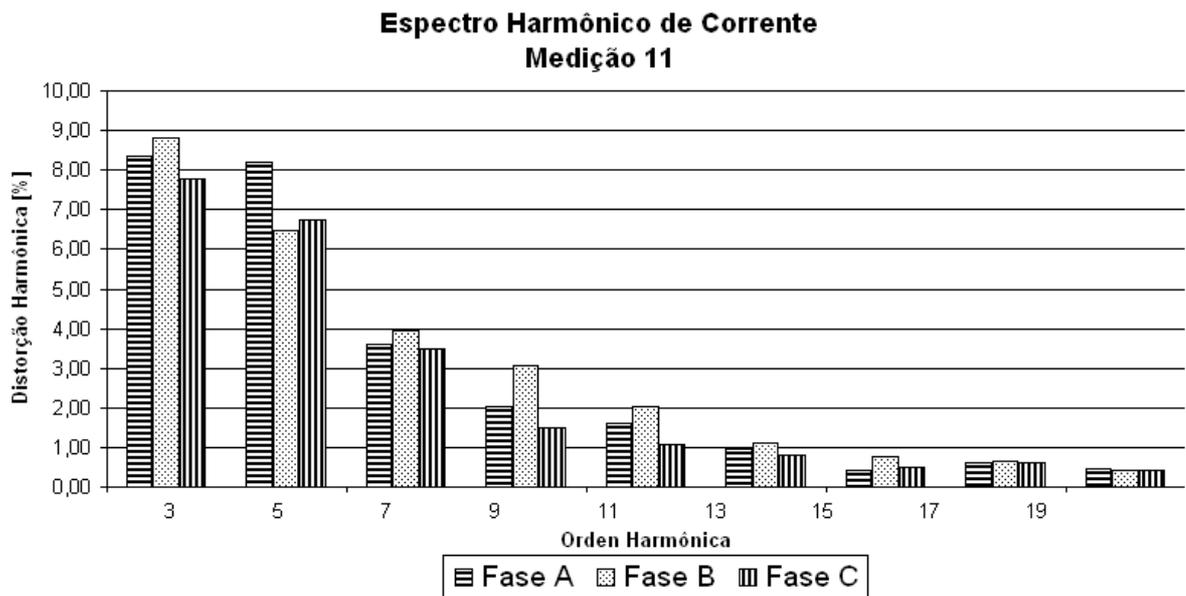


Figura 3.11 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 28/12/2003 (01:30) a 28/12/2003 (03:30) – sábado.

A figura 3.11 ilustra mais um espectro harmônico de valores muito expressivos, sendo esse selecionado da medição do ramal de distribuição industrial. Verifica-se agora que todas as componentes harmônicas possuem valores muito substanciais. Mais uma vez a forte distorção harmônica corresponde ao período de final de semana.

A figura 3.12 a seguir apresenta o espectro harmônico de corrente correspondente ao período de medição 12, sendo este também oriundo da medição realizada no ramal de distribuição industrial.

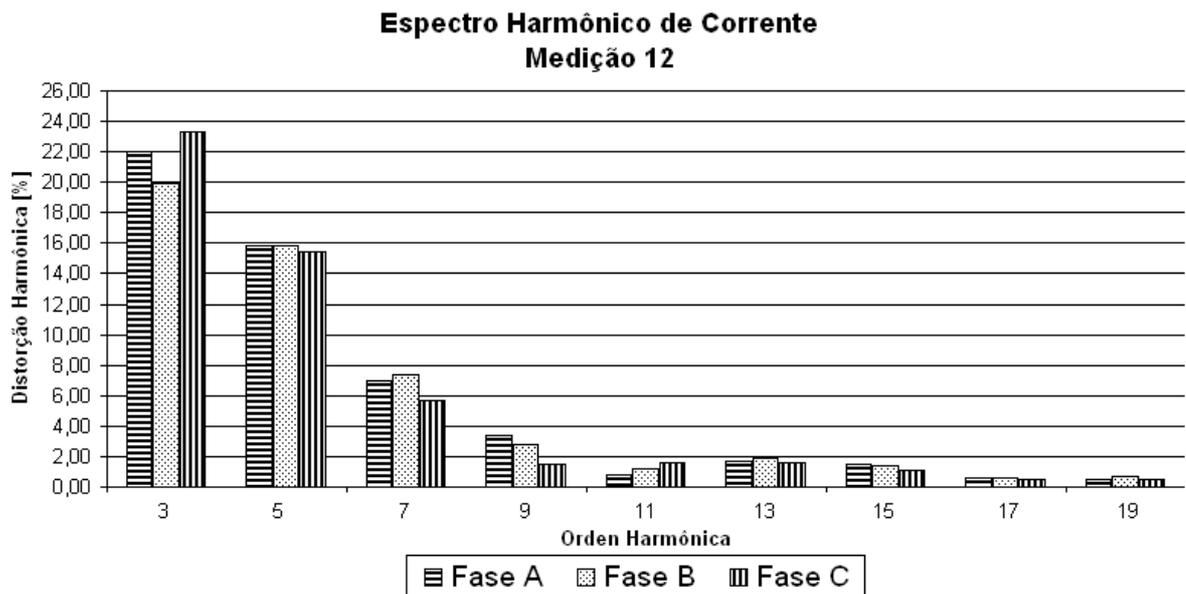


Figura 3.12 – Espectro harmônico de corrente da medição efetuada no período de 18/12/2003 (16:10) a 18/12/2003 (18:50) – quinta-feira.

A maior distorção harmônica de corrente foi encontrada no ramal de distribuição industrial, sendo esta ilustrada no espectro harmônico da figura 3.12. Pode-se observar grandes amplitudes nas componentes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens. A componente harmônica de 13^a ordem possui amplitude superior a 11^a ordem. Outro fato interessante é o período na qual efetuou-se a medição, sendo este não muito comum de se encontrar grandes distorções harmônicas.

III.3 – Equação Proposta Para Simplificação do Cálculo das Perdas do Transformador em Função do DHT_1 .

Conforme mencionado anteriormente, este capítulo tem como objetivo apresentar uma modelagem que permita calcular de forma simples e aproximada, as perdas no cobre em transformadores de distribuição.

A modelagem mencionada foi obtida empiricamente, sendo que tem suas características são análoga às equações de correção da resistência apresentadas por [19], ou seja, (Relação R_{ca} / R_{cc}), assim, a perda total do transformador em ambiente não-senoidal é obtida em relação às perdas oriundas da corrente fundamental.

III.3.1 – Desenvolvimento da Modelagem Proposta

O desenvolvimento da equação proposta no presente trabalho que tem como objetivo calcular as perdas no cobre do transformador operando em ambiente não-senoidal através do DHT_1 , não teve como princípio as tradicionais deduções matemáticas utilizadas na obtenção das equações da literatura, e sim, uma análise numérica através de diversos testes, tendo como base vários gráficos e alguns valores médios de distorções harmônicas oriundas de medições efetuadas em ramais de distribuição.

A primeira tentativa foi tentar elaborar uma modelagem que pudesse representar a variação da resistência CA em função da frequência para os enrolamentos dos transformadores.

Entretanto, as equações obtidas quando proporcionavam bons resultados para um transformador, o mesmo não acontecia para um outro com capacidade diferente, e assim, tornando necessário uma equação para cada unidade transformadora distinta. Esses estudos levaram a concluir que obter uma única modelagem que permita representar o aumento da resistência CA em função da frequência para os transformadores é extremamente difícil.

Em função da conclusão mencionada anteriormente, os estudos foram redirecionados para a análise das perdas no cobre em condições não-senoidais.

Os estudos se foram dirigidos para verificar o comportamento do produto da equação (3.01) proposta por [19] para corrigir a resistência CA em função das ordens harmônicas e uma função quadrática, visando representar o $R_n \cdot I_n^2$, utilizado para calcular as perdas por efeito joule em ambiente não-senoidal conforme equação (2.05).

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (3.01)$$

Sendo:

R_n – Valor da resistência encontrada para cada ordem harmônica;

R_{CC} – Valor da resistência em corrente contínua;

n – Ordem harmônica.

Sabendo-se que essas perdas são obtidas através do produto da resistência com o quadrado do valor eficaz da corrente, efetuou-se o gráfico da figura 3.13, com o objetivo de se verificar o comportamento dessas perdas, entretanto, algumas considerações foram necessárias para a obtenção do gráfico em questão. Estas são apresentadas a seguir:

$R_{cc} = 0,5 \text{ ohm};$

$X^2 = \text{Representa } I^2;$

$e^x = \text{Representa uma equação exponencial};$

$n = \text{Ordem harmônica (variando-se de 1 a 49).}$

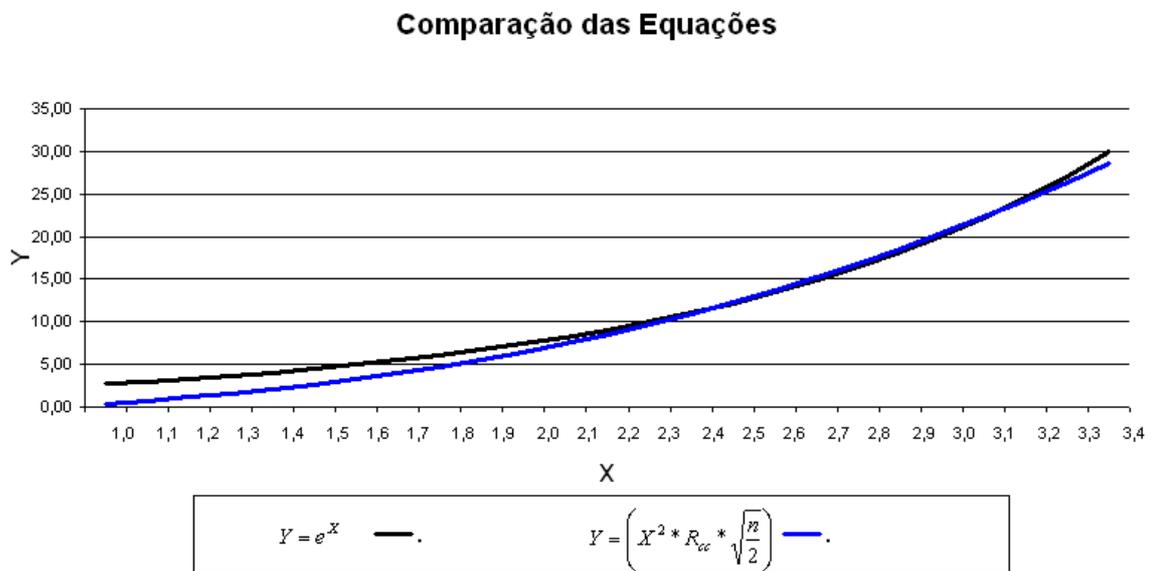


Figura 3.13 – Gráfico de comparação do produto entre a equação 2.05 e uma quadrática com uma exponencial.

Através desse experimento, percebeu-se que o comportamento da equação resultante entre o produto dessas duas equações aqui mencionadas é muito próximo de uma exponencial. Vale a pena ressaltar que esse gráfico apresenta o comportamento das perdas para condição não-senoidal.

Será verificado através dos gráficos de comportamento das perdas dos enrolamentos do transformador operando em ambiente não-senoidal (item III.4) que, de fato, essas perdas têm característica ainda mais próxima de uma exponencial.

Como a relação entre as perdas totais para ambiente não-senoidal e ambiente senoidal possui comportamento muito próximo de uma exponencial, inicialmente tentou-se representar esta relação com o expoente igual a $(DHT_1/100)$. Essa relação não correspondeu com boa precisão, pois o cálculo das perdas para ambiente não-senoidal utilizando a mencionada relação ficava com valores muito pequenos.

Após esta tentativa, concluiu-se que era necessário implementar um artifício matemático que viesse aumentar o valor do expoente $(DHT_1/100)$. Tentou-se efetuar a multiplicação desse termo por uma constante, mas seus resultados não foram satisfatórios. Assim implementou-se uma nova metodologia inserindo-se na equação uma constante sendo representada por “ α ”, de forma que o valor do termo $(DHT_1/100)$ era subtraído do valor dessa constante. Essa nova metodologia obteve resultados com desempenho razoável, mas não acompanhava muito bem os diferentes valores de DHT_1 . Algumas análises foram efetuadas novamente e concluiu-se que quando se efetuava o produto do termo $(\alpha - (DHT_1/100))$ pelo termo $(DHT_1/100)^2$, o novo expoente proporcionava um desempenho muito satisfatório. Esses estudos foram todos baseados nos valores de resistência CA do transformador de 10 kVA, fornecidos pela referência [11].

Assim, conseguiu-se efetuar o cálculo preciso do valor das perdas no cobre do transformador de 10 kVA através da equação (3.02), demonstrada abaixo:

$$\frac{P_T}{P_1} = e^{\left[\left(\frac{DHT_1}{100} \right)^2 \cdot \left(\alpha - \left(\frac{DHT_1}{100} \right) \right) \right]} \quad (3.02)$$

Sendo:

- P_T → Perdas totais no cobre para condição não-senoidal;
- P_1 → Perdas no cobre em função apenas da componente fundamental;
- DHT_1 → Distorção harmônica total de corrente;
- α → Constante de calibração que depende da capacidade e das características construtivas do transformador.

Após obter valores satisfatórios dos cálculos das perdas no cobre para a unidade transformadora de 10 kVA, estendeu-se os estudos para o cálculo das perdas da unidade transformadora de 50 kVA utilizando-se para tal a equação (3.02). Esses estudos levaram a concluir que os transformadores de maior capacidade necessitavam de uma constante α de maior valor. Este fato é justificado pela necessidade dos transformadores de maior capacidade em ter condutores com maior seção transversal, e assim, favorecendo a manifestação dos efeitos proximidade e pelicular (skin) com maior intensidade. A consequência de uma manifestação mais pronunciada dos efeitos citados é o aumento do valor das perdas nos enrolamentos para condições não-senoidais.

Salienta-se que os dados de resistência CA da unidade transformadora de 50 kVA também foram extraídos da referência [11].

Inicialmente a constante “ α ” era obtida através da visualização dos erros em gráficos que confrontavam os valores dos cálculos obtidos através da modelagem difundida pela literatura e a modelagem proposta no presente item. Entretanto verificou-se que a sua obtenção com maior facilidade e precisão era possível através da metodologia que utiliza o erro quadrático, sendo conhecida por Mínimos Quadrados. Essa implementação é apresentada no próximo item.

III.3.2 – Metodologia para Calibração da Constante α

A constante α para cada unidade transformadora é obtida através do método dos Mínimos Quadrados [20], sendo representada pela equação (3.03).

$$|S|^2 = \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2 \quad (3.03)$$

Sendo:

- S - Valor do erro entre os cálculos efetuados através da equação proposta pelo presente trabalho e a equação proposta pela literatura;
- a - Valor das perdas obtido através dos cálculos utilizando a equação proposta pela literatura;
- b - Valor das perdas obtido através dos cálculos utilizando a equação proposta pelo presente trabalho;
- i - Número do intervalo da medição;
- n - Valor da quantidade de intervalos.

Primeiramente, efetuam-se os cálculos das perdas no cobre utilizando-se a modelagem difundida pela literatura (valor base). Estas perdas foram calculadas também através da modelagem proposta, variando-se a constante de calibração em um intervalo de zero a quatro. Aplicando-se o método dos mínimos quadrados juntamente com o auxílio de gráficos e tabelas, encontra-se o valor da constante de calibração que proporciona menor erro entre cálculos efetuados com as duas metodologias.

III.3.3 – Determinação da Constante α do Transformador de 10 kVA

Conforme mencionado anteriormente, o procedimento necessário para a determinação da constante de calibração da equação proposta é baseada na análise de gráficos e tabelas, cujos dados, são obtidos através do método dos Mínimos Quadrados. Estes permitem visualizar o valor da constante que proporciona o menor erro para o cálculo das perdas no cobre do transformador utilizando a modelagem proposta neste trabalho. A seguir são apresentados os gráficos e as tabelas utilizadas para análise e determinação da constante de calibração da unidade transformadora de 10 kVA.

O gráfico da figura 3.14 tem o objetivo de verificar em qual intervalo a constante mencionada se encontra localizada.

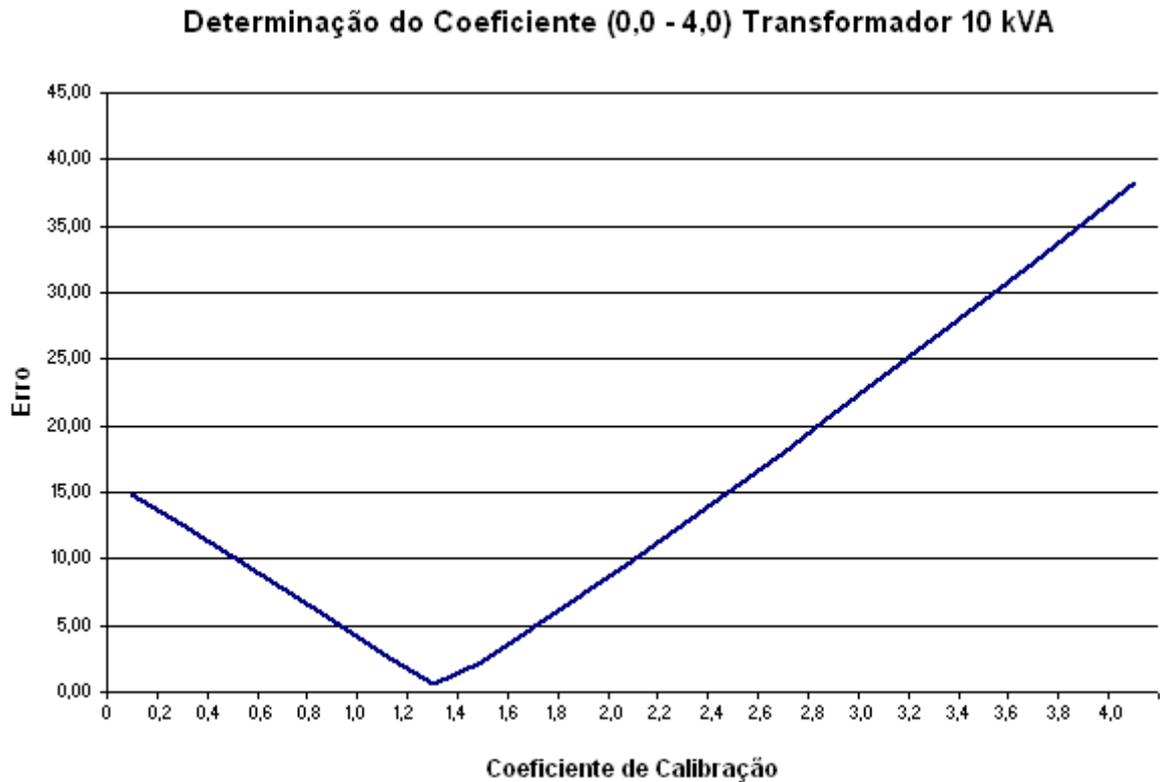


Figura 3.14 – Detalhe do Ponto de valor mínimo do erro quadrático em função do valor de a para a unidade transformadora de 10 kVA (intervalo (0,0 a 4,0)).

Visualizando-se o gráfico da figura 3.14, é possível verificar que o valor da constante de calibração que permitirá efetuar o cálculo das perdas no cobre para o transformador de 10 kVA através da modelagem difundida nesse trabalho, proporcionando-se o menor erro possível, está localizada no intervalo de 1,2 a 1,4. Assim, elaborou-se a tabela 3.04 que tem o objetivo de verificar qual é o valor mais preciso dessa constante de calibração.

Tabela 3.04 – Variação do erro quadrático em função do valor de α para a Unidade Transformadora de 10 kVA.

Determinação da Constante de Calibração do Trafo 10 kVA			
1,20 a 1,40		1,220 a 1,240	
α	Erro	α	Erro
1,20	0,6204	1,220	0,5074
1,22	0,5074	1,222	0,5016
1,24	0,5063	1,224	0,4971
1,26	0,6182	1,226	0,4938
1,28	0,7972	1,228	0,4917
1,30	1,0083	1,230	0,4910
1,32	1,2355	1,232	0,4915
1,34	1,4714	1,234	0,4933
1,36	1,7127	1,236	0,4964
1,38	1,9574	1,238	0,5008
1,40	2,2045	1,240	0,5063

A tabela 3.04 está dividida em duas partes. A primeira apresenta os valores dos cálculos dos erros quadráticos utilizando-se valores para a constante de calibração compreendidos no intervalo de 1,20 e 1,40, que foi apresentado no gráfico da figura 3.14. Assim verifica-se que a constante se encontra localizada no intervalo de 1,22 a 1,24 (células sombreadas). A segunda parte apresenta o refinamento para o intervalo mencionado. Este permite verificar que quando o valor da constante de calibração for igual a 1,230 (célula sombreada), o erro do cálculo das perdas no cobre dos enrolamentos da unidade trifásica de 10 kVA, utilizando-se a modelagem proposta será o mínimo possível.

III.3.4 – Determinação da Constante α do Transformador de 50 kVA

O processo utilizado na obtenção da constante de calibração para os cálculos das perdas no cobre para o transformador de 10 kVA, agora é aplicado também para o transformador de 50 kVA.

O gráfico da figura 3.15 tem o objetivo de verificar em qual intervalo se encontra a constante de calibração para esta unidade transformadora.

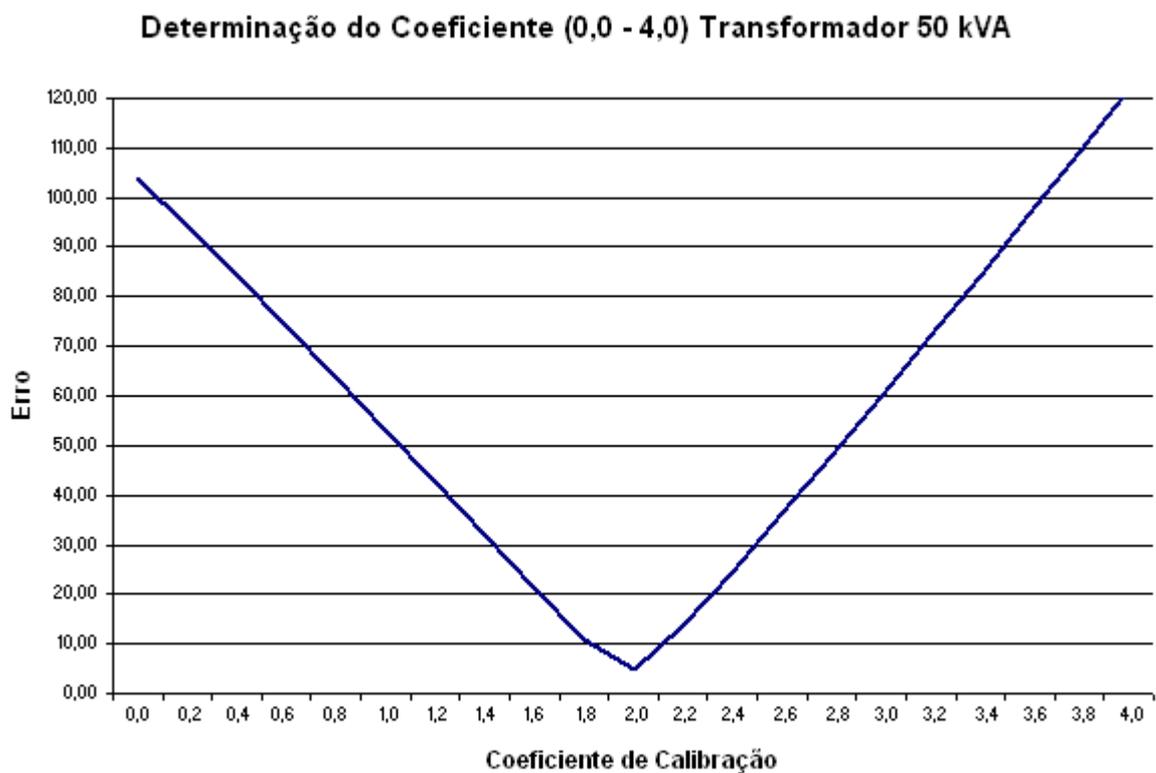


Figura 3.15 – Detalhe do Ponto de valor mínimo do erro quadrático em função do valor de α para a unidade transformadora de 50 kVA (intervalo (0,0 a 4,0)).

Visualizando-se o gráfico da figura 3.15, é possível verificar que o valor da constante de calibração que permitirá efetuar o cálculo das perdas no cobre para o transformador de 50 kVA através da modelagem difundida nesse trabalho proporcionando-se o menor erro possível, está localizada no intervalo de 1,8 a 2,0. Assim, elaborou-se a tabela 3.05 que tem o objetivo de verificar qual é o valor mais preciso dessa constante de calibração.

Tabela 3.05 – Variação do erro quadrático em função do valor de α para a Unidade Transformadora de 50 kVA.

Determinação da Constante de Calibração do Trafo 50 kVA			
1,80 a 2,00		1,960 a 1,980	
α	Erro	α	Erro
1,80	10,7270	1,960	4,6068
1,82	9,7311	1,962	4,5890
1,84	8,7617	1,964	4,5740
1,86	7,8296	1,966	4,5616
1,88	6,9503	1,968	4,5520
1,90	6,1474	1,970	4,5452
1,92	5,4557	1,972	4,5411
1,94	4,9233	1,974	4,5398
1,96	4,6068	1,976	4,5413
1,98	4,5526	1,978	4,5455
2,00	4,7707	1,980	4,5526

A tabela 3.05 tem as mesmas características da tabela 3.04, ou seja, ela está dividida em duas partes. A primeira apresenta os valores dos cálculos dos erros utilizando-se valores para a constante de calibração compreendidos no intervalo de 1,80 e 2,00, que foi apresentado no gráfico da figura 3.15. Assim verifica-se que a constante se encontra localizada no intervalo de 1,96 a 1,98 (células sombreadas). A segunda parte apresenta refinamento para o intervalo mencionado. Este permite verificar que quando o valor da constante de calibração for igual a 1,974 (célula sombreada), o erro do cálculo das perdas no cobre dos enrolamentos da unidade trifásica de 50 kVA, utilizando-se a modelagem proposta será o mínimo possível.

III.3.5 – Determinação da Constante α do Transformador de 15 kVA

A metodologia aplicada para obtenção da constante de calibração da equação proposta para as unidades transformadoras de 10 e 50 kVA, agora é novamente utilizada para determinação da constante de calibração do transformador de 15 kVA.

O gráfico da figura 3.16 apresenta a primeira análise para esta unidade transformadora.

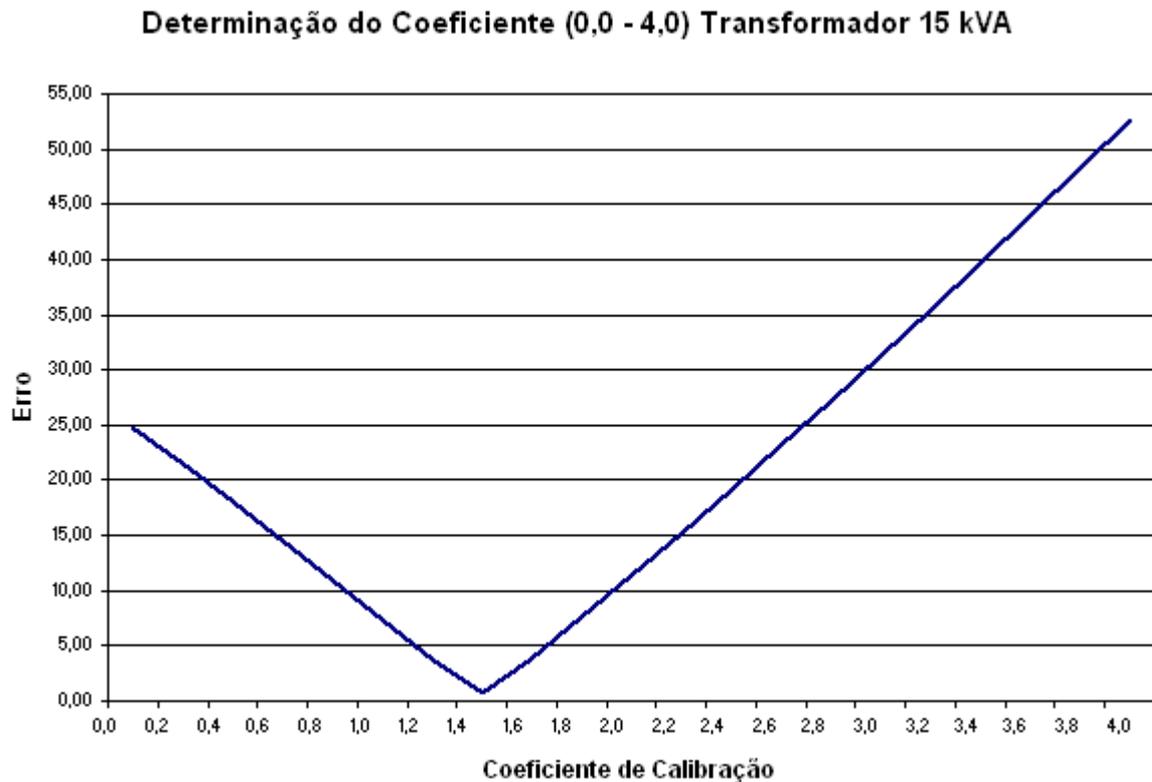


Figura 3.16 – Detalhe do Ponto de valor mínimo do erro quadrático em função do valor de α para a unidade transformadora de 15 kVA (intervalo (0,0 a 4,0)).

Visualizando-se o gráfico da figura 3.16, é possível verificar que o valor da constante de calibração que permitirá efetuar o cálculo das perdas no cobre para o transformador de 15 kVA através da modelagem difundida nesse trabalho, proporcionando-se o menor erro possível, está localizada no intervalo de 1,4 a 1,6. Assim, elaborou-se a tabela 3.06 que tem o objetivo de verificar qual é o valor mais preciso dessa constante de calibração.

Tabela 3.06 – Variação do erro quadrático em função do valor de α para a Unidade Transformadora de 15 kVA.

Determinação da Constante de Calibração do Trafo 15 kVA			
1,40 a 1,60		1,400 a 1,420	
α	Erro	α	Erro
1,40	0,6694	1,400	0,6694
1,42	0,7486	1,402	0,6685
1,44	0,9743	1,404	0,6697
1,46	1,2713	1,406	0,6729
1,48	1,6006	1,408	0,6781
1,50	1,9462	1,410	0,6853
1,52	2,3010	1,412	0,6945
1,54	2,6615	1,414	0,7055
1,56	3,0260	1,416	0,7182
1,58	3,3932	1,418	0,7326
1,60	3,7625	1,420	0,7486

A tabela 3.06 tem as mesmas características da tabela 3.04, ou seja, ela está dividida em duas partes. A primeira apresenta os valores dos cálculos dos erros utilizando-se valores para a constante de calibração compreendidos no intervalo de 1,8 e 2,0 que foi apresentado no gráfico da figura 3.15. Assim verifica-se que a constante se encontra localizada no intervalo de 1,40 a 1,42 (células sombreadas). A segunda parte apresenta refinamento para o intervalo mencionado. Este permite verificar que quando o valor da constante de calibração for igual a 1,402 (célula sombreada), o erro do cálculo das perdas no cobre dos enrolamentos da unidade trifásica de 15 kVA, utilizando-se a modelagem proposta será o mínimo possível.

III.4 – Análise das Perdas no Cobre dos Transformadores

Após as análises necessárias para obtenção da equação (3.02), deu-se início aos estudos que visam comprovar a sua viabilidade técnica. Nesse sentido, elaborou-se alguns gráficos comparativos que permitem visualizar os cálculos das perdas no cobre dos transformadores de 10, 50 e 15 kVA através das duas metodologias: o método tradicional que utiliza a equação (2.05) e o método que utiliza o valor da DHT_1 , conforme a equação (3.02).

Os gráficos que apresentam os cálculos das perdas no cobre dos três transformadores citados foram, elaborados utilizando-se os doze espectros harmônicos apresentadas no item III.2.1 do presente capítulo. Conforme mencionado anteriormente, os espectros harmônicos foram selecionados de forma a representar diferenciadas condições de distorções harmônicas de corrente, objetivando calibrar a constante α da equação (3.02) para as três unidades transformadoras. Após calibração da constante α , é possível utilizar a equação proposta pra efetuar os cálculos das perdas nessas unidades transformadoras utilizando-se espectros harmônicos diferenciados dos 12 selecionados no item III.2.1.

III.4.1 – Análise das Perdas no Cobre para o Transformador 10 kVA

Na figura 3.17 pode-se visualizar o comportamento das perdas no cobre para o transformador de 10 kVA. Salienta-se que os dados de resistência CA utilizados na elaboração desses cálculos foram extraídos da referencia [11], tendo como base resultados considerados como convencionais (cálculo convencional).

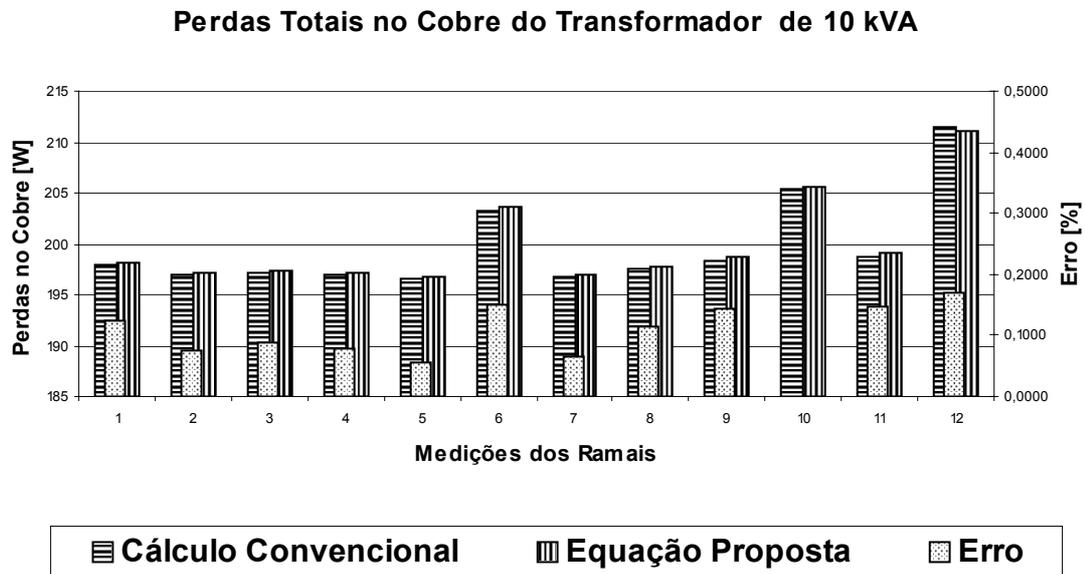


Figura 3.17 – Gráfico das Perdas No Cobre Transformador 10 kVA Utilizando as Equações Convencional e Proposta.

A figura 3.17 apresenta os cálculos das perdas no cobre para um transformador de 10 kVA. Estes foram obtidos considerando-se que o mesmo se encontra com carregamento nominal juntamente com as distorções harmônicas de corrente.

Verifica-se que a nova metodologia de cálculo para estas perdas apresenta valores muito próximos aos dos valores obtidos com a metodologia convencional (proposta pela literatura atual), sendo que o erro não ultrapassou 0,25%.

III.4.2 – Análise das Perdas no Cobre para o Transformador de 50 kVA

Pode-se visualizar na figura 3.18, o comportamento das perdas no cobre para a unidade transformadora de 50 kVA, sendo que os cálculos foram efetuados através das equações mencionadas anteriormente. Salienta-se que os dados de resistência CA utilizados na elaboração desses cálculos foram extraídos da referencia [11], tendo como base resultados considerados como convencionais (cálculo convencional).

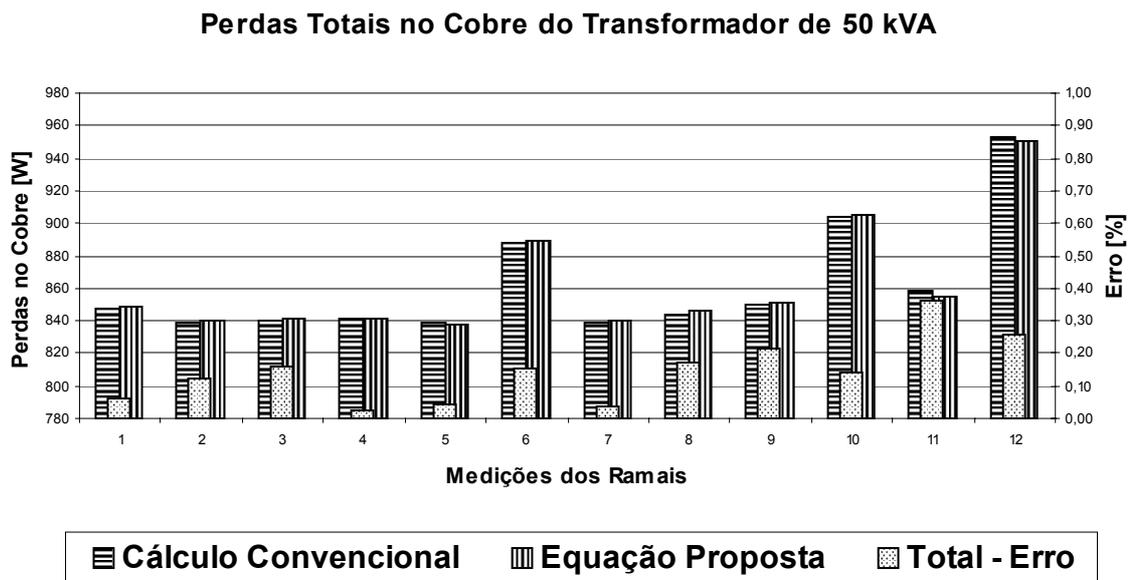


Figura 3.18 – Gráfico das Perdas No Cobre Transformador 50 kVA Utilizando as Equações Convencional e Proposta.

Observa-se no gráfico da figura 3.18 que a equação sugerida neste trabalho apresenta um bom desempenho frente aos diferenciados espectros harmônicos utilizados nos cálculos. Com relação à precisão dos cálculos, observa-se que o erro pode ser considerado irrelevante para os diversos DHT₁'s utilizados, pois este ficou abaixo de 0,4%.

III.4.3 – Análise das Perdas no Cobre para o Transformador 15 kVA

Já na figura 3.19 pode-se visualizar o comportamento das perdas no cobre para o transformador de 15 kVA. Salienta-se que os dados de resistência CA utilizados na elaboração desses cálculos foram obtidos através de atividades experimentais que foram apresentadas no capítulo II, tendo como base resultados considerados como convencionais (cálculo convencional).

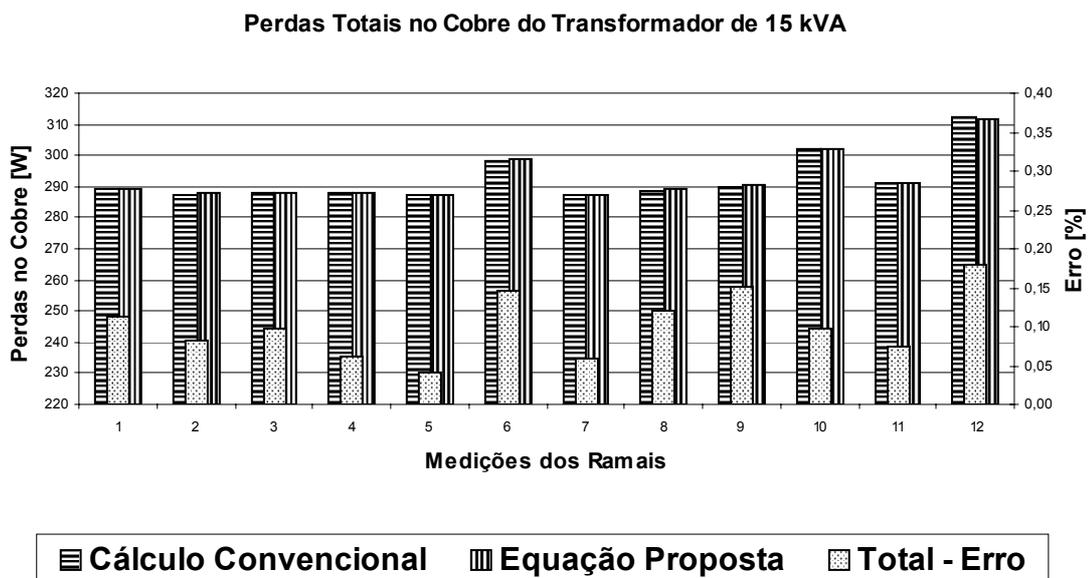


Figura 3.19 – Gráfico das Perdas No Cobre Transformador 15 kVA Utilizando as Equações Convencional e Proposta.

Diante do gráfico da figura 3.19, verifica-se que a desempenho da equação proposta nesse trabalho para quantificação das perdas no cobre de transformadores em ambientes não-senoidais é muito significativa, sendo que seu erro para a unidade transformadora de 15 kVA ficou abaixo de 0,2 % para todos os espectros harmônicos utilizados.

III.5 – Conclusões

Este capítulo foi direcionado para descrever o desenvolvimento e validação de uma metodologia que permite obter os cálculos das perdas no cobre de transformadores em ambientes não-senoidais utilizando a DHT₁. Através de análises, foi comprovado que as perdas no cobre de transformadores quando operando em ambiente não-senoidal têm seu comportamento muito semelhantes à de uma exponencial, e assim, proporcionado a possibilidade dessas perdas serem calculadas de forma aproximada, utilizando uma modelagem com esta característica.

Foram apresentados gráficos com espectros harmônicos diferenciados, oriundos de medições efetuadas em ramais da área de concessão de uma empresa de distribuição de energia elétrica do estado de São Paulo. Estes foram utilizados para obtenção dos cálculos das perdas dos transformadores em estudo, para condições não-senoidais.

Foram apresentados também, gráficos contendo os cálculos das perdas no cobre através de duas metodologias: a convencional representada pela equação (2.05) e a proposta nesse trabalho. Os resultados obtidos frente às várias distorções harmônicas de corrente utilizadas nesses cálculos foram muito significativos, pois o erro em nenhum momento excedeu o valor de 0,4%.

Para tanto, é necessário salientar que a equação aqui apresentada terá uma constante α para cada tipo de transformador. Transformadores de mesma potência, porém de fabricantes diferentes podem apresentar uma pequena divergência nos cálculos quando utilizando a mesma constante α . Isso é função dos mesmos poderem possuir características construtivas diferenciadas tais como bitola de condutores, dimensão das partes metálicas (núcleo, paredes do tanque, etc).

Quanto maior a quantidade de espectros harmônicos utilizados na calibração da constante α da equação (3.02), melhor será a precisão da mesma para efetuar os cálculos das perdas no cobre de uma determinada unidade transformadora.

Uma vez que a constante α da equação (3.02) foi calibrada utilizando-se diversos espectros harmônicos, a mesma poderá ser utilizada para cálculos de distorções harmônicas, cujos espectros harmônicos não tenham sido utilizados na sua calibração. Esse procedimento pode não ser recomendado caso os espectros harmônicos que não foram utilizados na calibração tenham características muito diferenciadas dos espectros utilizados em sua calibração.

É necessário salientar também que para a utilização desta nova metodologia é necessário obter os valores de resistência do transformador para cada ordem harmônica, pois estes valores são utilizados nos cálculos das perdas no cobre, necessárias para a calibração da equação e conseqüente obtenção da constante α . Foi apresentado também que a calibração dessa constante é através da metodologia de mínimos quadrados.

Foi possível verificar através dos resultados que quanto maior for a potência do transformador em análise, maior será o valor da constante empregada. Isso se deve ao fato de os transformadores de maior porte possuírem cabos com bitolas maiores. Como foi visto no capítulo introdutório, a manifestação dos efeitos pertinentes à variação da frequência se elevam consideravelmente quando a bitola dos condutores aumenta.

Através dos resultados aqui apresentados, verificou-se que a metodologia abordada proporciona a possibilidade de se efetuar os cálculo das perdas no cobre de transformadores operando em ambiente não-senoidal através do DHT₁ com considerável precisão, e assim, favorecendo obter os valores das perdas em múltiplas unidades de mesmas características construtivas submetidas a diferentes cenários de DHT₁, pois sua utilização dispensa a utilização das amplitudes de corrente para cada ordem harmônica.

Os cálculos apresentados neste capítulo são pertinentes às perdas no cobre dos enrolamentos do transformador. Para obter as perdas totais do equipamento bastaria acrescentar as perdas referentes ao núcleo. Entretanto, simulações computacionais da referência [4] revelam que elevadíssimas distorções harmônicas de tensão seriam necessárias para que as perdas no núcleo sofressem pequenas alterações. O apêndice A apresenta os valores das distorções harmônicas de tensão dos ramais de distribuição que foram utilizados. Diante desses pode-se verificar que seus valores são todos de pequena amplitude, justificando a ausência de análises relacionadas a este assunto nesta dissertação.

CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES GERAIS

Ao longo desta dissertação foram apresentadas algumas etapas objetivando apresentar e validar uma modelagem que permita efetuar os cálculos das perdas nos enrolamentos dos transformadores operando em ambientes não-senoidais dispensando a utilização dos dados de DHI_I , e utilizando o valor de DHT_I , visando facilitar enormemente a obtenção das perdas técnicas dos transformadores que compõem um parque de distribuição de uma concessionária de energia elétrica.

Através das etapas que foram apresentadas foi possível constatar algumas contribuições oferecidas por este trabalho. Os resultados experimentais utilizando o transformador com isolamento a óleo mineral, proporcionou uma contribuição significativa, tendo em vista o fato que os mesmos predominam nos parques de distribuição de energia elétrica.

Diversos artigos apresentam metodologias para se obter a resistência CA de transformadores monofásicos. Realizou-se algumas pesquisas destinadas à seleção de trabalhos que apresentassem metodologias para se obter esta grandeza em transformadores trifásicos e constatou-se que existem poucos trabalhos neste seguimento de pesquisa. Uma das causas certamente é a falta de alguns equipamentos necessários para realização dos experimentos. Sendo assim, ressalta-se também mais esta contribuição do presente trabalho.

Dentro deste contexto, este capítulo tem por meta apresentar as principais conclusões obtidas durante esta dissertação, assim como também apresentar os resultados esperados dos temas propostos.

O capítulo I iniciou uma breve introdução abordando o grande aumento da utilização de cargas não-lineares, suas conseqüências e implicações nos transformadores de potência e também a motivação para continuidade de estudos do comportamento dos transformadores operando em ambientes não-senoidais.

Diante dos estudos realizados pelas referências bibliográficas abordadas no capítulo introdutório, foi possível verificar que a resistência dos enrolamentos do transformador, de fato, aumentam consideravelmente com o aumento da frequência da corrente drenada, sendo esta oriunda de distorções harmônicas de corrente provocadas por cargas não-lineares. Foi visto também que o aumento da resistência somado a ação de correntes harmônicas elevam consideravelmente as perdas técnicas dos enrolamentos dos transformadores.

O capítulo II consistiu na apresentação detalhada dos ensaios experimentais realizado em uma unidade transformadora trifásica de 15 kVA, que permitiu obter valores de resistência para as ordens harmônicas compreendidas entre a fundamental e a décima nona ordem. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, proporcionando forte contribuição aos diversos estudos realizados sobre o comportamento da resistência dos enrolamentos do transformador operando com cargas não-lineares. Os resultados apresentados no capítulo em questão estão condizentes com a teoria abordada no capítulo introdutório, vindo a reforçar que, de fato, a resistência dos enrolamentos dos transformadores aumentam consideravelmente quando operam com processamento de correntes de frequências maiores que a fundamental.

O capítulo III apresentou uma nova modelagem que possibilita efetuar o cálculo das perdas no cobre dos enrolamentos do transformador em ambiente não-senoidal utilizando o valor médio da DHT_1 (valor médio do período extraído da medição). De posse de duas medições de distorções harmônicas de tensão e corrente efetuadas em ramais distintos da área de concessão de uma concessionária do estado de São Paulo, selecionou-se vários períodos de forma a obter as diferentes distorções no dia-dia desses ramais.

A validação da modelagem apresentada foi efetuada confrontando os cálculos obtidos através da metodologia proposta e a utilizada pela literatura atual. Os valores dos erros encontrados entre as duas metodologias foram irrelevantes, vindo validar plenamente esta nova modelagem.

É fato que a modelagem aqui proposta, depende de ensaios que determinem a resistência CA do transformador para que se possa efetuar a sua calibração através da constante α . Entretanto este esforço será fortemente compensado quando o interesse for quantificar as perdas técnicas de um conjunto de transformadores pertencentes a uma determinada área de uma concessionária de energia elétrica, operando em ambientes não-senoidais. Esta compensação é efetuada porque a modelagem mencionada dispensa os dados das DHI_1 . Outra contribuição importante proporcionada através da utilização dessa modelagem é com relação ao tipo de instrumentos necessário para efetuar as medições do valor de DHT_1 , pois existem alguns instrumentos que não fornecem os dados de DHI_1 .

Muito embora esta nova modelagem conjunta tenha originado algumas dificuldades iniciais para implementação, sua utilização proporciona obter valores de forma fácil e precisa.

O tema focado pelo presente trabalho ainda oferece alguns desafios tais como as diretrizes a seguir estabelecidas:

- A maioria dos sistemas de distribuição de energia elétrica trabalha de forma otimizada, utilizando apenas as unidades transformadoras trifásicas com capacidade de 45, 75, 112,5 e 225 kVA. Um estudo realizando ensaios de forma a obter a resistência CA para cada unidade transformadora possibilitaria que as concessionárias constatassem com melhor precisão os valores das perdas técnicas dos transformadores que compõe seu parque de distribuição.
- Ensaio de forma a verificar a diferença entre unidades transformadoras de mesma capacidade, porém de fabricantes diferentes contribuiriam para a obtenção de dados mais confiáveis.
- Analisar o comportamento de transformadores de grande porte frente à utilização da metodologia de cálculo das perdas utilizada neste trabalho;
- Desenvolver uma modelagem que permita determinar o valor de α (constante de calibração), através de dados que dependem do tipo do transformador tais como: capacidade e características construtivas do mesmo.

Apêndice A

A.1 – Dados das Medições

Medição 01						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 18/12/2003 (23:40) a 25/12/2003 (00:20)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	7,70	7,73	8,16	1,85	1,51	1,32
5	5,56	5,32	5,73	3,12	3,33	3,08
7	2,07	2,03	2,09	1,22	1,33	1,12
9	1,41	1,05	0,87	0,50	0,33	0,39
11	0,55	0,51	0,51	0,52	0,40	0,44
13	0,50	0,58	0,56	0,50	0,35	0,38
15	0,47	0,53	0,42	0,58	0,36	0,40
17	0,28	0,30	0,25	0,62	0,29	0,47
19	0,16	0,20	0,16	0,64	0,32	0,52
DHT	9,87	9,71	10,27	4,07	3,98	3,69

Tabela A.01 - Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 01, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.

Medição 02						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 06/01/2004 (17:10) a 06/01/2004 (21:50)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	7,01	5,33	5,78	0,71	0,58	0,65
5	3,88	3,29	2,72	1,95	2,08	2,05
7	0,79	0,74	0,59	0,68	0,83	0,70
9	0,36	0,41	0,33	0,12	0,09	0,11
11	0,53	0,26	0,48	0,12	0,08	0,18
13	0,40	0,49	0,34	0,16	0,22	0,18
15	0,13	0,20	0,09	0,06	0,09	0,05
17	0,12	0,10	0,13	0,05	0,05	0,07
19	0,11	0,11	0,09	0,06	0,07	0,05
DHT	8,09	6,35	6,45	2,20	2,33	2,28

Tabela A.02 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 02, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 03						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 06/01/2004 (20:00) a 06/01/2004 (21:50)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	8,12	5,52	6,74	0,92	0,65	0,76
5	3,83	2,80	2,91	2,01	2,17	2,19
7	0,80	0,96	0,78	0,60	0,81	0,66
9	0,40	0,31	0,51	0,12	0,10	0,16
11	0,63	0,26	0,54	0,20	0,08	0,22
13	0,38	0,55	0,44	0,16	0,30	0,24
15	0,10	0,16	0,10	0,05	0,09	0,05
17	0,13	0,13	0,15	0,05	0,08	0,07
19	0,10	0,09	0,03	0,05	0,06	0,03
DHT	9,05	6,30	7,43	2,31	2,44	2,44

Tabela A.03 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 03, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 04						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 04/01/2004 (03:10) a 04/01/2004 (04:10)						
Ordem	Corrente			Tensão		
Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	4,69	3,52	6,87	0,41	0,29	0,21
5	5,17	4,46	3,97	2,14	2,37	2,52
7	1,47	2,67	2,10	0,49	0,64	0,58
9	0,65	0,87	0,58	0,08	0,13	0,11
11	0,52	0,49	0,49	0,17	0,17	0,16
13	0,29	0,54	0,55	0,06	0,10	0,11
15	0,17	0,48	0,09	0,04	0,13	0,03
17	0,21	0,05	0,09	0,06	0,02	0,03
19	0,05	0,09	0,02	0,01	0,03	0,01
DHT	7,20	6,39	8,26	2,24	2,49	2,61

Tabela A.04 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 04, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 05						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 07/01/2004 (01:10) a 07/01/2004 (02:20)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	3,89	2,76	4,73	0,39	0,26	0,19
5	4,45	4,31	3,14	2,35	2,52	2,51
7	0,67	2,26	1,21	0,55	0,76	0,57
9	0,92	0,83	0,51	0,16	0,14	0,14
11	0,91	0,47	0,61	0,29	0,18	0,21
13	0,26	0,36	0,33	0,06	0,09	0,07
15	0,22	0,35	0,13	0,06	0,12	0,04
17	0,23	0,10	0,14	0,06	0,03	0,03
19	0,11	0,06	0,03	0,03	0,03	0,01
DHT	6,10	5,70	5,87	2,48	2,66	2,59

Tabela A.05 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 05, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 06						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 18/12/2003 (18:58) a 18/12/2003 (21:44)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	15,36	12,19	18,89	0,89	0,67	1,01
5	9,76	7,43	11,90	1,81	2,02	1,88
7	4,78	3,64	4,24	0,99	0,91	1,02
9	2,11	1,86	1,49	0,32	0,24	0,30
11	0,62	0,77	1,14	0,19	0,16	0,18
13	0,97	0,96	1,27	0,28	0,15	0,29
15	0,86	1,02	1,07	0,23	0,20	0,26
17	0,60	0,58	0,57	0,14	0,12	0,20
19	0,31	0,43	0,48	0,08	0,09	0,16
DHT	19,00	14,95	22,87	2,31	2,36	2,44

Tabela A.06 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 06, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 07						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 01/01/2004 (00:20) a 01/01/2004 (01:30)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	7,09	2,46	4,67	0,70	0,36	0,28
5	5,32	3,29	3,11	1,59	1,81	1,86
7	0,91	0,15	0,91	0,26	0,50	0,42
9	0,21	0,92	0,47	0,05	0,23	0,10
11	0,31	0,69	0,56	0,09	0,27	0,22
13	0,44	0,33	0,25	0,14	0,10	0,08
15	0,51	0,14	0,14	0,18	0,06	0,05
17	0,22	0,04	0,13	0,09	0,04	0,05
19	0,16	0,06	0,03	0,07	0,03	0,02
DHT	8,95	4,29	5,74	1,77	1,95	1,94

Tabela A.07 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 07, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 08						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 03/01/2004 (13:20) a 03/01/2004 (17:20)						
Ordem	Corrente			Tensão		
Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	8,09	7,92	7,50	0,64	0,64	0,53
5	4,73	4,58	4,23	1,77	2,16	2,03
7	1,08	1,08	1,17	0,76	0,84	0,75
9	0,29	0,30	0,25	0,09	0,06	0,07
11	0,70	0,62	0,81	0,10	0,12	0,15
13	0,54	0,56	0,47	0,19	0,21	0,16
15	0,18	0,16	0,15	0,06	0,06	0,06
17	0,18	0,17	0,20	0,07	0,07	0,07
19	0,16	0,19	0,17	0,08	0,09	0,07
DHT	9,48	9,25	8,75	2,05	2,42	2,24

Tabela A.08 - Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 08, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.

Medição 09						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 04/01/2004 (13:30) a 04/01/2004 (17:30)						
Ordem	Corrente			Tensão		
Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	9,59	9,13	9,06	0,61	0,69	0,65
5	6,24	5,84	5,02	2,36	2,74	2,68
7	1,46	1,29	0,99	0,79	0,83	0,76
9	0,29	0,38	0,54	0,07	0,09	0,09
11	0,93	0,92	0,96	0,12	0,16	0,19
13	0,58	0,56	0,45	0,15	0,16	0,13
15	0,14	0,10	0,16	0,04	0,04	0,05
17	0,22	0,22	0,28	0,06	0,08	0,09
19	0,19	0,20	0,17	0,08	0,09	0,06
DHT	11,59	10,98	10,48	2,57	2,95	2,87

Tabela A.09 - Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 09, extraídos das medições realizadas no ramal residencial de distribuição de energia elétrica.

Medição 10						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 27/12/2003 (08:15) a 27/12/2003 (09:38)						
Ordem Harmônica	Corrente			Tensão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	15,41	23,71	13,99	0,65	0,65	0,54
5	11,16	11,01	8,98	1,20	1,38	1,18
7	5,51	4,80	3,25	0,84	0,78	0,76
9	3,42	3,56	1,57	0,23	0,17	0,22
11	0,97	2,22	1,05	0,21	0,19	0,21
13	1,23	1,12	0,95	0,17	0,14	0,16
15	1,32	1,23	0,69	0,16	0,12	0,16
17	0,65	0,91	0,50	0,16	0,12	0,16
19	0,30	0,47	0,18	0,10	0,07	0,05
DHT	20,22	26,98	17,09	1,66	1,75	1,56

Tabela A.10 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 10, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.*

Medição 11						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 28/12/2003 (01:30) a 28/12/2003 (03:30)						
Ordem	Corrente			Tensão		
Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	8,36	8,81	7,76	0,55	0,30	0,34
5	8,18	6,47	6,73	1,89	2,10	2,00
7	3,59	3,96	3,49	0,75	0,81	0,74
9	2,03	3,08	1,50	0,18	0,22	0,21
11	1,60	2,02	1,06	0,23	0,16	0,19
13	0,98	1,10	0,82	0,13	0,09	0,12
15	0,40	0,77	0,50	0,06	0,10	0,13
17	0,63	0,65	0,60	0,11	0,08	0,13
19	0,45	0,43	0,41	0,11	0,07	0,11
DHT	12,58	12,30	11,07	2,14	2,29	2,19

Tabela A.11 - Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 11, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.

Medição 12						
Componentes Harmônicas da Corrente e Tensão						
Período da Medição (RIC03350): 18/12/2003 (16:10) a 18/12/2003 (18:50)						
Ordem	Corrente			Tensão		
Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3	22,05	19,93	23,27	0,89	0,78	1,00
5	15,81	15,87	15,46	1,92	2,62	2,66
7	6,99	7,33	5,69	1,14	1,22	1,22
9	3,42	2,83	1,54	0,29	0,19	0,22
11	0,81	1,16	1,58	0,14	0,15	0,20
13	1,71	1,87	1,59	0,30	0,24	0,28
15	1,47	1,42	1,09	0,19	0,16	0,18
17	0,58	0,60	0,51	0,11	0,11	0,17
19	0,52	0,66	0,51	0,09	0,07	0,09
DHT	28,34	26,80	28,67	2,45	3,02	3,13

Tabela A.12 - *Valores médios de distorções harmônicas de tensão e corrente do período 12, extraídos das medições realizadas no ramal industrial de distribuição de energia elétrica.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Martignoni, A. **“Transformadores”**, 4ª edição, Editora Globo, 1979.
- [2] De Oliveira, J.C, **“Transformadores – Teoria e Ensaio”**, Sexta Edição, Edigard Brucher LTDA.
- [3] Vieira Jr. J. B., **“Eletrônica de Potência”** Apostila editada pela Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
- [4] Delayba, A. C. **“Comportamento de Transformadores com Cargas não Lineares: Uma abordagem Analítica, Experimental e Numérica pelo Método de Elementos Finitos”**; - Tese de Doutorado Apresentada à Escola Politécnica da USP; 1997.
- [5]- De Oliveira, L.C..O.; De Oliveira, J.C.; Miskulin M.S. **"Physical Considerations and Modelling of the AC/DC Double Excitation in Power Transformers"**. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Harmonics in Power Systems (ICHIPS'90 - IEEE), October/1990, Budapest, Hungria, pp. 101-106.

- [6]- De Oliveira, L.C.O; Rossi, J.C. Pires F.A.C.- **"Symmetrical Components Analysis of Harmonics Excitation Currents in Transformers Under DC Saturation"**, In: International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE-ICHQP/96, pp. 406-411, Las Vegas USA, october/1996.
- [7]- Rossi J.C.; De Oliveiral L.C.O; Stort, M.A.- **"The Influence of Double Excitation ac/dc in the Reactive Power Demand of 3-phase Transformers"**, In: 42th Midwest Syposium on Circuits and Systems, IEEE, Las Cruces, New Mexico, august/1999.
- [8] Delaiba A. C., **"The Effect Of Harmonics On Power Transformers Loss Of Life"**, IEEE/1996.
- [9]- Gonzales, D. - **"Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida Útil de Transformadores de Distribuição"** - Dissertação de Mestrado, FEIS- UNESP, Maio 2002.
- [10] Domingues E.G., **"Contribuições à Modelagem de Transformadores Trifásicos E Especiais Utilizando o Simulador SABER"**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Agosto, 1996.

- [11] Arthur W. Kelley, Steven W. Edwards, Jason P. Rhode, Mesult E. Baran, **“Transformer Derating for Harmonic Currents: A Wide-Band Measurement Approach for Energized Transformers”**, IEEE, Transac. on Industry Applications, November/1999, VOL 35 NO. 6.
- [12] Ewald, F. Fuchs, **“Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient P_{EC-R} , Derating of Single-Phase Transformers, and Comparison With K-Factor Approach”**, IEEE, Transactions on Power Deliverer, VOL 15, NO 1, January 2000.
- [13] Emanuel E. Alexander and Wang Xiaoming., **“Estimation of Loss of Life of power Transformers Supplying Nonlinear Loads”**, IEEE Trans. on Power apparatus and Systems, Vol. PAS-104, n°3, March 1985.
- [14] Hwang M. S., Grady W. M., and Sanders H. W., **“Distribution Transformer Winding Losses Due To Nonsinusoidal Currents”**, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD-2, n° 1, January, 1987.
- [15] ANSI/IEEE **“Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, When Supplying Non-Sinusoidal Load Currents ”**, IEEE, NY, / Febr. 1998.

[16] Garcia, D. R. - "**Gerenciamento de Transformadores de Distribuição Operando em Ambientes Não-Senoidais**" - Dissertação de Mestrado, FEIS- UNESP, Fevereiro 2002.

[17] De Almeida, W. G. e Freitas, F. D., "**Circuitos Polifásicos**", Primeira Edição, FINALEC (Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos), 1995.

[18] Aguiar, A. L. e Camacho, J. R., "**Transformadores – Aulas Práticas de Laboratório**" Apostila editada pela Universidade Federal de Uberlândia, Março de 2000, pág. 23.

[19] De Oliveira, J.C. e outros, "**Cargas Elétricas Especiais**" Apostila editada pela Universidade Federal de Uberlândia, 1986.

[20] Gauss, C. F. "**Least Squares**", *Werke*, 4, 1-93, Em 1809.

<http://astro.if.ufrgs.br/minq/minq.htm>