

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

**EFEITOS DE CARGAS NÃO-LINEARES NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Cairo Rezende dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Miranda Machado

Goiânia
2012

CAIRO REZENDE DOS SANTOS

**EFEITOS DE CARGAS NÃO-LINEARES NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Miranda Machado

Goiânia
2012

CAIRO REZENDE DOS SANTOS

**EFEITOS DE CARGAS NÃO-LINEARES NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, para a obtenção do grau de Mestre, aprovada em 30 de maio de 2012, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Paulo César Miranda Machado
Presidente da Banca – EMC/UFG

Prof. Dr. Samuel César Mota de Paula - IFG

Prof. Dr. Antônio Melo de Oliveira – EMC/UFG

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por conduzir-me em toda a minha trajetória durante este trabalho e por me abençoar nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Me. Luiz Roberto Lisita, que idealizou a pesquisa e participou ativamente da mesma.

Ao orientador, Prof. Dr. Paulo César Miranda Machado, pela oportunidade, pelos conhecimentos repassados e pela paciência e confiança depositada.

Aos colegas e professores, que de alguma forma colaboraram para o alcance deste objetivo.

A minha família pelo eterno apoio, acolhimento e bons pensamentos que colaboraram para o alcance deste objetivo.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	7
ÍNDICE DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	11
RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. PERDAS EM TRANSFORMADORES.....	21
2.2. EFEITO DAS CORRENTES HARMÔNICAS NAS PERDAS DO TRANSFORMADOR	23
2.2.1. Efeito da componente <i>dc</i> da corrente de carga.....	23
2.2.2. Efeito das correntes harmônicas sobre a perda no núcleo.....	24
2.2.3. Efeito das correntes harmônicas sobre a perda nos enrolamentos em <i>dc</i> ...	24
2.2.4. Efeito das correntes harmônicas na perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC})	24
2.2.5. Efeito das correntes harmônicas na P_{NL}	25
2.3. PERDAS EM TRANSFORMADOR COM CARGAS NÃO-LINEARES.....	26
2.3.1. Fator de Perda Harmônica	26
2.3.2. Fator K	27
2.4. DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)	28
2.5. DEPRECIAÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL ($DERATING$)	29
2.6. PONTOS DE MAIOR AQUECIMENTO	31
3. MODELAGEM.....	32
3.1. SISTEMA IMPLEMENTADO	32
3.2. MODELOS TEMPORAIS ADOTADOS	34

3.3.	OBTENÇÃO DE PARÂMETROS	35
3.4.	METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS PERDAS	39
3.5.	MEDIÇÕES INDIRETAS DAS PERDAS (MODELO <i>T</i>).....	42
3.6.	CORRENTE E POTÊNCIA MÁXIMAS.....	44
3.7.	RENDIMENTO	45
3.8.	METODOLOGIAS DE CÁLCULOS UTILIZADAS	46
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
4.1.	TRANSFORMADOR DO TIPO SECO.....	48
4.1.1.	Determinação dos parâmetros.....	48
4.1.2.	Transformadores em vazio	50
4.1.3.	Transformadores em carga.....	52
4.1.4.	Tensões, correntes, fatores de multiplicação, perdas, potências máximas e rendimentos dos transformadores.	64
5.	FATOR DE PERDA REAL (F_{RL}).....	75
6.	PLANEJANDO O DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR.....	87
6.1.	PROCEDIMENTO PARA O DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR .	88
7.	CONCLUSÃO.....	94
	ANEXO A – ARTIGOS PUBLICADOS	98
	ANEXO B – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ)	99
	ANEXO C – DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS	101
	ANEXO D – FOTOS DO SISTEMA IMPLEMENTADO	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama das perdas ocorrentes em transformadores.	21
Figura 2 – Campo eletromagnético produzido por correntes de carga em enrolamentos de transformador.	25
Figura 3 - Configuração <i>back-to-back</i> de dois transformadores trifásicos <i>Y-Y</i> , com medições sendo realizadas pelos lados de tensão inferior.	32
Figura 4 - Sistema de aquisição e tratamento de dados.....	33
Figura 5 - Modelo <i>L</i> por fase de dois transformadores conectados na configuração <i>back-to-back</i>	34
Figura 6 - Modelo <i>T</i> por fase de dois transformadores conectados na configuração <i>back-to-back</i>	34
Figura 7 – Diagrama de obtenção dos parâmetros do transformador.....	48
Figura 8 – Correntes nas três fases do transformador <i>T1</i> com <i>T2</i> em vazio.....	51
Figura 9 – Tensões e correntes na fase <i>a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> alimentando carga linear.	52
Figura 10 – Tensões e correntes na fase <i>a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> alimentando a carga <i>C2</i>	53
Figura 11 – Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da fase <i>a</i> do transformador <i>T2</i> alimentando a carga <i>C2</i>	54
Figura 12 – Tensões e correntes na fase <i>a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> alimentando a carga <i>C3</i>	55
Figura 13 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da fase <i>a</i> do transformador <i>T2</i> alimentando a carga <i>C3</i>	55
Figura 14 - Tensões e correntes na fase <i>a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> suprindo a carga <i>C4</i>	56
Figura 15 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da fase <i>a</i> do transformador <i>T2</i> alimentando a carga <i>C4</i>	57
Figura 16 - Tensões e correntes (fase <i>a</i>) dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> para a carga <i>C5</i>	58
Figura 17 – Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga (fase <i>a</i>) do transformador <i>T2</i> para carga <i>C5</i>	58
Figura 18 - Tensões e correntes na fase <i>a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> para a carga <i>C6</i>	59
Figura 19 - Espectro harmônico da corrente de carga (fase <i>a</i>) do transformador <i>T2</i> para a carga <i>C6</i>	59

Figura 20 - Tensões e correntes na <i>fase a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> para a carga <i>C7</i>	60
Figura 21 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga (<i>fase a</i>) do transformador <i>T2</i> para carga <i>C7</i>	61
Figura 22 - Tensões e correntes (<i>fase a</i>) dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> para a carga <i>C8</i>	62
Figura 23 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da <i>fase a</i> do transformador <i>T2</i> para a carga <i>C8</i>	62
Figura 24 - Tensões e correntes na <i>fase a</i> dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> suprindo a carga <i>C9</i>	63
Figura 25 - Espectro harmônico da corrente de carga (<i>fase a</i>) do transformador <i>T2</i> para a carga <i>C9</i>	64
Figura 26 – Corrente de neutro e <i>THDi</i> em função do fator de potência	66
Figura 27 – Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i> . ..	67
Figura 28 – Perdas totais nos enrolamentos dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	69
Figura 29 – Perdas nos núcleos dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	70
Figura 30 – Perdas totais nos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	72
Figura 31 – Potências máximas e rendimentos para os transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	74
Figura 32 – Tipos de cargas em função dos fatores F_{HL} , <i>Fator K</i> e F_{RL}	79
Figura 33 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) por F_{HL} , <i>Fator K</i> , <i>Linear</i> e F_{RL}	79
Figura 34 - Perdas no núcleo (P_{NL}) relativas aos métodos do F_{HL} , <i>Fator K</i> , <i>Linear</i> e F_{RL}	80
Figura 35 - Perdas totais (P_{Total}) relativas aos métodos do F_{HL} , <i>Fator K</i> , <i>Linear</i> e F_{RL}	81
Figura 36 – Valores dos expoentes <i>x</i> e <i>y</i> em função das cargas de <i>C2</i> a <i>C9</i>	81
Figura 37 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador <i>T2</i>	82
Figura 38 – Perda total nos enrolamentos do transformador <i>T2</i>	83
Figura 39 – Perdas no núcleo do transformador <i>T2</i>	84
Figura 40 – Perdas totais no transformador <i>T2</i>	84
Figura 41 - Perdas totais no transformador <i>T2</i> para a nova abordagem de perda no núcleo....	85
Figura 42 – Correntes máximas em <i>pu</i> ($I_{Tmax(pu)}$ e $I_{Mmax(pu)}$).	92
Figura 43 – Corrente máxima em <i>pu</i> em função da variação de P_{EC-R} , de (a) F_{HL} e de (b) F_{RL}	93
Figura B 1 – Sistema de medição utilizado.....	99
Figura C 1 – Carga linear nominal trifásica em <i>Y</i> com fator de potência unitário.	101
Figura C 2 – Esquema de ligação para carga <i>C2</i>	102
Figura C 3 – Esquema de ligação para carga <i>C3</i>	102

Figura C 4 – Esquema de ligação para a carga C4.....	103
Figura C 5 – Esquema de ligação para a carga C5.....	103
Figura C 6 – Esquema de ligação para carga C6.....	104
Figura C 7 – Esquema de ligação para a carga C7.....	104
Figura C 8 – Esquema de ligação para carga C8.....	105
Figura C 9 – Esquema de ligação para carga C9.....	105
Figura D 1– Sistema de aquisição de dados.	107
Figura D 2 – Quadro de cargas.....	107
Figura D 3 – Transformadores do tipo seco conectados em back-to-back.....	108
Figura D 4 – Varivolt utilizado nos ensaios.	108

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas utilizadas	47
Tabela 2 – Dados obtidos do ensaio de resistência dos enrolamentos	49
Tabela 3 – Resistência nos transformadores	49
Tabela 4 – Resistências em <i>dc</i> , em <i>ac</i> e por correntes parasitas na configuração <i>back-to-back</i>	50
Tabela 5 – Perda obtida através do ensaio em vazio	50
Tabela 6 – Perdas em vazio para os transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	51
Tabela 7 – Tensões, correntes e fatores de multiplicação calculados para os transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	65
Tabela 8 – Perda por correntes parasitas nos enrolamentos dos transformadores.....	67
Tabela 9 – Perdas totais nos enrolamentos dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	68
Tabela 10 – Perdas nos núcleos dos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	70
Tabela 11 – Perdas totais nos transformadores <i>T1</i> e <i>T2</i>	71
Tabela 12 – Potências máximas e rendimentos dos transformadores.	73
Tabela 13 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador <i>T2</i> (modelos <i>T</i> e <i>L</i>).	76
Tabela 14 - Perdas fora dos enrolamentos do transformador <i>T2</i> (modelos <i>T</i> e <i>L</i>).	77
Tabela 15 - Valores dos expoentes <i>x</i> e <i>y</i> para as cargas de C2 a C9.	78
Tabela 16 - Fatores de multiplicação para as cargas de C2 a C9.	78
Tabela 17 - Diferenças percentuais em relação ao modelo <i>T</i> para as cargas de C2 a C9.	86
Tabela 18 - Espectros harmônicos das correntes teóricas para as cargas de C2 a C4 e de C6 a C8.	90
Tabela 19 - Espectros harmônicos, medidos, das cargas analisadas.	91
Tabela 20 - Correntes máximas teóricas e medidas em <i>pu</i> e os erros entre elas.	91
Tabela 21 – Resistências obtidas para realização dos ensaios.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

B valor máximo da indução no núcleo

f frequência com que o campo magnético alterna

F_{K1} Fator K calculado para o transformador $T1$

F_{K2} Fator K calculado para o transformador $T2$

F_{HL} Fator de Perda Harmônica

F_{HL1} Fator de Perda Harmônica do transformador $T1$

F_{HL2} Fator de Perda Harmônica do transformador $T2$

F'_{HL} Fator de Perda Harmônica Corrigido

F_{HL-STR} Fator de Perda Harmônica por Outras Perdas

$F_{HL-STR1}$ Fator de Perda Harmônica por Outras Perdas, calculado através da corrente que circula pelo lado de tensão inferior do transformador $T1$

$F_{HL-STR2}$ Fator de Perda Harmônica por Outras Perdas, calculado através da corrente que circula pelo lado de tensão inferior do transformador $T2$

F_{RL} Fator de Perda Real

F_{RL-STR} Fator de Perda Real por Outras Perdas

h_{max} maior ordem harmônica considerada com potência significativa

h ordem harmônica

H valor rms do campo magnético

I_1 valor rms da corrente que circula pelo transformador $T1$

I_2 valor rms da corrente que circula pelo transformador $T2$

I_{fund} valor rms da corrente fundamental no transformador

I valor rms da corrente de carga

$i_{1i}(t)$ corrente na fase i do transformador $T1$

$i_{2i}(t)$ corrente na fase i do transformador $T2$

I_{1max} valor da corrente máxima no transformador $T1$

I_{2max} valor da corrente máxima no transformador $T2$

$I_{1max(pu)}$ valor em pu da corrente máxima no transformador $T1$

$I_{2max(pu)}$ valor em pu da corrente máxima no transformador $T2$

I_{1fund} valor rms da harmônica fundamental da corrente do transformador $T1$

I_{2fund} valor rms da harmônica fundamental da corrente do transformador $T2$

I_{cc-i} valor rms da corrente na fase i durante o ensaio de curto-circuito

I_{cc} corrente de linha média

$i_{oi}(t)$ corrente de excitação na fase i do transformador

I_R corrente nominal

I_h valor *rms* da harmônica h de corrente

$I_{max(pu)}$ valor em *pu* da corrente máxima não-senoidal

k_e constante que depende do material do núcleo utilizada no cálculo da perda por correntes parasitas no núcleo

k_h constante que depende do material do núcleo utilizada no cálculo da perda por histerese

L_{ac} indutância de dispersão para o modelo L

P_{cc} perda no ensaio em curto-circuito

P_{dc} perda devido à resistência em *dc*

P_{dc1} perda devido à resistência em *dc* no transformador $T1$

P_{dc2} perda devido à resistência em *dc* no transformador $T2$

P_{dc-R} perda devido à resistência em *dc* para condição de carga nominal

P_{EC} perda por correntes parasitas nos enrolamentos

P'_{EC} perda por correntes parasitas nos enrolamentos específica para condutores retangulares

P_{EC-R} perda por correntes parasitas nos enrolamentos para cargas lineares

P_{EC-FHL} perda por correntes parasitas nos enrolamentos para o espectro harmônico da corrente medida utilizando F_{HL}

P_{EC-K} perda por correntes parasitas nos enrolamentos para o espectro harmônico da corrente medida utilizando o *Fator K*

P_{EC1} perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T1$

P_{EC2} perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$

$P_{EC1-FHL}$ perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T1$ calculada através do F_{HL}

$P_{EC2-FHL}$ perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$ calculada através do F_{HL}

P_{EC1-K} perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T1$ calculada através do *Fator K*

P_{EC2-K} perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$ calculada através do *Fator K*

P_{EC-O} perda por correntes parasitas nos enrolamentos na frequência fundamental

P_{EC-O1} perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T1$ na frequência fundamental

P_{EC-O2} perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$ na frequência fundamental

P_F perda devido ao efeito das correntes parasitas no núcleo

P_H perdas por histerese

$P_{m\acute{a}x}$ potência máxima que o transformador deve alimentar

$P_{N\acute{u}cleo}$ perda no núcleo

P_{OSL} perda fora dos enrolamentos

P_{OSL-R} perda fora dos enrolamentos para frequência nominal senoidal

$P_{OSL1-FHL}$ perda fora dos enrolamentos do transformador $T1$ calculada pelo método F_{HL}

$P_{OSL2-FHL}$ perda fora dos enrolamentos do transformador $T2$ calculada pelo método F_{HL}

P_{OSL1} perda fora dos enrolamentos do transformador $T1$

P_{OSL2} perda fora dos enrolamentos do transformador $T2$

P_W perda total nos enrolamentos

P_{W-R} perda total nos enrolamentos para condição de carga linear de potência nominal
 q número de fases

R_{ac} resistência equivalente para o modelo L com corrente senoidal

R_{acef} resistência equivalente efetiva

R_{acefi} resistência equivalente efetiva por fase

$R_{acefInf}$ resistência efetiva do lado de tensão inferior

$R_{acefSup}$ resistência efetiva do lado de tensão superior referida à tensão inferior

R_{acInf} resistência com corrente senoidal do lado de tensão inferior

R_{acSup} resistência com corrente senoidal do lado de tensão superior referido à tensão inferior

$RAPR$ Redução de Potência Aparente Nominal

R_{dc} resistência em dc

R_{dc-ab} resistência em dc entre os terminais a e b do transformador do lado Y

R_{dc-AB} resistência em dc entre os terminais A e B do transformador do lado delta

R_{dc-bc} resistência em dc entre os terminais b e c do transformador do lado Y

R_{dc-BC} resistência em dc entre os terminais B e C do transformador do lado delta

R_{dc-ca} resistência em dc entre os terminais c e a do transformador do lado Y

R_{dc-CA} resistência em dc entre os terminais C e A do transformador do lado delta

R_{dcInf} resistência em dc do lado de tensão inferior

$R_{dc\ Sup}$ resistência em dc do lado de tensão superior

$R_{dc\Delta}$ resistência por fase para o modelo em delta

R_{dcY} resistência por fase para o modelo em Y

R_{EC} resistência que representa as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos

R_{ECefi} resistência que representa as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos efetivas por fase

$R_{ECef\ Infi}$ resistência que representa as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do lado de tensão inferior efetivas por fase

$R_{ECef\ Supi}$ resistência que representa as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do lado de tensão inferior efetivas por fase

RPC Capacidade de Potência Ativa

$S_{derated}$ potência nominal depreciada

S_R potência nominal do transformador

$S_{max(pu)}$ potência máxima que o transformador alimenta em pu

S_{1max} potência máxima que o transformador $T1$ alimenta

S_{2max} potência máxima que o transformador $T2$ alimenta

T período

$T1$ transformador conectado à alimentação

$T2$ transformador conectado à carga

THD_i distorção harmônica total de corrente

THD_v distorção harmônica total de tensão

v volume total do material do núcleo

$v_{1i}(t)$ tensão na fase i do transformador $T1$

$v_{2i}(t)$ tensão na fase i do transformador $T2$

$v_{oi}(t)$ tensão no ramo de magnetização na fase i do transformador

$v_s(t)$ tensão aplicada durante o ensaio a vazio

V_{cc} tensão de fase média no ensaio de curto-circuito

v_{cc-i} tensão rms na fase i durante no ensaio de curto-circuito no domínio do tempo

V_{cc-i} tensão rms na fase i durante no ensaio de curto-circuito

V_{inf} tensão de linha do lado de tensão inferior do transformador

V_R tensão nominal inferior de linha do transformador

V_{sup} tensão de linha do lado de tensão superior do transformador

X_{ac} reatância equivalente

Z_{ac} impedância de curto-circuito

μ_o permeabilidade magnética do ar

ξ relação entre espessura do condutor e a profundidade de penetração do fluxo eletromagnético

ξ_R relação entre espessura do condutor e a profundidade de penetração do fluxo eletromagnético na frequência fundamental

ρ resistividade do condutor

τ dimensão do condutor, em metros, que fica perpendicular ao campo magnético

τ_{chapa} espessura da laminação

ε erro percentual

RESUMO

O uso intenso de conversores que utilizam semicondutores no processamento da energia elétrica dentro dos equipamentos elétricos e eletrônicos traz grandes benefícios como menor custo, maior eficiência e mais conforto, contudo traz também desvantagens, pois, quando conectados ao sistema de distribuição de energia elétrica produzem correntes distorcidas em relação à forma de onda senoidal. Desta forma, causam também deformações na forma de onda das tensões. Estes efeitos produzem perdas adicionais em condutores, transformadores e também nos próprios equipamentos que as gerou. Em transformadores, quando do suprimento de cargas não-lineares, ocorrem perdas adicionais, que elevam a temperatura comprometendo a isolamento e a sua vida útil. Os fatores usados internacionalmente e recomendados na UL 1561-1994 (*Fator K*) e na IEEE Std C57.110-2008 (Fator de Perda Harmônica - F_{HL}) para cálculo da potência máxima em transformadores trifásicos operando nestas condições serão objetos de comparação. Este trabalho, realizado em laboratório com dois transformadores trifásicos conectados na configuração *back-to-back*, tem por objetivo realizar um levantamento real das perdas em transformadores submetidos às cargas lineares e não-lineares e também propor um novo fator que dimensione os transformadores trifásicos alimentando estas cargas específicas. Outro aspecto que será abordado é o planejamento do dimensionamento de transformadores utilizando-se destes fatores. As medições e tratamento de dados são realizados nas tensões inferiores dos transformadores que utilizam transdutores de tensão e de corrente de alta precisão e programação em LabVIEW.

ABSTRACT

The intense use of solid state converters that use semiconductor in processing electric power of electrical and electronic equipment brings great benefits such as lower cost, greater efficiency and comfort, but also brings disadvantages, because when connected to the distribution system of electricity produced currents distorted relative to the sinusoidal waveform.. Thus also cause nonsinusoidal voltages that produce additional losses in conductors, transformers and also in its own equipment that generated them. In transformers feeding nonlinear loads occur further losses, which increase the temperature and compromising the insulation life. The factors used and internationally recommended in UL 1561-1994 (*K-factor*) and IEEE Std C57.110-2008 (Harmonic Loss Factor - F_{HL}) to calculate maximum power three-phase transformers operating in these conditions will be objects of comparison. This work, performed in the laboratory with two three-phase transformers connected in the configuration back-to-back, aims to conduct a survey of actual losses in transformers under linear and nonlinear load and also propose a new scale factor that the three-phase transformers feeding these specific charges. Another aspect to be addressed is planning the design of transformers using these factors. The measurements and data processing are performed at low voltages of the transformers and use transducers voltage and current with high accuracy and LabVIEW programming.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi objeto de interesse. Porém, até há algum tempo atrás, a qualidade tinha a ver sobretudo com a continuidade dos serviços, ou seja, a principal preocupação era que não houvesse interrupções no fornecimento de energia, e que as tensões e frequências fossem mantidas dentro de determinados limites considerados aceitáveis. Durante dezenas de anos a grande maioria dos receptores ligados às redes de energia elétrica consistia em cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são senoidais, as correntes consumidas eram também senoidais e de mesma frequência, podendo apenas encontrar-se defasadas relativamente à tensão [1].

Nas últimas décadas, devido à crescente evolução tecnológica da eletrônica de potência e conseqüentemente da grande utilização de cargas não-lineares, a presença de distorções harmônicas em sistemas de energia elétrica tem crescido substancialmente. Pesquisas realizadas indicam que atualmente as cargas não-lineares são responsáveis por cerca de 70% da demanda dos consumidores residenciais, comerciais e industriais [2]. Os efeitos devido aos conteúdos harmônicos presentes nos sinais de tensão e corrente podem gerar perdas elétricas adicionais e redução da vida útil de equipamentos elétricos.

Dentre os vários equipamentos que compõem os sistemas elétricos, destacam-se os transformadores de potência, os quais operam como uma “interface” entre o sistema elétrico e as cargas a serem supridas. Transformadores que suportam carregamentos não-lineares apresentam sobreaquecimento que geram perdas adicionais e diminuição de sua vida útil [3].

Neste sentido, para se evitar efeitos danosos, o transformador é submetido a uma potência menor que a nominal para que seu aquecimento seja equivalente àquele apresentado sob carga linear de potência nominal. Logo, faz-se necessário um estudo detalhado destas perdas adicionais para que se possa dimensionar o transformador de maneira eficiente no que diz respeito ao cálculo da potência máxima a ser fornecida.

A discussão deste tema teve início em março de 1980 no encontro da comissão de transformadores da sociedade de engenharia de potência do IEEE. Naquela ocasião estavam em discussão os efeitos das correntes de cargas não-lineares nas elevações de temperatura dos transformadores. No processo industrial as correntes não-senoidais de cargas não-lineares estavam, já naquela época, aumentando continuamente a uma porcentagem razoável da carga

total do transformador. Nesta reunião foi sugerido que uma norma fosse criada para auxiliar na previsão da nova capacidade de carga do transformador baseado na sua quantidade de distorção harmônica. Um artigo do IEEE elaborado por Alexander D. Kline [4] foi apresentado e distribuído para os membros do grupo de estudos em 1981. Deste trabalho surgiu o primeiro documento da metodologia usada na norma C57.110, considerando-se que as perdas por correntes parasitas variam com o quadrado da corrente e com a ordem do harmônico correspondente. Depois de várias preliminares a comissão elegeu a primeira Norma como C57.110/D1, “Recomendação Prática para Estabelecer a Capacidade do Transformador quando Suprir Cargas com Correntes Não-Senoidais”, publicada em 29 de outubro de 1982. Este documento foi revisado e emitido pelo IEEE padrão, C57.110 em 1986. Em 1986 este grupo de trabalho recebeu do IEEE uma premiação pelas reconhecidas contribuições para as indústrias e originalidade do trabalho. Kennedy e Ivey [5] em seu artigo de 1990, descreveu aplicações harmônicas baseado na IEEE C57.110-1986 [6]. Outro grupo de trabalho foi formado pela Comissão de Transformadores para revisar a IEEE C57.110-1986 pois esta ainda era confusa em termos de terminologias usadas em projetos de transformadores. Este documento revisado ficou pronto e passou a ser identificado por IEEE C57.110-1998. Após dez anos esta Norma foi novamente revisada e identificada por IEEE C57.110-2008 [6]. Atualmente os métodos utilizados para o redimensionamento do transformador baseiam-se no Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) e *Fator K* [6], contudo estudos já realizados [7][8][9] indicam que estes procedimentos podem levar a um dimensionamento maior que o necessário.

Este trabalho visa comparar as perdas medidas com as perdas calculadas por estes métodos e propor um novo método de dimensionamento de transformadores trifásicos de acordo com o tipo de carga e seus respectivos espectros harmônicos, através de medições de tensões e de correntes no domínio do tempo, realizadas nos terminais de baixa tensão de dois transformadores conectados na configuração *back-to-back*.

1.1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo dois é apresentada a classificação das perdas em transformadores e a influência das cargas não-lineares nas diversas partes do transformador. São definidas também neste capítulo as equações matemáticas representativas das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) e núcleo (P_{NL}), Fator de Perda Harmonica (F_{HL}), *Fator-K*,

Distorção Harmônica Total de Tensão ou de Corrente (THD_v ou THD_i), Depreciação da Potência Nominal (*Deratings*) e capacidade de potência ativa (*RPC*). Estas definições são baseadas na padronização do IEEE [6].

O capítulo três apresenta o sistema de medição implementado, os modelos temporais adotados e a modelagem matemática proposta baseada nas equações dos modelos L e T de circuito equivalente monofásico de transformador. Neste equacionamento, adota-se inicialmente o modelo L para o cálculo da resistência efetiva de dispersão por fase de cada transformador.

O capítulo quatro é dirigido à parte experimental. Para isto é utilizado um protótipo contendo dois transformadores trifásicos conectados *back-to-back*. Este arranjo destina-se à simulação prática.

O capítulo cinco destina-se a propor um novo fator que dimensione os transformadores trifásicos alimentando cargas específicas. Para o cálculo deste novo fator as perdas utilizadas são calculadas em função do tempo (modelo T).

O capítulo seis é destinado ao planejamento do dimensionamento de transformadores baseado na superposição de cargas pela soma de harmônicas de mesma ordem. Para efeito de comparação foi desenvolvido dois softwares. O primeiro programa, em LabVIEW, retrata o dimensionamento correto do transformador, devido à aquisição e tratamento de dados de forma temporal pela utilização de transdutores de tensão e de corrente de alta precisão. O segundo programa é aplicativo e faz o dimensionamento pela superposição de harmônicas de mesma ordem.

O capítulo sete apresenta as conclusões finais do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será abordado sobre a classificação das perdas em transformadores baseada na norma do IEEE C57.110-2008 [6]; sobre os efeitos das correntes de cargas não-lineares nas perdas dos transformadores; sobre as definições do fator de perda harmônica (F_{HL}), Fator K , Distorção Harmônica Total de tensão e de corrente (THD).

2.1. PERDAS EM TRANSFORMADORES

Os transformadores sob cargas dissipam potências por efeito Joule nas resistências dos enrolamentos relativas às correntes que circulam neles (correntes de cargas e correntes parasitas). Há outras perdas de dispersão presentes em partes que não são enrolamentos, tais como núcleo, união de núcleo, estrutura metálica e tanque [6][8][9]. O diagrama da Figura 1 descreve passo a passo as perdas em transformadores.

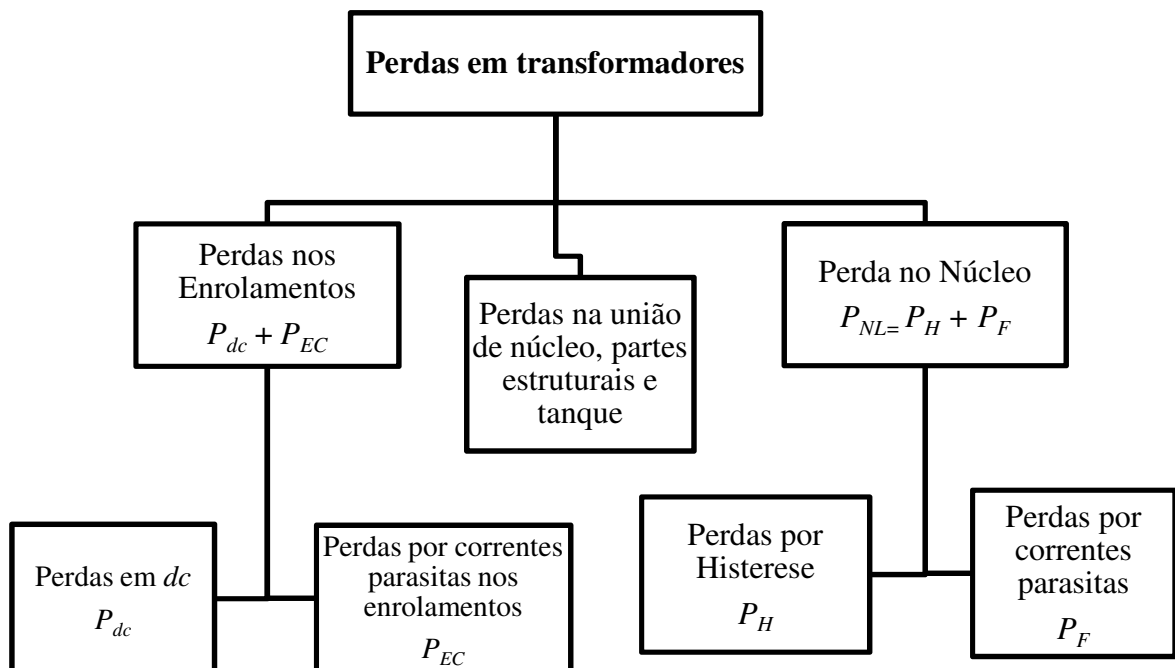


Figura 1 - Diagrama das perdas ocorrentes em transformadores.

A perda no núcleo em transformadores é causada pelo fluxo principal estabelecido no circuito magnético. Esta perda pode ser dividida em outras duas. Uma que é a perda por histerese e outra que é a perda por correntes parasitas [10]. A determinação das perdas por histerese (P_H) e perdas por correntes parasitas (P_F) é conforme (2.1) e (2.2) [9].

$$P_H = \nu f B^n K_h \quad (2.1)$$

$$P_F = K_e f^2 B^2 \tau_{chapa}^2 \nu \quad (2.2)$$

Onde

K_e e K_h são constantes que dependem do tipo de material que compõe o núcleo;

ν é o volume do material (m^3);

n é um número que depende do tipo de material ($1,5 \leq n \leq 2,5$);

τ_{chapa} espessura da laminação (mm);

B é o valor máximo da indução no núcleo em (Wb/m^2);

f é a frequência de alternância do campo magnético (Hz).

Logo, a perda no núcleo é expressa como a soma da perda por histerese (P_H) e perda por correntes parasitas (P_F) conforme (2.3) [9].

$$P_{núcleo} = P_H + P_F \quad (2.3)$$

A perda em carga (P_{LL}) é composta pela perda na resistência equivalente dc (R_{dc}) dos enrolamentos mais a perda adicional por correntes parasitas (P_{TSL}). Desta forma os fluxos dispersos são subdivididos e apresentam perda adicional por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) e perda adicional por correntes parasitas em outras partes que não sejam os enrolamentos (P_{NL}), conforme a equação (2.4). Portanto, a perda total em carga pode ser estabelecida de acordo com a equação (2.5), para o caso de transformador monofásico.

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{NL} \quad (2.4)$$

$$P_{LL} = R_{dc} I^2 + P_{EC} + P_{NL} \quad (2.5)$$

Um cálculo estimado da perda por correntes parasitas nos enrolamentos, causada pelo vetor campo magnético paralelo à seção do condutor, pode ser expresso por (2.6) [12].

$$P_{EC} \approx \frac{\pi f^2 \tau^2 \mu_0^2 H^2}{3\rho} \quad (W/m^2) \quad (2.6)$$

Onde

τ é a dimensão do condutor, que é perpendicular ao campo magnético (m);

ρ é a resistividade do material do condutor ($\Omega.m$);

μ_0 é a permeabilidade magnética do ar ($4\pi \cdot 10^{-7} H/m$);

H é a intensidade do campo magnético (H).

Dependendo da frequência de operação o fluxo magnético pode não penetrar totalmente no condutor, assim para altas frequências a equação (2.6) se torna conservadora [12].

Nas equações de perdas no núcleo e nos enrolamentos, nota-se que a frequência está presente em todas elas. Quando há harmônicos de correntes, há também harmônicas na onda de fluxo induzido. As perdas são maiores na presença de correntes harmônicas. Logo um transformador submetido à carga não-linear apresenta um sobreaquecimento podendo comprometer seu isolamento e sua vida útil [9].

2.2. EFEITO DAS CORRENTES HARMÔNICAS NAS PERDAS DO TRANSFORMADOR

Transformadores alimentando cargas não-lineares geram fluxos adicionais dispersos que produzem correntes parasitas em enrolamentos, núcleo e partes estruturais. Dependendo deste tipo de carga, pode-se ter uma considerável predominância de harmônicos. Cargas que prevaleçam harmônicas de ordem ímpar e múltiplas de três e componente dc da corrente de carga podem gerar, em alguns transformadores conectados em *estrela* (Y), um aumento da corrente de excitação, elevando-se assim, as perdas no núcleo [6].

2.2.1. Efeito da componente dc da corrente de carga

Corrente harmônica pode ocorrer de estar acompanhada por uma componente dc da corrente de carga, isto faz com que as perdas no núcleo do transformador aumentem. Dependendo do nível desta componente dc , poderá haver uma elevação na corrente de magnetização e, conseqüentemente elevação do nível de som audível e saturação do núcleo

[6]. É esperado que a componente dc não afete a capacidade de transferência de potência do transformador.

2.2.2. Efeito das correntes harmônicas sobre a perda no núcleo

Os harmônicos presentes na corrente de carga podem criar distorções na forma de onda da tensão e da corrente. Estas distorções, juntamente com a componente dc da corrente de carga, têm como consequência uma maior indução nas partes que compreendem o núcleo. Isto pode provocar aumento da corrente de excitação, indução por correntes parasitas não-senoidais no núcleo e elevação do nível do ruído sonoro que, somados, proporcionam um aumento da perda no núcleo [13]. A perda em vazio é composta pelas perdas por correntes parasitas e por histerese no núcleo e uma pequena parcela referente à corrente de excitação nos enrolamentos do primário do transformador. Os harmônicos que fluem na corrente de carga podem também criar distorções harmônicas na forma de onda da tensão. Uma alta indução no núcleo terá como consequência um aumento da saturação do mesmo. Dependendo da intensidade desta indução, a corrente de excitação poderá atingir até níveis de curto-circuito, podendo afetar permanentemente a curva de histerese [13].

2.2.3. Efeito das correntes harmônicas sobre a perda nos enrolamentos em dc

Se o valor rms da corrente de carga (I) é aumentado devido às correntes harmônicas, então a perda ($R_{dc} \cdot I^2$) será incrementada de acordo com o quadrado do aumento do nível da corrente [14]. É observado que se o valor da componente fundamental da corrente é mantido com a adição de correntes harmônicas, então o valor rms da corrente de carga aumentará, podendo levar o transformador à operação em sobrecarga [8]. Este é um fator que limita a potência aparente de transformadores que alimentam cargas não-lineares.

2.2.4. Efeito das correntes harmônicas na perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC})

As perdas por correntes parasitas em transformadores são geradas devido aos fluxos magnéticos dispersos que induzem tensões através de cada condutor [15] conforme Figura 2. Estas tensões são responsáveis pela circulação de correntes parasitas nestes

enrolamentos. A concentração de fluxos magnéticos produz correntes parasitas com maior intensidade no início e no final dos enrolamentos de tensão superior e de tensão inferior, o que produz aquecimento além do normal nestas regiões [8].

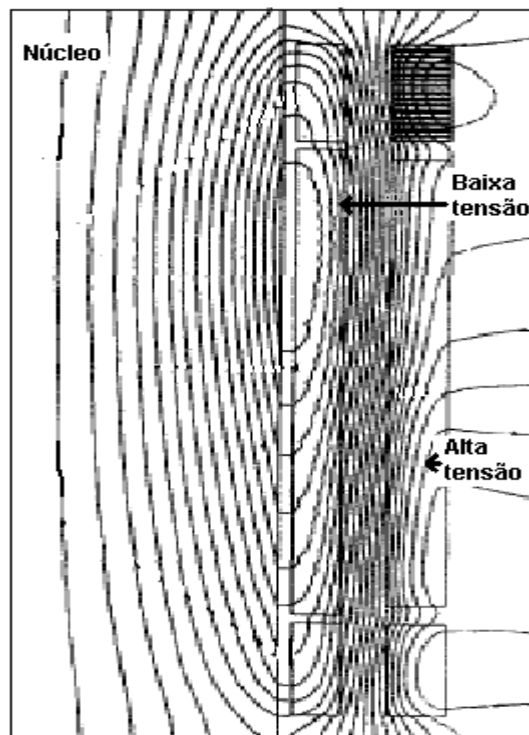


Figura 2 – Campo eletromagnético produzido por correntes de carga em enrolamentos de transformador.

O efeito do aumento das perdas por correntes parasitas produzidas pelas correntes de cargas não-lineares em enrolamentos é o calor gerado. Esta elevação de temperatura é a que mais afeta o bom funcionamento do transformador, assim sendo é vista como o aspecto mais crítico em relação às perdas produzidas por correntes harmônicas. O aumento da perda por correntes parasitas é produzido nos condutores que transportam as correntes não-senoidais. Tudo isso eleva mais a temperatura em pontos já quentes do transformador, a qual se torna um fator de maior limitação em seu projeto [8]. A perda nos enrolamentos devido às correntes parasitas (P_{EC}) no espectro da frequência e com potência significativa tende a ser proporcional ao quadrado da corrente de carga e ao quadrado da frequência [6].

2.2.5. Efeito das correntes harmônicas na P_{NL}

A perda adicional (P_{NL}) produzida no núcleo e as perdas nas junções, tanque e outras partes estruturais aumentarão com uma taxa proporcional ao quadrado da corrente de

carga, mas não a uma taxa proporcional ao quadrado da ordem harmônica (como a perda por correntes parasitas nos enrolamentos). Alguns ensaios foram realizados em transformador para encontrar a variação da perda por correntes parasitas no núcleo, tanques, conexões e partes estruturais e, constataram que estas perdas aumentam com um fator exponencial da ordem harmônica igual a 0.8 [14][16].

Quando um transformador é submetido à carga contendo correntes harmônicas, esta perda adicional eleva a temperatura nas partes metálicas a níveis acima do normal. Partes isolantes em contato com pontos mais quentes que a temperatura nominal de operação, tem a vida útil reduzida. As partes metálicas sobre-aquecidas em transformadores imersos em óleo isolante podem produzir gases combustíveis, que poderiam conduzir a uma falha. Em geral transformadores do tipo seco de classe equivalente a transformadores imersos em óleo isolante apresentam perdas menores, devido à inexistência de tanque (intensidade do campo magnético nas partes metálicas é reduzida)[8].

2.3. PERDAS EM TRANSFORMADOR COM CARGAS NÃO-LINEARES

É importante quantificar as perdas sob condições de carga não-linear. Com isto, um cálculo pode ser feito de forma que os transformadores alimentem uma potência menor que a nominal, sem comprometer sua isolação e sua capacidade condutora.

2.3.1. Fator de Perda Harmônica

O termo Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) foi desenvolvido como um método para definir o somatório das correntes harmônicas ao quadrado multiplicado pela ordem harmônica também ao quadrado em relação à corrente total. Este fator pode ser usado como multiplicador das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos sob condição de carga linear de potência nominal na determinação da perda por correntes parasitas em enrolamentos para a condição de cargas não-lineares. Esse acréscimo de perda representa um aquecimento efetivo como consequência das correntes de cargas harmônicas. O Fator de Perda Harmônica é definido na equação (2.7) [6].

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (2.7)$$

Onde

I_h é o valor *rms* da corrente harmônica h ;

h é a ordem da harmônica;

h_{max} é a ordem máxima da harmônica de potência significativa.

Embora a elevação da temperatura devido à outra perda adicional (P_{OSL}) não seja geralmente considerada para transformadores do tipo seco, ela pode ter uma substancial consequência em transformadores imersos em líquido isolante [8]. Uma relação similar ao Fator de Perda Harmônica para perda por correntes parasitas nos enrolamentos também existe para essa outra perda adicional no transformador, denominado Fator de Perda Harmônica Fora dos Enrolamentos (F_{HL-STR}), usado para calcular a perda fora dos enrolamentos [6]. Este fator é definido por (2.8).

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (2.8)$$

As componentes harmônicas da corrente de carga podem ser normalizadas pelo valor *rms* da fundamental (I_{fund}). Assim sendo as equações (2.7) e (2.8) podem ser reescritas conforme (2.9) e (2.10) [8].

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_{fund}} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_{fund}} \right)^2} \quad (2.9)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_{fund}} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_{fund}} \right)^2} \quad (2.10)$$

2.3.2. Fator K

Outro método de cálculo, apresentado pelas normas UL-1561 e UL-1562, utiliza o *Fator K* como multiplicador das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos sob condição

de carga linear de potência nominal na determinação da perda por correntes parasitas em enrolamentos para a condição de cargas não-lineares. Este fator representa uma avaliação opcional aplicada ao transformador indicando sua conveniência na alimentação de cargas com correntes não-senoidais. O *Fator K* é definido conforme (2.11), onde as componentes da corrente são normalizadas pelo valor *rms* da corrente nominal (I_R) [6][17][18].

$$Fator K = \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (2.11)$$

Uma relação entre o *Fator K* e o Fator de Perda Harmônica é apresentada em (2.12) [6][8].

$$Fator K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (2.12)$$

A diferença entre o Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) e o *Fator K* é a corrente adotada como base. O F_{HL} é normalizado pela fundamental e o *Fator K* é normalizado pela corrente nominal [6][8][9].

2.4. DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)

Uma das formas mais utilizadas para a determinação dos níveis de distorção presentes nos sinais de tensões ou de correntes está no emprego da chamada “Distorção Harmônica Total”. As definições da Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v) e Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_i) [6][19] são mostradas em (2.13) e (2.14).

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}{V_1^2}} \quad (2.13)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}{I_1^2}} \quad (2.14)$$

Onde

h – ordem da harmônica;

V_h – tensão harmônica de ordem h ;

- h_{max} – ordem harmônica máxima;
- V_1 – tensão fundamental eficaz;
- I_h – corrente harmônica de ordem h;
- I_1 – corrente fundamental eficaz.

2.5. DEPRECIÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL (*DERATING*)

Transformadores são normalmente projetados e construídos para serem utilizados na frequência nominal no suprimento de cargas lineares. Transformadores alimentando cargas não-lineares estão sujeitos a perdas mais elevadas. Para evitar esse problema a capacidade do transformador que alimenta cargas não-lineares deve ser reduzida [14]. Isto implica o uso de uma potência menor que a nominal, quando estiver alimentando cargas não-lineares. Este processo de reduzir a potência nominal é conhecido por *derating* ou depreciação da potência nominal [6][8][9].

O dicionário de termos do IEEE [17] define *derating* como sendo a redução intencional do *stress* na aplicação de cargas, com o propósito de reduzir falhas relacionadas a ele. No caso de transformadores submetidos a cargas não-lineares *derating* é definido como a máxima potência aparente em *pu* que o transformador poderá fornecer sem comprometer sua isolação [7][9].

A expressão matemática que representa a potência nominal já depreciada ($S_{derated}$) é conforme (2.15) e representa um fator a ser multiplicado pela potência aparente nominal (S_R) para o cálculo da potencia aparente máxima (S_{max}) que o transformador deve alimentar [19]. A potência máxima é determinada de forma que o valor da perda total no transformador alimentando cargas não-lineares seja a mesma que ele teria alimentando cargas lineares de potência nominal [12].

$$S_{derated} = \frac{S_{max}}{S_R} \quad (2.15)$$

A perda nos enrolamentos para condição de carga linear de potência nominal (P_{W-R}) é representada em (2.16), considerando-se que a perda no núcleo para a condição de carga linear nominal (P_{NL-R}) é igual à perda no núcleo para uma situação de carga qualquer [12].

$$P_{W-R}(pu) = I_{max(pu)}^2 [1 + P_{EC-R}(pu) \cdot F_{HL}] \quad (2.16)$$

Onde $I_{max(pu)}$ é o valor em pu da corrente máxima não-senoidal.

A corrente máxima em pu ($I_{max(pu)}$) é obtida da equação (2.16), conforme (2.17).

$$I_{max(pu)} = \sqrt{\frac{P_{W-R}(pu)}{1 + P_{EC-R}(pu) \cdot F_{HL}}} \quad (2.17)$$

Para evitar o sobreaquecimento do transformador no suprimento de cargas não-lineares, recomenda-se que a corrente máxima calculada ($I_{max(pu)}$) não seja superior à corrente nominal. A potência máxima que o transformador deve alimentar em pu ($S_{derated}$) é igual à corrente máxima em pu , como mostrado em (2.18).

$$I_{max(pu)} = S_{derated}(pu) \quad (2.18)$$

A redução da potência aparente nominal ($RAPR$) é estabelecida tomando-se como base a potência aparente nominal (S_R) em relação à potência aparente máxima (S_{max}) quando o transformador supre cargas não-lineares. Esta definição é dada em (2.19) [7].

$$RAPR = \left(\frac{S_R - S_{max}}{S_R} \right) \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Quando transformadores alimentam cargas não-lineares, a potência ativa será necessariamente menor que a potência ativa para cargas lineares. A potência ativa máxima que o transformador deve suprir (P_{max}) para cargas não-lineares é dada por (2.20) e, a Capacidade de Potência Ativa (RPC), conforme (2.21) [7].

$$P_{max} = S_{max} FP \quad (2.20)$$

$$RPC = \frac{P_{max}}{S_R} \quad (2.21)$$

Onde FP é o fator de potência.

2.6. PONTOS DE MAIOR AQUECIMENTO

As correntes harmônicas de cargas aumentam as perdas no transformador e este aumento fará com que a temperatura de operação do transformador também aumente em relação ao seu valor de corrente senoidal com carga linear. Em geral, este acréscimo na temperatura de operação do transformador tem o mesmo efeito como se tivesse aumentado seu carregamento [8].

O fluxo de dispersão apresenta uma maior concentração na interface entre os dois enrolamentos e diminui quando se afasta desta fronteira. Isto concentra os campos eletromagnéticos em uma região onde a perda por correntes parasitas nos enrolamentos é maior, chamada de pontos de maior aquecimento [6].

Existem muitas dificuldades para se determinar o local e a temperatura dos pontos de maior aquecimento. É devido a este motivo que os métodos do *Fator K* e do Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) não consideram modificações nos pontos de maior aquecimento devido à ocorrência de correntes harmônicas. Contudo, nesses pontos o isolamento do transformador pode ser comprometido devido ao aumento da temperatura, logo, em um projeto específico de transformador que alimentará cargas não-lineares é importante que esses locais de maior aquecimento sejam levados em conta [9].

3. MODELAGEM

Para modelagem matemática utilizada neste trabalho, optou-se pela utilização de dois transformadores trifásicos conectados *back-to-back* de acordo com a Figura D3 no Anexo D. A escolha em se trabalhar na configuração *back-to-back*, é que, as medições podem ser realizadas pelos lados de baixa tensão, eliminando-se o uso de TP's e TC's em outras configurações.

3.1. SISTEMA IMPLEMENTADO

Nos experimentos que serão realizados em laboratório com a finalidade de determinar as perdas adicionais em transformadores serão utilizados dois transformadores trifásicos do tipo seco com conexão *Y-Y* em série e na configuração *back-to-back* suprindo cargas lineares e não-lineares balanceadas, conforme a Figura 3.

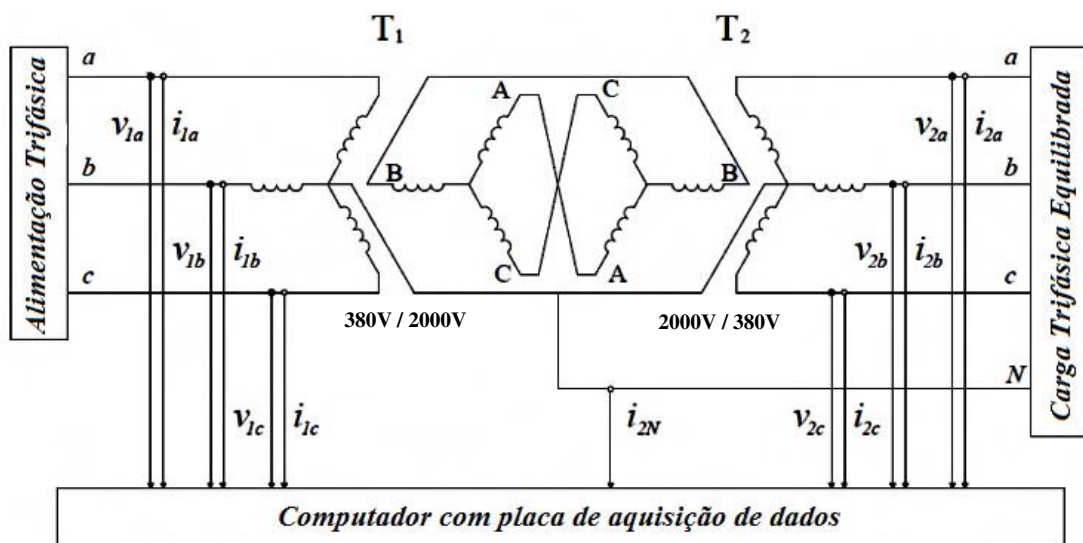


Figura 3 - Configuração *back-to-back* de dois transformadores trifásicos *Y-Y*, com medições sendo realizadas pelos lados de tensão inferior.

Onde

$i_{1i}(t)$ é a corrente na fase i no transformador $T1$ ($i=a,b,c$);

$i_{2i}(t)$ é a corrente na fase i no transformador $T2$;

$v_{1i}(t)$ é a tensão na fase i no transformador $T1$;

$v_{2i}(t)$ é a tensão na fase i no transformador $T2$;

A Figura 4 mostra o diagrama funcional do sistema implementado para a aquisição e tratamento de dados. Nesta figura tem-se a energia entregue pela concessionária (1), uma chave geral para proteção (2), um variador de tensão (3), dois transformadores na configuração *back-to-back* (4), o sistema de aquisição de dados (5) e a carga conectada ao transformador (6).

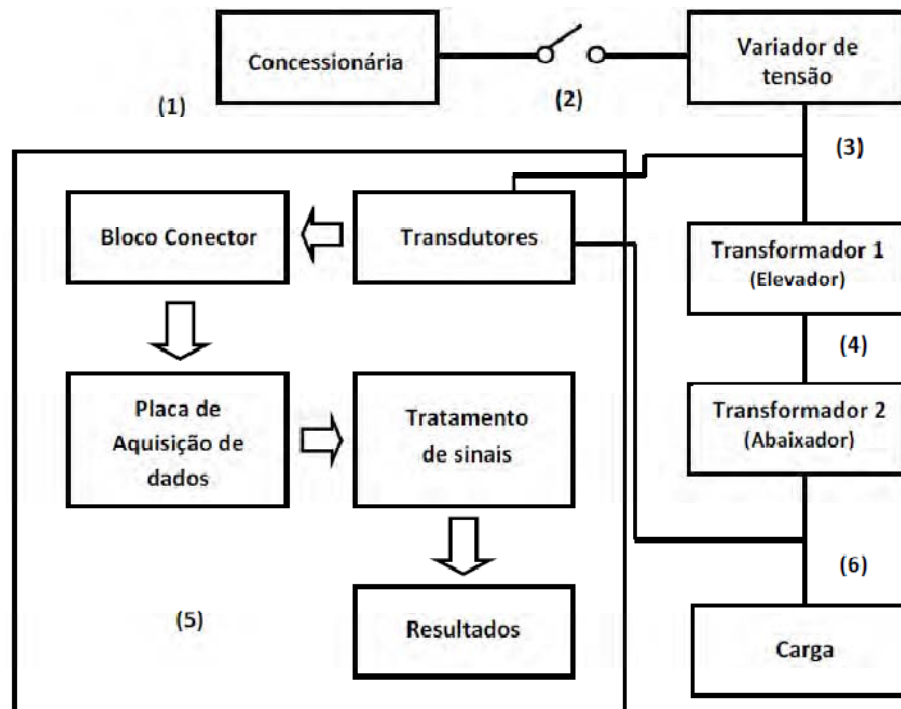


Figura 4 - Sistema de aquisição e tratamento de dados

O instrumento virtual (*software* LabVIEW) implementado apresenta as formas de onda das tensões e das correntes adquiridas no domínio do tempo, bem como seus espectros harmônicos e valores *rms*. Os transdutores utilizados são de malha fechada do tipo C, que compensam a própria corrente de magnetização, 500V/10V para os transdutores de tensões e 50A/5V para os transdutores de correntes. Os transdutores de tensão possuem uma largura de faixa de 0 a 300 kHz com precisão de $\pm 0,2\%$ e os de corrente possuem uma largura de faixa de 0 a 500 kHz com precisão de $\pm 0,1\%$ [20]. O software através destes dados adquiridos e do modelo *T* de circuito equivalente monofásico de transformador determina todas as perdas e as potências máximas que os transformadores devem suprir. As medições são realizadas pelos lados de tensões inferiores.

3.2. MODELOS TEMPORAIS ADOTADOS

As perdas calculadas neste trabalho são obtidas através do processamento de dados de tensões e de correntes adquiridas no domínio do tempo. O equacionamento utilizado é baseado nas equações dos modelos L e T de circuito equivalente monofásico de transformador.

Neste equacionamento, adota-se inicialmente o modelo L para determinar as resistências e indutâncias de dispersão equivalentes por fase, bem como as perdas em vazio dos transformadores. A Figura 5 apresenta o modelo L dos dois transformadores conectados na configuração *back-to-back* com seus respectivos parâmetros, tensões e correntes, ambos referidos para o lado de tensão inferior [8][9].

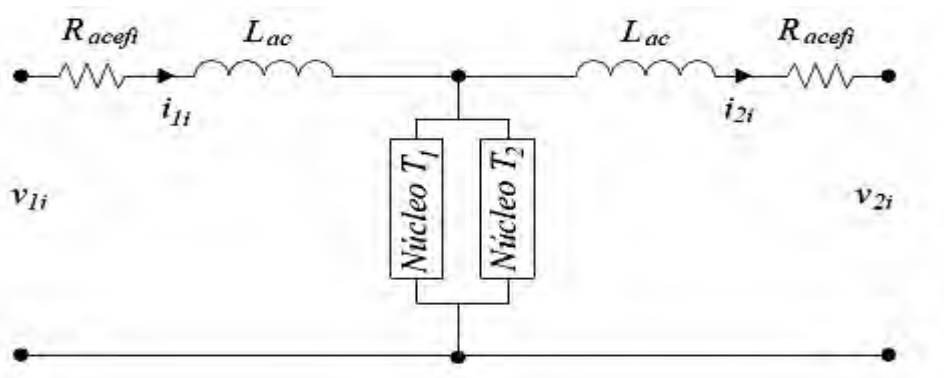


Figura 5 - Modelo L por fase de dois transformadores conectados na configuração *back-to-back*

A Figura 6 representa o modelo T para os dois transformadores conectados *back-to-back* que será a referência para todos os modelos adotados no dimensionamento de transformador trifásico [9].

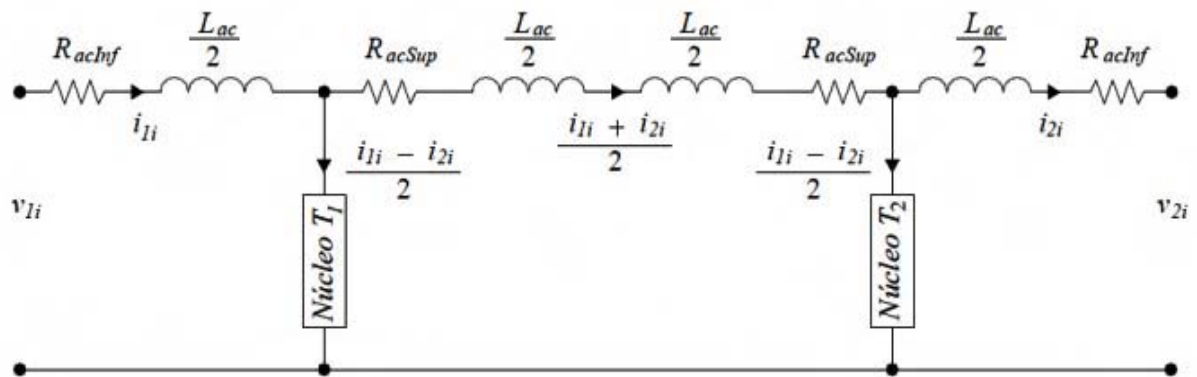


Figura 6 - Modelo T por fase de dois transformadores conectados na configuração *back-to-back*.

3.3. OBTENÇÃO DE PARÂMETROS

Quando se objetiva realizar o dimensionamento de um transformador que será submetido a cargas não-lineares diversos tipos de perdas devem ser consideradas. Os cálculos destas perdas dependem do espectro harmônico da corrente de carga e das perdas sob condição de carga linear [6]. As perdas em vazio, as perdas em carga (excitação senoidal) e os parâmetros referentes aos modelos L e T dos transformadores são obtidos dos ensaios de rotina em vazio, em curto-circuito e resistência dos enrolamentos em corrente contínua (dc).

Para o cálculo das perdas através dos métodos do *Fator K* e do F_{HL} são necessários que sejam conhecidos os espectros harmônicos das correntes de cargas, a corrente nominal (I_R), a perda fora dos enrolamentos para condição de carga linear nominal (P_{NL-R}) e a perda por correntes parasitas nos enrolamentos na frequência fundamental (P_{EC-O}). Para a obtenção destas perdas, devem ser obtidas primeiramente as resistências equivalentes em dc (R_{dc}) e em ac (R_{ac}) dos enrolamentos.

O valor médio da resistência dc para conexão Y (R_{dcy}) é dado conforme (3.1).

$$R_{dcy} = \frac{1}{2} \cdot \sum \frac{(R_{dc-ab} + R_{dc-bc} + R_{dc-ca})}{3} \quad (3.1)$$

Onde

R_{dc-ab} é a resistência dc entre os terminais a e b do transformador do lado Y ;

R_{dc-bc} é a resistência dc entre os terminais b e c do transformador do lado Y ;

R_{dc-ca} é a resistência dc entre os terminais c e a do transformador do lado Y .

Para o modelo L o valor da resistência em dc equivalente referida à tensão inferior (conexão Y) será determinado pela soma de R_{dcinf} mais o valor de R_{dcsup} [9], conforme (3.2).

$$R_{dc} = R_{dc\ Inf} + R_{dc\ Sup} \quad (3.2)$$

Onde

R_{dcinf} é a resistência dc do lado de tensão inferior;

R_{dcsup} é a resistência dc do lado de tensão superior referido ao lado de tensão inferior, conforme (3.3).

$$R_{dc\ Sup} = R'_{dc\ Sup} \left(\frac{V_{Inf}}{V_{Sup}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Onde

V_{Inf} é a tensão nominal de linha do lado de tensão inferior do transformador;

V_{Sup} é a tensão nominal de linha do lado de tensão superior do transformador;

R'_{dcSup} é a resistência dos enrolamentos em dc do lado de tensão superior do transformador.

Através do ensaio em curto-circuito pode-se obter a resistência e a indutância em ac para o modelo L (R_{ac} , L_{ac}). Neste ensaio são utilizados valores *rms* médios das tensões e das correntes. A corrente média (I_{cc}) e a tensão média (V_{cc}) são expressas conforme (3.4) e (3.5) [9].

$$I_{cc} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_{cc-i} \quad (3.4)$$

$$V_{cc} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 V_{cc-i} \quad (3.5)$$

Onde

I_{cc-i} é a corrente *rms* da fase i durante o ensaio em curto-circuito;

V_{cc-i} é a tensão *rms* da fase i durante o ensaio em curto-circuito.

A potência ativa do ensaio em curto-circuito é obtida conforme (3.6) [9].

$$P_{cc} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^3 \int_0^T V_{cc-i}(t) \cdot I_{cc-i}(t) \cdot dt \quad (3.6)$$

Onde

$i_{cc-i}(t)$ é a corrente da fase i durante o ensaio em curto-circuito no domínio do tempo;

$v_{cc-i}(t)$ é a tensão da fase i durante o ensaio em curto-circuito no domínio do tempo.

A resistência equivalente para o modelo L (R_{ac}) bem como a indutância de dispersão (L_{ac}) com corrente alternada senoidal são dadas de acordo com (3.7) e (3.8).

$$R_{ac} = \frac{1}{3} \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (3.7)$$

$$L_{ac} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - R_{ac}^2}}{2\pi f} \quad (3.8)$$

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos é dada por (3.9).

$$R_{EC} = R_{ac} - R_{dc} \quad (3.9)$$

Onde R_{ac} é a resistência equivalente do modelo L por fase com corrente de carga senoidal. Na frequência de 60 Hz.

As resistências dos enrolamentos para excitação senoidal dos lados de tensão inferior (R_{acinf}) e de tensão superior (R_{acsup}) são calculadas utilizando-se o modelo T equivalente por fase, conforme (3.10) e (3.11) [8][9].

$$R_{ac\ Inf} = R_{dc\ Inf} + \frac{R_{EC}}{2} \quad (3.10)$$

$$R_{ac\ Sup} = R_{dc\ Sup} + \frac{R_{EC}}{2} \quad (3.11)$$

Para condições de carga linear de potência nominal, a perda por correntes parasitas (P_{EC-R}) é dada por (3.12). Para cargas lineares de potência diferente da nominal a perda por correntes parasitas nos enrolamentos é obtida na frequência fundamental sendo dada por (3.13).

$$P_{EC-R} = q \cdot R_{EC} \cdot I_R^2 \quad (3.12)$$

$$P_{EC-O} = q \cdot R_{EC} \cdot I_{fund}^2 \quad (3.13)$$

Onde

q é o numero de fases;

I_R é a corrente nominal, calculada utilizando-se os dados de placa;

I_{fund} é a corrente na frequência fundamental.

Com o uso de cargas não-lineares a circulação de correntes parasitas nos enrolamentos do transformador aumenta, o que acarreta uma maior resistência em ac , chamada resistência efetiva dos enrolamentos por fase (R_{acefi}), para os modelos utilizados. Durante os ensaios com cargas, esta resistência é obtida de acordo com (3.15) e reescrita em forma de potência conforme (3.16) [8][9].

$$v_{1i} - v_{2i} = R_{acefi} \cdot i_{1i} + L_{ac} \cdot \frac{di_{1i}}{dt} + R_{acefi} \cdot i_{2i} + L_{ac} \frac{di_{2i}}{dt} \quad (3.15)$$

$$R_{acefi} = \frac{\int_0^T (v_{1i} - v_{2i})(i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt - L_{ac} \cdot \int_0^T \frac{d(i_{1i} + i_{2i})}{dt} \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt}{\int_0^T (i_{1i} + i_{2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt} \quad (3.16)$$

A resistência efetiva por correntes parasitas (R_{ECefi}) pode ser obtida utilizando-se esta resistência, assim a equação (3.9) pode ser reescrita conforme (3.17).

$$R_{ECefi} = R_{acefi} - R_{dc} \quad (3.17)$$

Sendo as cargas utilizadas neste trabalho balanceadas à resistência utilizada por fase é a média das resistências das três fases, conforme apresentado em (3.18).

$$R_{ECef} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 R_{acefi} - R_{dc} \quad (3.18)$$

Sob cargas não-lineares, as resistências dos enrolamentos dos lados de tensão superior ($R_{acef Sup}$) e de tensão inferior ($R_{acef Inf}$) são conforme (3.19) e (3.20) [9].

$$R_{acef Sup} = R_{dc Sup} + \frac{R_{ECef}}{2} \quad (3.19)$$

$$R_{acef\ Inf} = R_{dc\ Inf} + \frac{R_{ECef}}{2} \quad (3.20)$$

3.4. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS PERDAS

O cálculo dos Fatores de Perda Harmônica (F_{HL} e F_{HL-STR}) e *Fator K*, apresentados nas equações (2.7), (2.8) e (2.12) respectivamente, foram realizados utilizando-se correntes de ordem harmônica máxima (h_{max}) igual a 25 [21].

O cálculo das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos sob frequência fundamental (P_{EC-01} e P_{EC-02}) em cada transformador foi feito de acordo com (3.21) e (3.22).

$$P_{EC-01} = 3 \cdot R_{EC} \cdot I_{1fund}^2 \quad (3.21)$$

$$P_{EC-02} = 3 \cdot R_{EC} \cdot I_{2fund}^2 \quad (3.22)$$

Onde

P_{EC-01} é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador *T1* na frequência fundamental;

P_{EC-02} é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador *T2* na frequência fundamental;

I_{1fund} é o valor *rms* da harmônica fundamental da corrente no enrolamento da tensão inferior do transformador *T1*;

I_{2fund} é o valor *rms* da harmônica fundamental da corrente no enrolamento da tensão inferior do transformador *T2*.

Com os cálculos dos Fatores de Perda Harmônica para as correntes nos enrolamentos do lado de tensão inferior dos transformadores, um para o transformador *T1* (F_{HL1}) e outro para o transformador *T2* (F_{HL2}) e da perda por correntes parasitas nos enrolamentos para frequência fundamental, determinam-se as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos, conforme (3.23) e (3.24).

$$P_{EC1-FHL} = F_{HL1} \cdot P_{EC-01} \quad (3.23)$$

$$P_{EC2-FHL} = F_{HL2} \cdot P_{EC-02} \quad (3.24)$$

Onde

$P_{EC1-FHL}$ é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T1$ calculada pelo F_{HL} ;

$P_{EC2-FHL}$ é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$ calculada pelo F_{HL} .

Através do cálculo do *Fator K* para cada um dos transformadores, as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos são determinadas por (3.25) e (3.26).

$$P_{EC1-K} = \text{Fator } K_1 \cdot P_{EC-O1} \quad (3.25)$$

$$P_{EC2-K} = \text{Fator } K_2 \cdot P_{EC-O2} \quad (3.26)$$

Onde

Fator K₁ é o *Fator K* calculado para o transformador $T1$;

Fator K₂ é o *Fator K* calculado para o transformador $T2$;

P_{EC1-K} é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T1$ calculada através do *Fator K₁*;

P_{EC2-K} é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$ calculada através do *Fator K₂*.

A perda devido à resistência em dc nos enrolamentos do transformador $T1$ (P_{dc1}) é dada pela equação (3.27).

$$P_{dc1} = 3 \cdot R_{dc} \cdot I_1^2 \quad (3.27)$$

Onde I_1 é o valor *rms* da corrente do lado de tensão inferior do transformador $T1$.

Para o transformador $T2$, conectado à carga, a perda devido à resistência em dc nos enrolamentos (P_{dc2}) é dada por (3.28).

$$P_{dc2} = 3 \cdot R_{dc} \cdot I_2^2 \quad (3.28)$$

Onde I_2 é o valor *rms* da corrente do lado de tensão inferior do transformador $T2$.

A norma IEEE.C57.110-2008 [6] define a perda fora dos enrolamentos como sendo a soma das outras perdas que não estão nos enrolamentos. Neste trabalho são utilizados modelos de circuitos elétricos equivalentes, considerando-se que as perdas fora dos enrolamentos estão concentradas no núcleo (P_{NL}).

Para as condições senoidais de correntes de carga, a perda fora dos enrolamentos é representada por P_{NL-R} . Esta perda é igual à perda no núcleo obtida do ensaio em vazio (P_{NL}), que é calculada conforme (3.29).

$$P_{NL} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{T} \int_0^T v_{oi}(t) \cdot i_{oi}(t) \cdot dt \quad (3.29)$$

Onde

$v_{oi}(t)$ é a tensão no ramo de magnetização na fase i do transformador;

$i_{oi}(t)$ é a corrente de excitação na fase i do transformador.

Para o modelo L , a tensão no ramo de magnetização é igual à tensão aplicada durante o ensaio em vazio ($v_s(t)$), conforme (3.30).

$$v_o(t) = v_s(t) \quad (3.30)$$

Para o modelo T , a tensão no ramo de magnetização ($v_o(t)$) é dada por (3.31).

$$v_o(t) = v_s(t) - R_{ac\ Inf} \cdot i_o(t) - \frac{1}{2} L_{ac} \cdot \frac{di_o(t)}{dt} \quad (3.31)$$

A soma das outras perdas (P_{NL}) pode ser calculada também pelo método apresentado pela norma IEEE.C57.110-2008 [6], através das expressões (3.32) para o transformador $T1$ e (3.33) para o transformador $T2$.

$$P_{NL1-FHL} = F_{HL-STR1} \cdot P_{NL-R} \quad (3.32)$$

$$P_{NL2-FHL} = F_{HL-STR2} \cdot P_{NL-R} \quad (3.33)$$

Onde

$P_{NL1-FHL}$ é a perda fora dos enrolamentos no transformador $T1$ calculada através do Fator de Perda Harmônica para outras perdas;

$P_{NL2-FHL}$ é a perda fora dos enrolamentos no transformador $T2$ calculada através do Fator de Perda Harmônica para outras perdas.

$F_{HL-STR1}$ é o Fator de Perda Harmônica para outras perdas, calculado através da corrente que circula pelo lado de tensão inferior do transformador $T1$;

$F_{HL-STR2}$ é o Fator de Perda Harmônica para outras perdas, calculado através da corrente que circula pelo lado de tensão inferior do transformador $T2$.

Portanto, os cálculos das perdas totais ($P_{Total1-k}$ e $P_{Total1-FHL}$) obtidas pelos métodos do Fator K e F_{HL} são fornecidos por (3.34) e (3.35) para o transformador $T1$.

$$P_{Total1-K} = P_{dc1} + P_{EC1-K} + P_{NL-R} \quad (3.34)$$

$$P_{Total1-FHL} = P_{dc1} + P_{EC1-FHL} + P_{NL1-FHL} \quad (3.35)$$

De forma análoga, as equações (3.36) e (3.37) descrevem os cálculos das perdas totais ($P_{Total2-k}$ e $P_{Total2-FHL}$) para o transformador $T2$.

$$P_{Total2-K} = P_{dc2} + P_{EC2-K} + P_{NL-R} \quad (3.36)$$

$$P_{Total2-FHL} = P_{dc2} + P_{EC2-FHL} + P_{NL2-FHL} \quad (3.37)$$

3.5. MEDIÇÕES INDIRETAS DAS PERDAS (MODELO T)

Através das equações do circuito equivalente monofásico do modelo T de transformador todas as perdas são medidas de forma indireta, utilizando-se das correntes e das tensões adquiridas bem como os parâmetros do modelo.

A perda nos enrolamentos do transformador $T1$ (P_{W1}) é obtida através de (3.38) [8].

$$P_{W1} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{T} \int_0^T \left[R_{acef\ Inf} \cdot i_{1i}^2 + \frac{1}{4} (v_{o1i} - v_{o2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \right] \cdot dt \quad (3.38)$$

A perda nos enrolamentos do transformador $T2$ (P_{W2}) é obtida através de (3.39).

$$P_{W2} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{T} \int_0^T \left[R_{acef\ Inf} \cdot i_{2i}^2 + \frac{1}{4} (v_{o1i} - v_{o2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \right] \cdot dt \quad (3.39)$$

Para o cálculo da perda por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}), considere-se que a resistência por correntes parasitas nos enrolamentos por fase (R_{ECefi}) seja dividida em partes iguais para as tensões inferior ($R_{ECef\ Infi}$) e superior ($R_{ECef\ Supi}$) de acordo com (3.40) [8].

$$R_{ECef\ Supi} = R_{ECef\ Infi} = \frac{R_{ECefi}}{2} \quad (3.40)$$

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos para o transformador $T1$ (P_{EC1}) é dada por (3.41) [8].

$$P_{EC1} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{T} \int_0^T \left[R_{ECef\ Infi} \cdot i_{1i}^2 + R_{ECef\ Supi} \cdot \left(\frac{i_{1i} + i_{2i}}{2} \right)^2 \right] \cdot dt \quad (3.41)$$

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos para o transformador $T2$ é dada por (3.42).

$$P_{EC2} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{T} \int_0^T \left[R_{ECef\ Infi} \cdot i_{2i}^2 + R_{ECef\ Supi} \cdot \left(\frac{i_{1i} + i_{2i}}{2} \right)^2 \right] \cdot dt \quad (3.42)$$

A perda fora dos enrolamentos, neste trabalho, é considerada igual à perda no núcleo. O cálculo da perda fora dos enrolamentos para o transformador $T1$ e para o transformador $T2$ é conforme (3.43) e (3.44) respectivamente [8].

$$P_{NL1} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2T} \int_0^T v_{o1i} \cdot (i_{1i} - i_{2i}) \cdot dt \quad (3.43)$$

$$P_{NL2} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2T} \int_0^T v_{o2i} \cdot (i_{1i} - i_{2i}) \cdot dt \quad (3.44)$$

Onde as tensões de excitação (v_{o1} e v_{o2}) podem ser determinadas conforme (3.45) e (3.46).

$$v_{o1i} = v_{1i} - R_{acef\ Infi} \cdot i_{1i} - \frac{1}{2} L_{ac} \cdot \frac{di_{1i}}{dt} \quad (3.45)$$

$$v_{o2i} = v_{2i} - R_{acef\ Infi} \cdot i_{2i} - \frac{1}{2} L_{ac} \cdot \frac{di_{2i}}{dt} \quad (3.46)$$

3.6. CORRENTE E POTÊNCIA MÁXIMAS

Os transformadores de distribuição são carregados pela combinação de cargas lineares ($\approx 30\%$) e não-lineares ($\approx 70\%$) [2] que provocam um aumento de sua perda total, acarretando numa elevação da temperatura de operação acima da nominal. Esta condição exige providências no sentido de aliviar o carregamento máximo admissível pelo transformador, para que não haja comprometimento das características nominais projetadas, ou seja, corrente acima da nominal e elevação da temperatura com conseqüente diminuição de sua vida útil [22]. Uma forma de evitar tais danos é a utilização de apenas parte da capacidade nominal do transformador. Desta forma, a corrente máxima que o transformador deve alimentar sob qualquer condição é tal que sua perda total seja a mesma que ele teria alimentando carga linear de potência nominal. Este princípio de conservação de energia é apresentado em (3.47) e (3.48) [6][8][9][12].

$$P_{NL-R} + P_{W-R} = 3 \cdot R_{acef} \cdot I_{1max}^2 + P_{NL1} \quad (3.47)$$

$$P_{NL-R} + P_{W-R} = 3 \cdot R_{acef} \cdot I_{2max}^2 + P_{NL2} \quad (3.48)$$

Onde

P_{W-R} é a perda nos enrolamentos sob condição de carga linear nominal;

I_{1max} é a corrente máxima de carga do transformador $T1$;

I_{2max} é a corrente máxima de carga do transformador $T2$.

As expressões (3.49) e (3.50) são obtidas de (3.47) e (3.48). Estas fornecem o valor da corrente máxima que deve circular em cada transformador [6][8][12].

$$I_{1max} = \sqrt{\frac{P_{NL-R} + P_{W-R} - P_{NL1}}{3 \cdot R_{acef}}} \quad (3.49)$$

$$I_{2max} = \sqrt{\frac{P_{NL-R} + P_{W-R} - P_{NL2}}{3 \cdot R_{acef}}} \quad (3.50)$$

Os valores das correntes máximas em pu para os dois transformadores podem ser encontrados pela divisão destas correntes máximas pela corrente nominal (I_R), conforme (3.51) e (3.52) [8][9].

$$I_{1max(pu)} = \frac{I_{1max}}{I_R} \quad (3.51)$$

$$I_{2max(pu)} = \frac{I_{2max}}{I_R} \quad (3.52)$$

Multiplicando-se as correntes máximas em pu pelos valores das potências nominais dos transformadores obtêm-se as potências máximas que os transformadores devem suprir (as correntes máximas em pu são iguais às potências máximas também em pu). Estas definições são apresentadas por (3.53) e (3.54) [8][9].

$$S_{1max} = I_{1max(pu)} \cdot S_R \quad (3.53)$$

$$S_{2max} = I_{2max(pu)} \cdot S_R \quad (3.54)$$

3.7. RENDIMENTO

O rendimento em um transformador é definido como sendo a relação entre a potência de saída pela potência de entrada. Com o aumento das perdas, o rendimento diminui. Por isto, é uma importante variável na análise das perdas em transformadores. Neste trabalho, o rendimento é calculado através do modelo T adotado.

Para o transformador $T1$ as potências de entrada (P_{in1}) e de saída (P_{out1}) podem ser obtidas através das equações (3.55) e (3.56) [8].

$$P_{in1} = P_{in} \quad (3.55)$$

$$P_{out1} = P_{in1} - P_{NL1} - P_{W1} \quad (3.56)$$

Para o transformador $T2$ (conectado à carga) as potências de entrada (P_{in2}) e a de saída (P_{out2}) são obtidas através das equações (3.57) e (3.58).

$$P_{in2} = P_{out1} \quad (3.57)$$

$$P_{out2} = P_{out} \quad (3.58)$$

Os cálculos dos rendimentos de transformadores ($\eta_{1(pu)}$ e $\eta_{2(pu)}$) são realizados pelas potências de entrada e de saída de cada um dos transformadores, conforme equações (3.59) e (3.60) [10][11].

$$\eta_{1(pu)} = \frac{P_{out1}}{P_{in1}} \quad (3.59)$$

$$\eta_{2(pu)} = \frac{P_{out2}}{P_{in2}} \quad (3.60)$$

3.8. METODOLOGIAS DE CÁLCULOS UTILIZADAS

As perdas em transformadores são calculadas de diversas maneiras. Neste trabalho foram usados quatro métodos para estes cálculos: *Temporal*, *Linear*, *Fator K* e F_{HL} .

O método descrito na seção 3.5 é denominado método *Temporal*. Este método implementa o tratamento dos dados adquiridos de tensões e de correntes no domínio do tempo pelo uso das equações do modelo T de circuito equivalente monofásico do transformador. Portanto é tido como o mais preciso e é tomado como referência neste trabalho.

O método *Linear* ignora o efeito das frequências harmônicas para os cálculos das perdas, ou seja, a perda nos enrolamentos é calculada multiplicando-se o quadrado do valor *rms* da corrente pela resistência para frequência fundamental (R_{ac}), desprezando-se as variações na perda por correntes parasitas devido às frequências das correntes harmônicas.

O método *do Fator K* proposto pelas normas do UL [17][18], é um método que calcula a perda por correntes parasitas nos enrolamentos de acordo com o conteúdo harmônico da corrente de carga, como foi descrito na seção 2.3.3.

O método F_{HL} proposto pela recomendação do IEEE [6] considera além da variação na perda por correntes parasitas nos enrolamentos, também a variação na perda fora dos enrolamentos, de acordo com o conteúdo harmônico da corrente de carga, como foi descrito na seção 2.3.1.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para realização experimental da pesquisa, são utilizados dois transformadores trifásicos do tipo seco conectados na configuração *back-to-back*, conforme Figura 3. O procedimento é realizado em duas etapas. A primeira é referente aos ensaios para determinação de parâmetros: ensaio de resistência dos enrolamentos em *dc*, ensaio em curto-circuito e ensaio em vazio. Na segunda etapa, os transformadores conectados *back-to-back* suprem cargas lineares e não-lineares, equilibradas e com potências próximas à nominal do segundo transformador. A tensão de alimentação para todos os ensaios é fornecida pela concessionária local (CELG/GO), onde procurou-se manter a tensão de linha em 380 V, através de um variador de tensão, conforme Figura 4. Os tipos de carga utilizados e analisadas estão relacionados na Tabela 1. Os fatores de potência das cargas são calculados de acordo com a norma IEEE.519-1992 [23]

Tabela 1 – Cargas utilizadas

Cargas	Descrição	FP
C1	Carga linear resistiva	1,000
C2	Carga linear resistiva + Ponte retificadora monofásica, com filtro capacitivo de 430 μ F na saída	0,906
C3	Lâmpadas eletrônicas + Computadores + Ponte retificadora monofásica, com filtro capacitivo de 430 μ F na saída	0,854
C4	Carga linear resistiva + Lâmpadas eletrônicas + Computadores + Ponte retificadora monofásica, com filtro capacitivo de 430 μ F na saída	0,913
C5	Ponte retificadora monofásica, com filtro capacitivo de 430 μ F na saída	0,845
C6	Carga linear resistiva + Ponte retificadora trifásica, com filtro capacitivo de 1080 μ F na saída	0,956
C7	Lâmpadas eletrônicas + Computadores + Ponte retificadora trifásica, com filtro capacitivo de 1080 μ F na saída	0,938
C8	Carga linear resistiva + Lâmpadas eletrônicas + Computadores + Ponte retificadora trifásica, com filtro capacitivo de 1080 μ F na saída	0,962
C9	Ponte retificadora trifásica, com filtro capacitivo de 1080 μ F na saída	0,924

4.1. TRANSFORMADOR DO TIPO SECO

Os transformadores do tipo seco utilizados apresentam conexão $Y-Y$, série T números 32709 e 32710, sendo ambos do mesmo lote de fabricação. A potência nominal é de 5 kVA e a tensão superior e tensão inferior são respectivamente 2000 V e 380 V. A frequência de operação é de 60 Hz. A corrente nominal para carga linear é de 7,6 A para o lado de tensão inferior e 1,44 A para o lado de tensão superior.

4.1.1. Determinação dos parâmetros

Os parâmetros do transformador utilizados neste trabalho são referentes aos modelos L e T : resistência equivalente dos enrolamentos em ac (R_{ac}), indutância de dispersão (L_{ac}), resistência dos enrolamentos do lado de tensão inferior (R_{dcInf}), resistência dos enrolamentos do lado de tensão superior (R'_{dcSup}), resistência dos enrolamentos do lado de tensão superior referida ao lado de tensão inferior em dc (R_{dcSup}) e resistência equivalente dos enrolamentos em dc referida ao lado de tensão inferior (R_{dc}), bem como a perda em vazio (P_{NL-R}). O diagrama da Figura 7 ilustra o caminho para obtenção dos parâmetros do transformador.

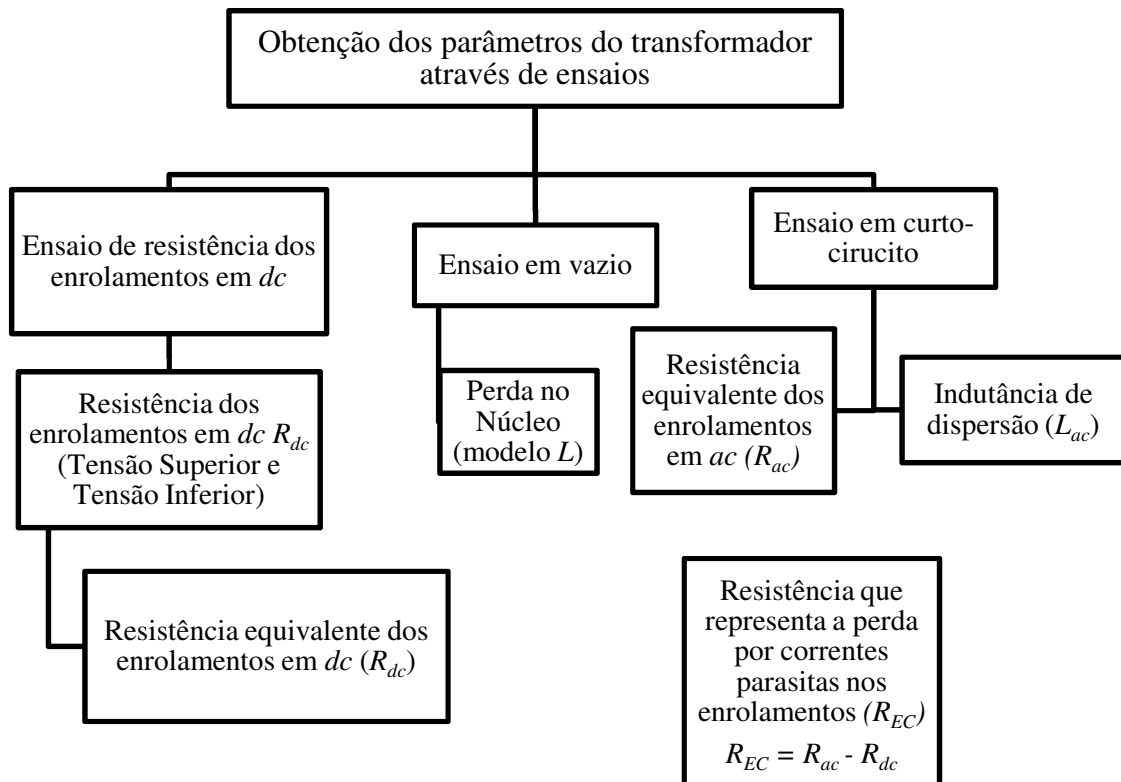


Figura 7 – Diagrama de obtenção dos parâmetros do transformador

Do ensaio de resistência dos enrolamentos em dc obtêm-se os valores das resistências em dc média dos lados de tensão superior ($R_{dc\ Sup}$) e de tensão inferior ($R_{dc\ Inf}$), bem como o valor referido da resistência em dc do lado da tensão superior para a inferior ($R'_{dc\ Sup}$). Também é calculado o valor da resistência em dc equivalente dos transformadores referidos ao lado de tensão inferior (R_{dc}), conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Dados obtidos do ensaio de resistência dos enrolamentos

Transformador	Resistências em dc (R_{dc}) (Ω)			
	$R_{dc\ Sup}$	$R'_{dc\ Sup}$	$R_{dc\ Inf}$	R_{dc}
T1	10,5	0,379	0,335	0,714
T2	10,5	0,379	0,335	0,714
Média	10,5	0,379	0,335	0,714

Através do ensaio em curto-circuito obtêm-se a perda média no cobre (P_{cc}) e os valores médios das resistências dos enrolamentos em ac (R_{ac}) entre os dois transformadores e também, a indutância de dispersão (L_{ac}) para o modelo L de transformador. A Tabela 3 apresenta os valores de resistências obtidos no ensaio em curto-circuito (R_{ac}) e no de resistência dos enrolamentos (R_{dc}), ambas referidas à tensão inferior. A diferença entre as resistências em ac e em dc é a resistência que representa a perda por correntes parasitas nos enrolamentos (R_{EC}).

Tabela 3 – Resistência nos transformadores

Resistências	Valor (Ω)
Corrente contínua (R_{dc})	0,714
Corrente alternada (R_{ac})	0,730
Corrente parasita (R_{EC})	0,016

A indutância de dispersão média obtida do ensaio em curto-circuito para estes transformadores é de 1,012 mH .

Para efeito de comparação foi realizado o ensaio em curto-circuito com os dois transformadores conectados na configuração *back-to-back*. Neste ensaio foi curto-circuitada a saída do segundo transformador e, foi aplicada uma tensão de tal forma que circulasse a corrente nominal nos enrolamentos do segundo transformador. Deste ensaio obteve-se o valor médio das resistências em ac (R_{ac}). A Tabela 4 mostra esta resistência bem como a resistência em dc (R_{dc}) e a resistência por correntes parasitas nos enrolamentos (R_{EC}) (obtida pela diferença das duas primeiras).

Tabela 4 – Resistências em dc , em ac e por correntes parasitas na configuração *back-to-back*.

Resistências	Valor (Ω)
Corrente contínua (R_{dc})	0,714
Corrente alternada (R_{ac})	0,779
Corrente parasita (R_{EC})	0,065

A indutância média de dispersão obtida com este ensaio em curto-circuito pela configuração *back-to-back* para estes transformadores é de 1,030 mH .

Através de testes realizados com as cargas, observou-se que os parâmetros encontrados com o ensaio em curto-circuito com os transformadores na configuração *back-to-back* foram mais realísticos e, por este motivo, foram utilizados. A perda no núcleo sob condição de carga linear (P_{NL}), obtida através do ensaio em vazio é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Perda obtida através do ensaio em vazio

Transformador	P_{NL-R} (W)
$T1$	48,20
$T2$	47,35

4.1.2. Transformadores em vazio

Nesta etapa, não há carga conectada à saída do transformador $T2$. Portanto, o transformador $T1$ alimenta apenas o transformador $T2$ em vazio. A corrente de saída em $T2$ é nula e, a corrente de entrada em $T1$ é aproximadamente igual à soma das correntes de magnetização dos dois transformadores. A Figura 8 mostra as correntes de entrada das três fases do transformador $T1$. As correntes de saída de $T2$ são nulas.

As correntes de magnetização são não-senoidais devido ao material ferromagnético do núcleo. As formas de onda das correntes de magnetização nas três fases não são iguais entre si, uma vez que a concatenação do fluxo magnético é diferente para as fases. Isto ocorre devido à disposição física não simétrica das colunas do núcleo do transformador [10].

Através da aquisição e tratamento dos dados das tensões e das correntes no domínio do tempo, o instrumento virtual implementado no LabVIEW calcula as perdas no núcleo para os transformadores $T1$ e $T2$, conforme seções 3.5 e 3.7.

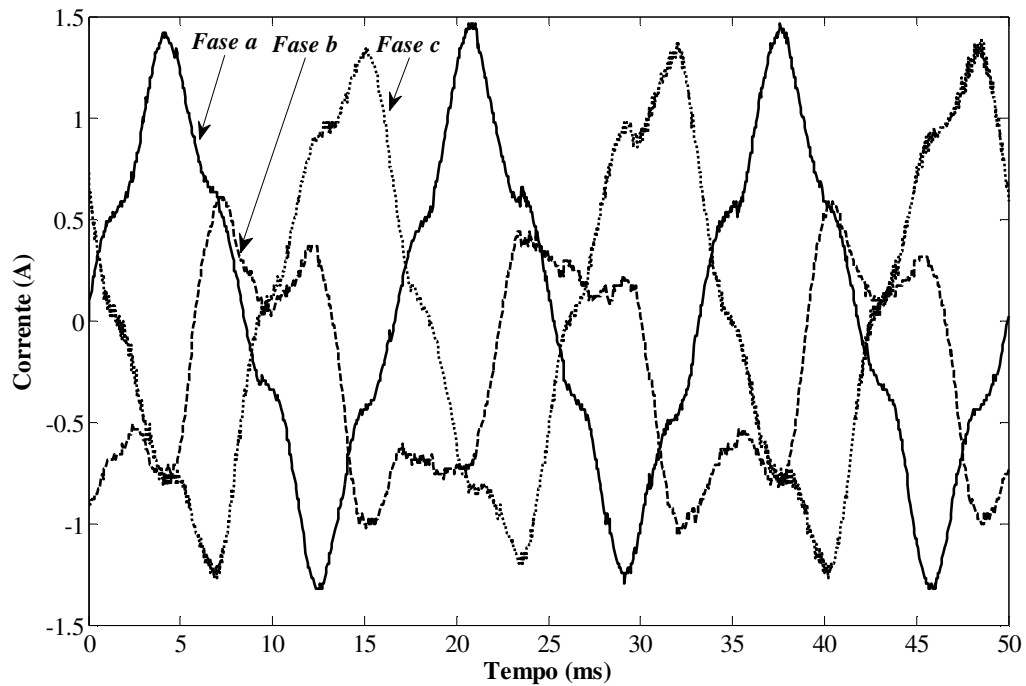


Figura 8 – Correntes nas três fases do transformador *T1* com *T2* em vazio.

A tensão de entrada é a nominal, e o teste se assemelha a um ensaio em vazio tradicional, com a diferença de estarem os dois transformadores conectados em série. Para o transformador *T2* em vazio, a perda total nos transformadores é a própria potência ativa de entrada. A Tabela 6 apresenta as perdas em vazio determinadas através de duas diferentes formas: a perda obtida pelo *Método Temporal* (P_{NL}) e a perda obtida pelo ensaio em vazio tradicional (P_{NL-R}). Nesta tabela também são mostradas as diferenças percentuais entre esses dois métodos.

Tabela 6 – Perdas em vazio para os transformadores *T1* e *T2*.

Transformador	P_{NL} (W)	P_{NL-R} (W)	Diferença (%)
	Temporal	Ensaio em vazio	
<i>T1</i>	47,80	48,20	0,83
<i>T2</i>	46,64	47,35	1,50
Total	94,44	95,55	1,16

As perdas em vazio obtidas pelos diferentes métodos de cálculos apresentam valores próximos, confirmando a validade destes métodos. A diferença se deve à perda nos enrolamentos para a configuração back-to-back que não é considerada para o modelo *L*.

4.1.3. Transformadores em carga

Nesta etapa do trabalho, os transformadores suprem cargas de diversos tipos. Em cada tipo de carga procurou-se obter a potência da carga de forma equilibrada e bem próxima da potência nominal (para o transformador $T2$). A tensão aplicada ao transformador $T1$ é praticamente senoidal e o valor eficaz da tensão de saída para a carga (transformador $T2$) é 380 V. As cargas analisadas apresentam distorções de correntes (THD_i) diferentes.

4.1.3.1. Carga linear, (C1).

Primeiramente utilizou-se carga puramente resistiva (C1), em que as tensões e correntes são praticamente senoidais. A Figura 9 mostra as formas de onda de tensão e de corrente na fase a dos transformadores $T1$ e $T2$.

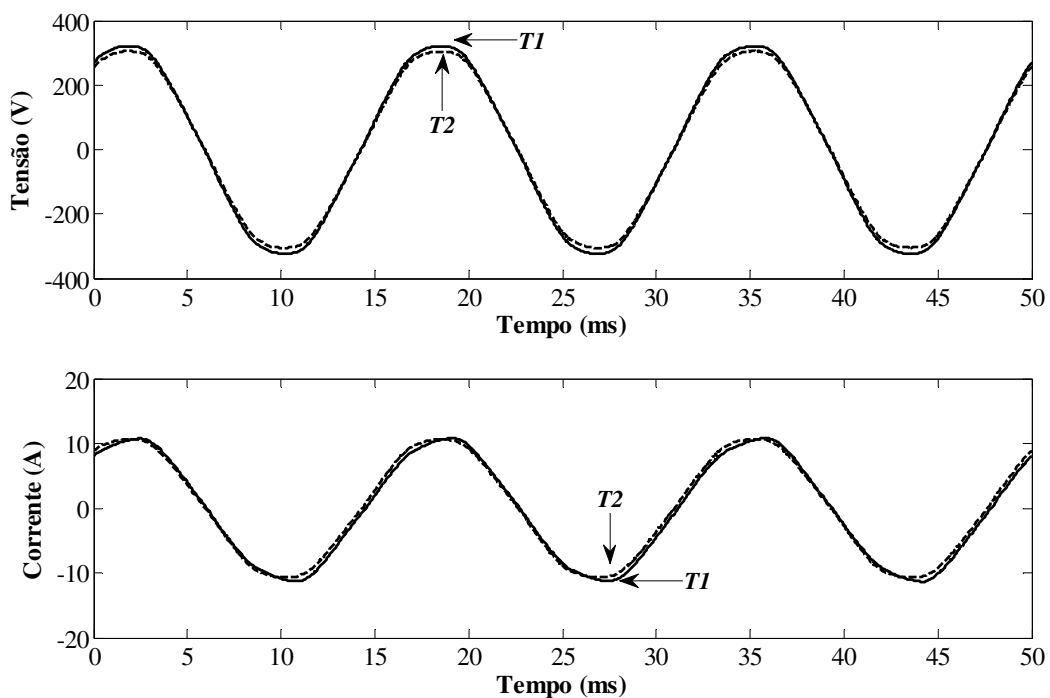


Figura 9 – Tensões e correntes na fase a dos transformadores $T1$ e $T2$ alimentando carga linear.

As formas de onda das tensões e das correntes de entrada e de saída são praticamente senoidais e idênticas, apresentando pequenas diferenças devido às impedâncias de dispersões dos transformadores.

4.1.3.2. Carga linear e retificador monofásico de $430 \mu F$ na saída, (C2).

A carga C2 é composta por um retificador monofásico com filtro capacitivo de $430 \mu F$ em conjunto com carga linear resistiva. O retificador monofásico representa aproximadamente 70% da capacidade do transformador e a carga linear resistiva os 30% restantes. A Figura 10 apresenta as formas de onda de tensão e de corrente, na fase *a*, nos transformadores T1 e T2, quando alimentam esta carga.

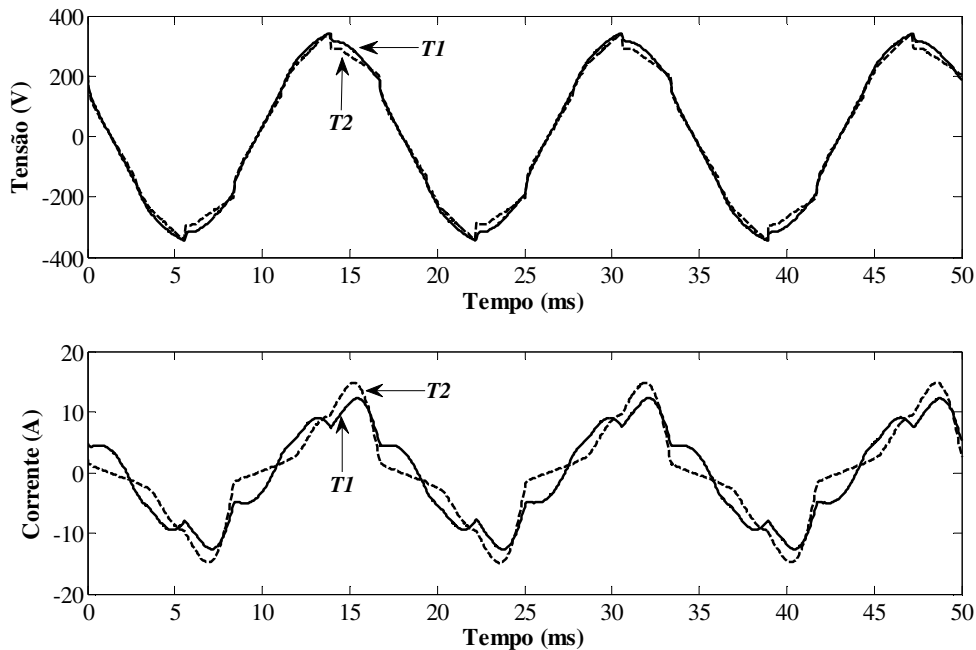


Figura 10 – Tensões e correntes na fase *a* dos transformadores T1 e T2 alimentando a carga C2.

A distorção na corrente de carga provoca distorção na forma de onda da tensão, principalmente no transformador conectado à carga (T2).

As correntes das três fases somam-se no neutro conforme esquema de ligação do retificador monofásico, a Figura C2 do Anexo C mostra a configuração desta carga. A forma de onda da corrente de neutro e os espectros harmônicos da corrente de carga são mostrados na Figura 11.

Nota-se a predominância de harmônicas ímpares, com destaque para a terceira harmônica. A THD_i desta carga é de 39,04%. A corrente de neutro possui uma frequência igual ao triplo da frequência de alimentação do sistema (60 Hz) e seu valor *rms* é de 7,77 A. Este valor não é superior a corrente de carga, pois como mostrado no Anexo C o condutor neutro da carga C2 se deve exclusivamente ao retificador monofásico.

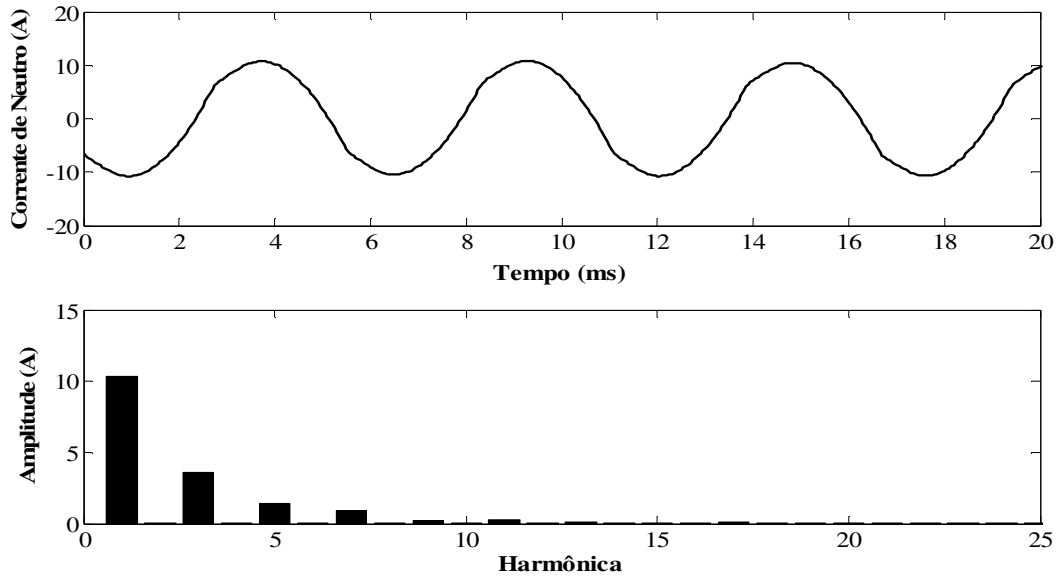


Figura 11 – Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da *fase a* do transformador *T2* alimentando a carga *C2*.

4.1.3.3. Lâmpadas eletrônicas, computadores e retificador monofásico com filtro de $430 \mu F$ na saída, (*C3*).

A carga *C3* representa a combinação entre um retificador monofásico, lâmpadas eletrônicas compactas e computadores (Figura *C3* do Anexo *C*), onde o retificador monofásico representa aproximadamente 70% do carregamento do transformador e as lâmpadas e os computadores os 30% restantes.

A Figura 12 apresenta as formas de onda de tensão e de corrente, na *fase a*, nos transformadores *T1* e *T2*.

A forma de onda da tensão encontra-se distorcida, principalmente no segundo transformador (*T2*), devido à grande distorção presente na corrente de carga. O impacto dessa carga no sistema é representado pelo seu THD_i que é de 45,88%.

A Figura 13 exhibe a forma de onda da corrente de neutro e os espectros harmônicos da corrente de carga (*C3*).

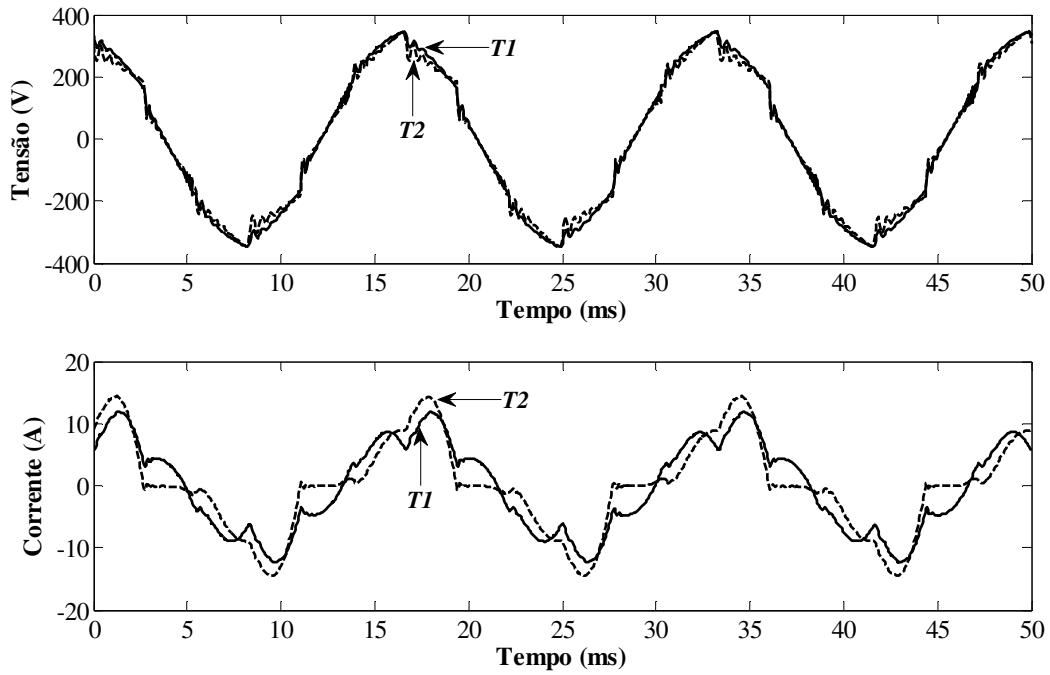


Figura 12 – Tensões e correntes na *fase a* dos transformadores *T1* e *T2* alimentando a carga *C3*.

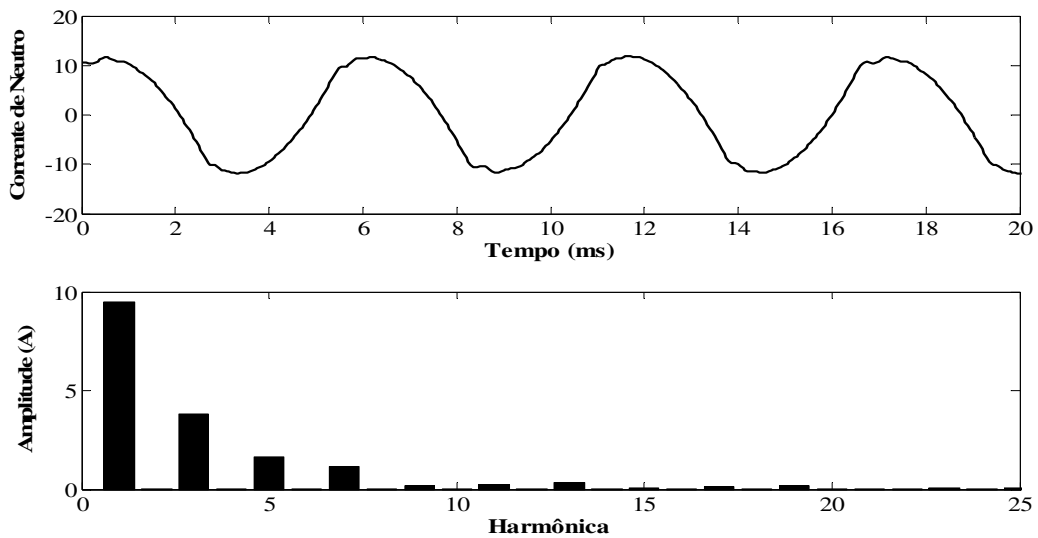


Figura 13 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da *fase a* do transformador *T2* alimentando a carga *C3*.

No ensaio com a carga *C3*, observou-se uma corrente de neutro de 8,51 A (*rms*). Este valor representa 109,69% da corrente de carga. Neste caso, também predomina os harmônicos de ordem ímpar, de forma semelhante àqueles encontrados na carga *C2*.

4.1.3.4. Carga linear, lâmpadas eletrônicas, computadores e retificador monofásico com filtro capacitivo de $430 \mu F$ na saída (C4).

A carga C4 é composta por retificador monofásico, lâmpadas eletrônicas compactas, computadores e carga linear resistiva (Figura C4 do Anexo C), sendo 40% do carregamento devido ao retificador monofásico, 30% são as lâmpadas mais computadores e os 30% restantes de carga linear.

A Figura 14 apresenta as formas de onda de tensão e de corrente (*fase a*) em ambos transformadores, no suprimento da carga C4.

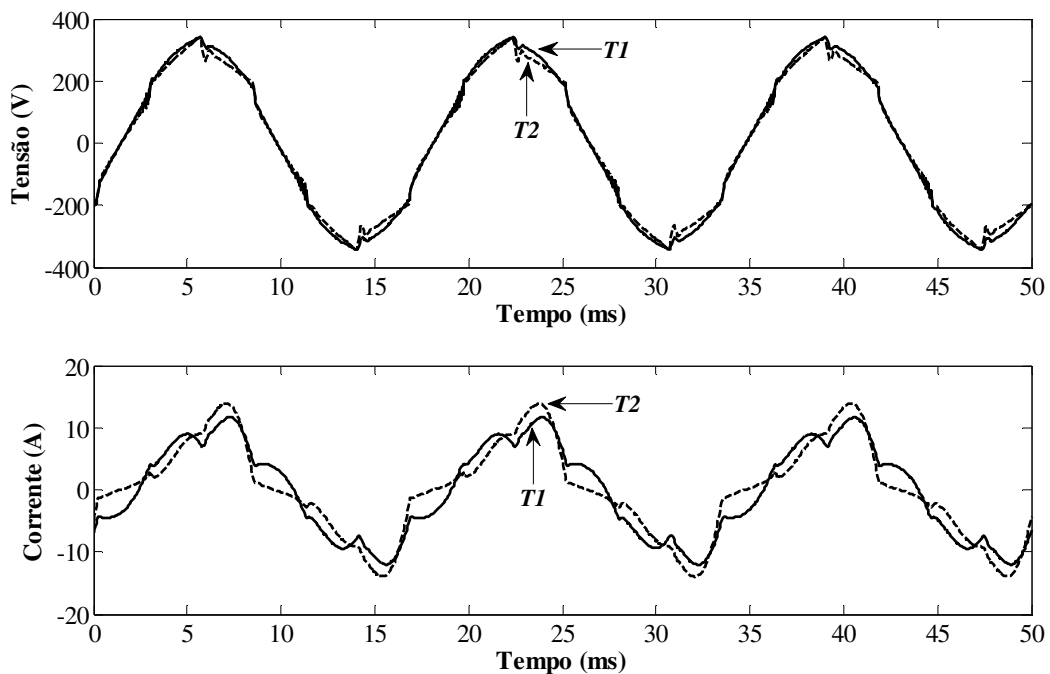


Figura 14 - Tensões e correntes na *fase a* dos transformadores *T1* e *T2* suprindo a carga C4.

A carga C4 possui o mesmo aspecto não-linear da carga C3, alterando apenas a porcentagem de utilização de cada carga individual. Observam-se distorções na forma de onda da tensão, geradas pelo conteúdo harmônico presente na corrente de carga, principalmente no segundo transformador (*T2*). A Figura 15 exhibe a forma de onda da corrente de neutro e os espectros harmônicos da corrente de carga.

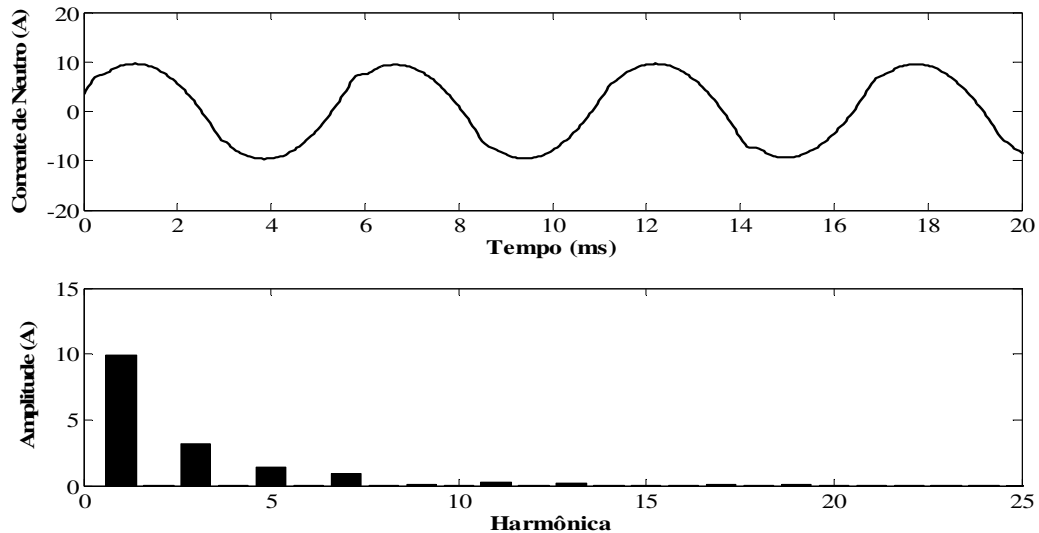


Figura 15 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da *fase a* do transformador *T2* alimentando a carga *C4*.

Para a carga *C4* observou-se uma corrente de neutro de 7,05 A (*rms*), o que equivale a 94% da corrente de carga. O espectro harmônico da corrente de carga mostra a predominância dos harmônicos ímpares.

4.1.3.5. Retificador monofásico com filtro capacitivo de 430 μF na saída (*C5*).

A carga *C5* consiste de um retificador monofásico com filtro capacitivo de 430 μF e potência próxima à nominal do transformador. A Figura 16 mostra as formas de onda da tensão e da corrente na *fase a* dos transformadores *T1* e *T2*. Pelas formas de onda das tensões nota-se que os pulsos de corrente provocados pela presença de capacitores na saída do retificador, além de gerarem perdas adicionais nos transformadores, deformam as formas de onda dessas tensões e acarretam diminuições nos seus valores *rms*. Isto ocorre devido às saturações dos núcleos dos transformadores (curva *B-H*)[8][9].

A Figura 17 exibe a forma de onda da corrente de neutro e os espectros harmônicos da corrente de carga (carga *C5*). Esta corrente apresenta valor *rms* igual a 8,75 A (122% da corrente de fase) e frequência três vezes maior que a corrente fundamental das fases (Carga composta por retificadores monofásicos).

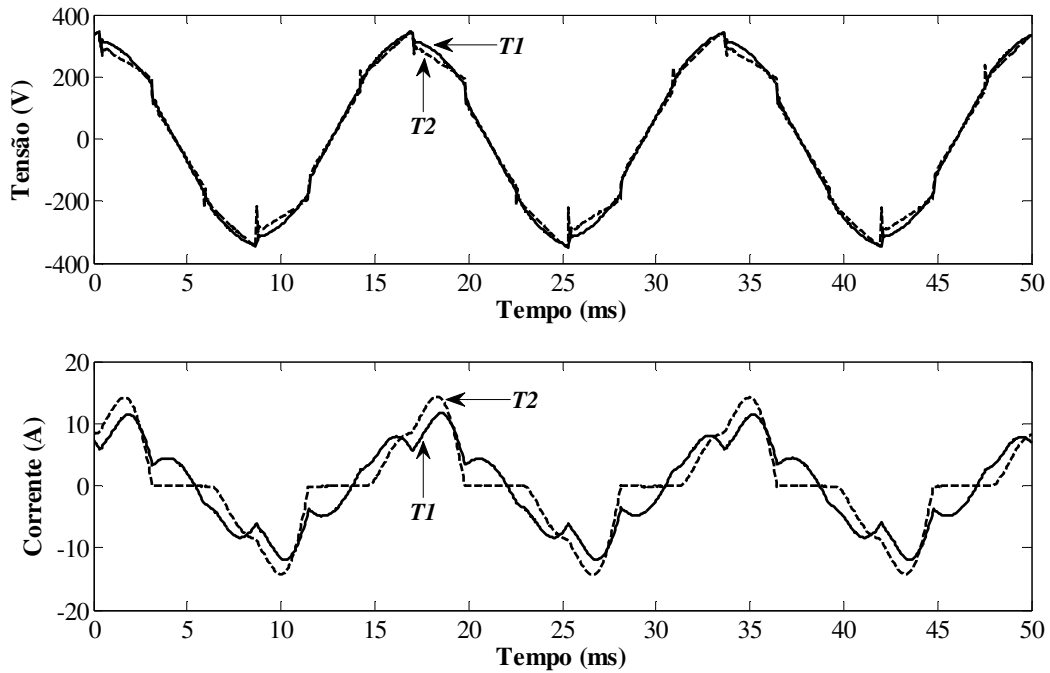


Figura 16 - Tensões e correntes (*fase a*) dos transformadores *T1* e *T2* para a carga *C5*.

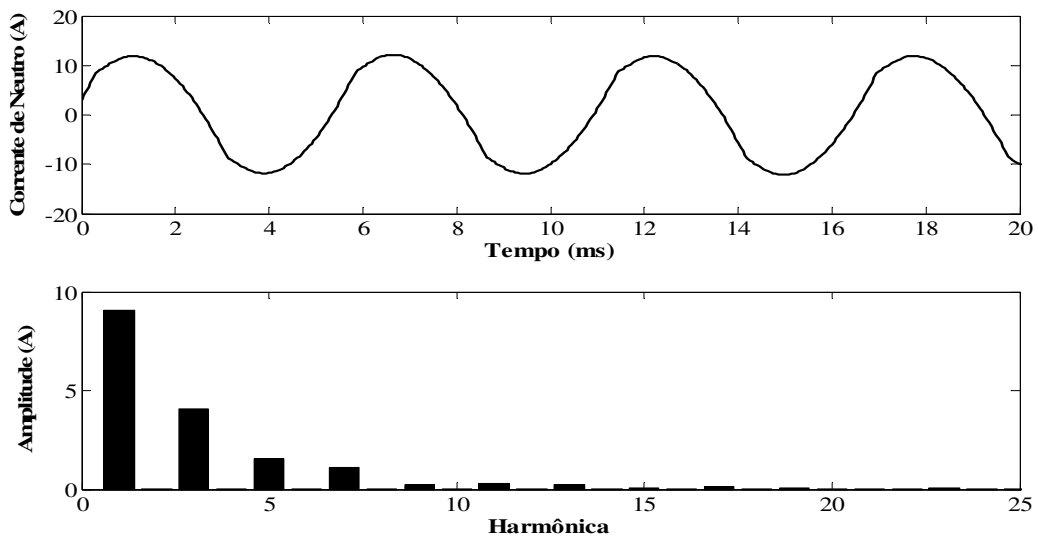


Figura 17 – Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga (*fase a*) do transformador *T2* e carga *C5*.

Nota-se na Figura 16 que o espectro harmônico da corrente de carga é semelhante aos espectros harmônicos das cargas *C2*, *C3*, *C4*. Isto ocorre devido à forte influência do conteúdo harmônico do retificador monofásico. A carga *C5* apresenta um THD_i de 50,16 %.

4.1.3.6. Carga linear e retificador trifásico com filtro capacitivo de $1080 \mu F$ na saída (C6).

A carga C6 é composta por um retificador trifásico (70% da potência do transformador T2) e carga linear (30% da potência do transformador T2), conforme Figura C6 (Anexo C). A Figura 18 exibe as formas de onda das tensões e das correntes nos transformadores T1 e T2 (*fase a*). A distorção na forma de onda da corrente de carga provoca distorção na forma de onda da tensão, principalmente no transformador conectado à carga (T2). A Figura 19 mostra os espectros harmônicos desta corrente de carga.

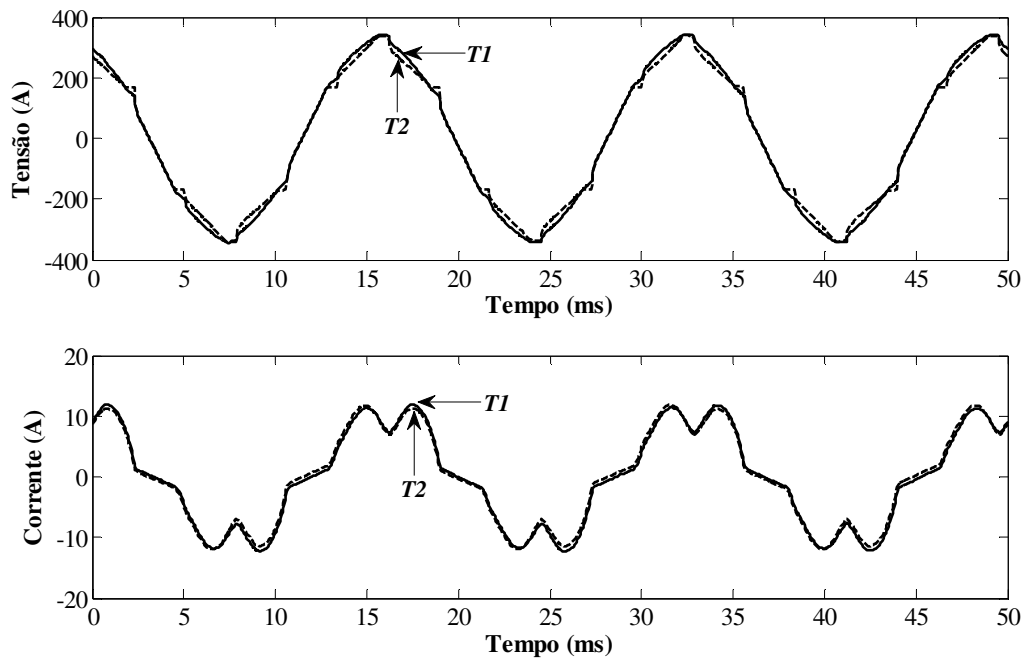


Figura 18 - Tensões e correntes na *fase a* dos transformadores T1 e T2 para a carga C6.

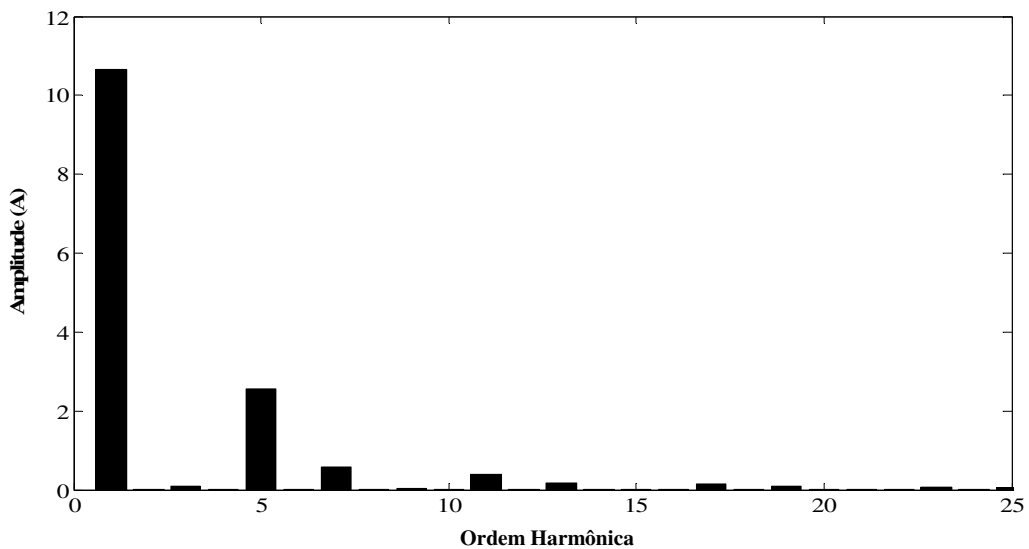


Figura 19 - Espectro harmônico da corrente de carga (*fase a*) do transformador T2 para a carga C6.

Nota-se nesta figura a presença de harmônicas ímpares não-múltiplas de três na corrente de carga. Esta carga apresenta um THD_i de 24,93%.

4.1.3.7. Lâmpadas eletrônicas, computadores e retificador trifásico com filtro capacitivo de $1080 \mu F$ (C7).

A carga C7 é composta por um retificador trifásico (aproximadamente 70% do carregamento do transformador) mais lâmpadas eletrônicas compactas e computadores (30% do carregamento total), conforme Figura C7 (Anexo C). A Figura 20 apresenta as formas de onda das tensões e das correntes referentes à *fase a* de ambos os transformadores quando suprem a carga C7.

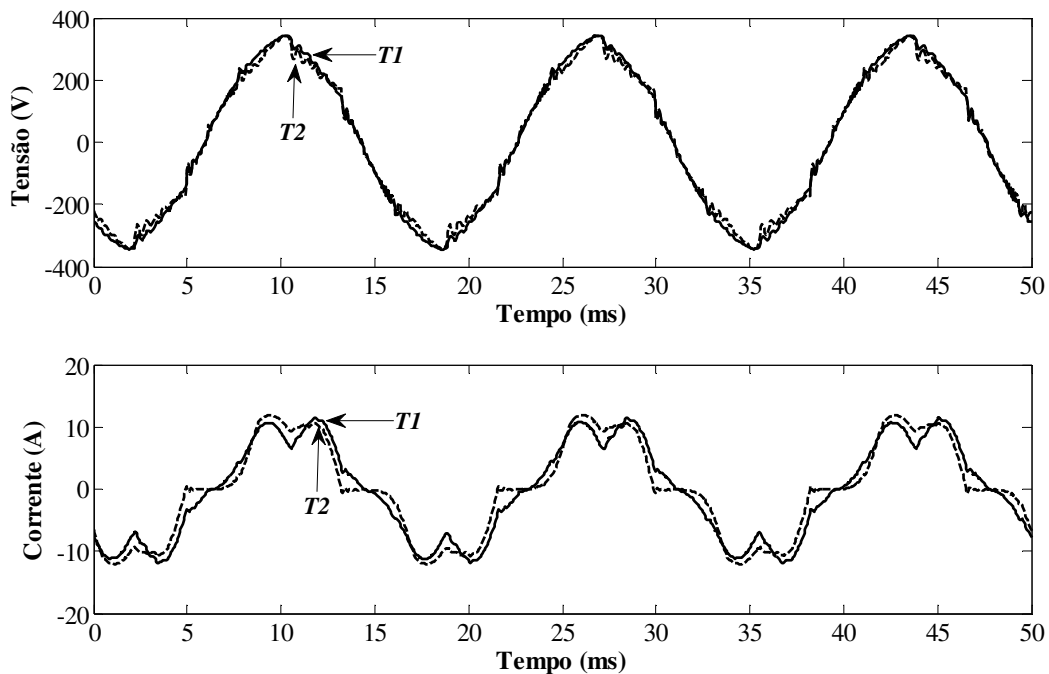


Figura 20 - Tensões e correntes na *fase a* dos transformadores T1 e T2 para a carga C7.

Nota-se na Figura 20 que devido à distorção na corrente de carga, a forma de onda da tensão também sofre distorção, principalmente no transformador conectado à carga (T2).

A Figura 21 apresenta a forma de onda da corrente de neutro e o espectro harmônico da corrente de carga (carga C7).

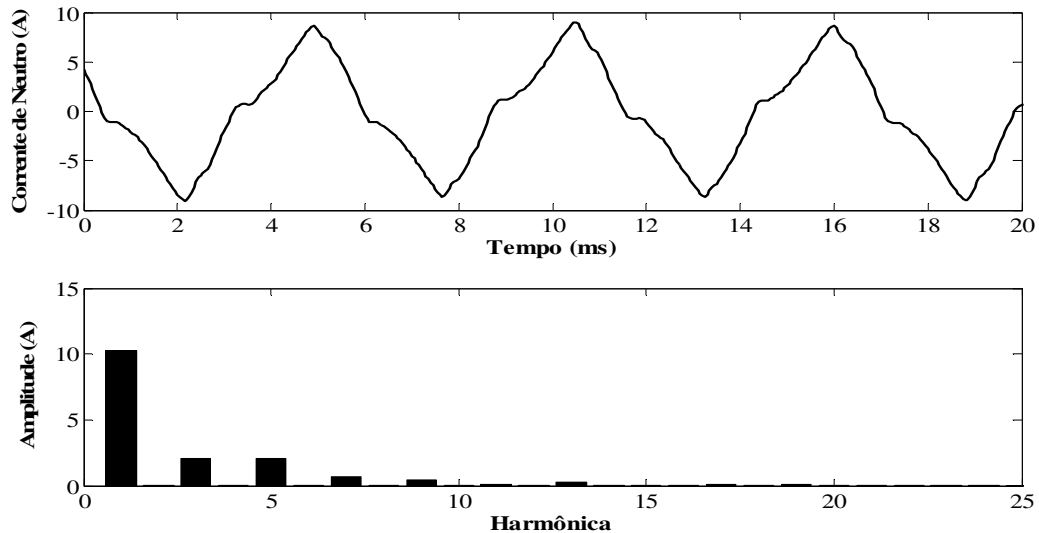


Figura 21 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga (*fase a*) do transformador *T2* e carga *C7*.

Observa-se na Figura 21 uma corrente de neutro com valor *rms* de 5,06 A (67,24% do valor da corrente de carga). Esta corrente se deve as lâmpadas eletrônicas compactas e aos computadores, pois o retificador trifásico não possui neutro. O espectro harmônico para a carga *C7* apresenta harmônicas ímpares e múltiplas de três.

4.1.3.8. Carga linear, lâmpadas eletrônicas, computadores e retificador trifásico com filtro capacitivo de 1080 μF (*C8*).

A carga *C8* é composta por um retificador trifásico (aproximadamente 40% do carregamento do transformador) mais lâmpadas eletrônicas compactas e computadores (representam 30% do carregamento) e carga linear resistiva (responde pelos 30% restantes), conforme Figura *C8* (Anexo *C*).

A Figura 22 apresenta as formas de onda das tensões e das correntes dos dois transformadores, referentes à *fase a*.

É observado na Figura 22 deformações na forma de onda da tensão devido à distorção na forma de onda da corrente de carga, principalmente no segundo transformador o qual esta conectada à carga.

A Figura 23 apresenta a corrente de neutro e os espectros harmônicos da corrente de carga (carga *C8*).

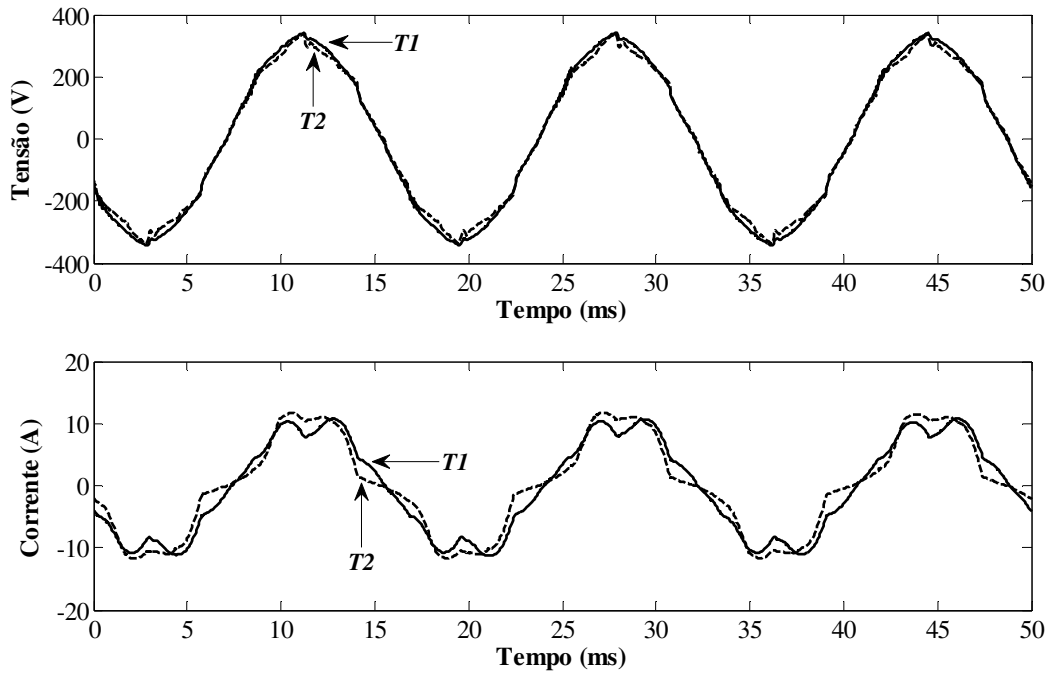


Figura 22 - Tensões e correntes (*fase a*) dos transformadores *T1* e *T2* para a carga C8.

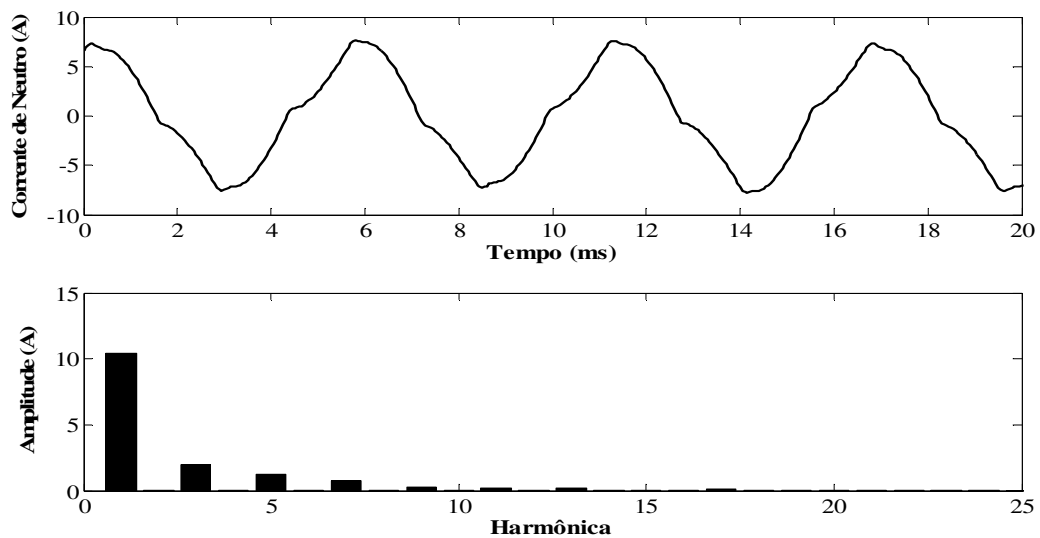


Figura 23 - Corrente de neutro e espectro harmônico da corrente de carga da *fase a* do transformador *T2* para a carga C8.

Nota-se na Figura 23 uma corrente de neutro com valor de 4,86 A (64,96% da corrente de carga). A corrente de neutro para a carga C8 é praticamente a mesma daquela observada para a carga C7, devido ao fato de que para ambas as cargas estas correntes são devidas apenas aos computadores e as lâmpadas eletrônicas compactas. O espectro harmônico da carga C8 também é bastante semelhante ao da carga C7, contudo, as harmônicas ímpares e

não-múltiplas de três tiveram uma ligeira queda devido à diminuição do carregamento referente ao retificador trifásico.

4.1.3.9. Retificador trifásico com filtro capacitivo $1080 \mu F$ (C9).

A carga C9 consiste de um retificador trifásico com potência próxima a nominal do transformador, conforme Figura C9 (Anexo C). A Figura 24 apresenta as formas de onda das tensões e das correntes (*fase a*) dos dois transformadores quando suprime o retificador trifásico de onda completa.

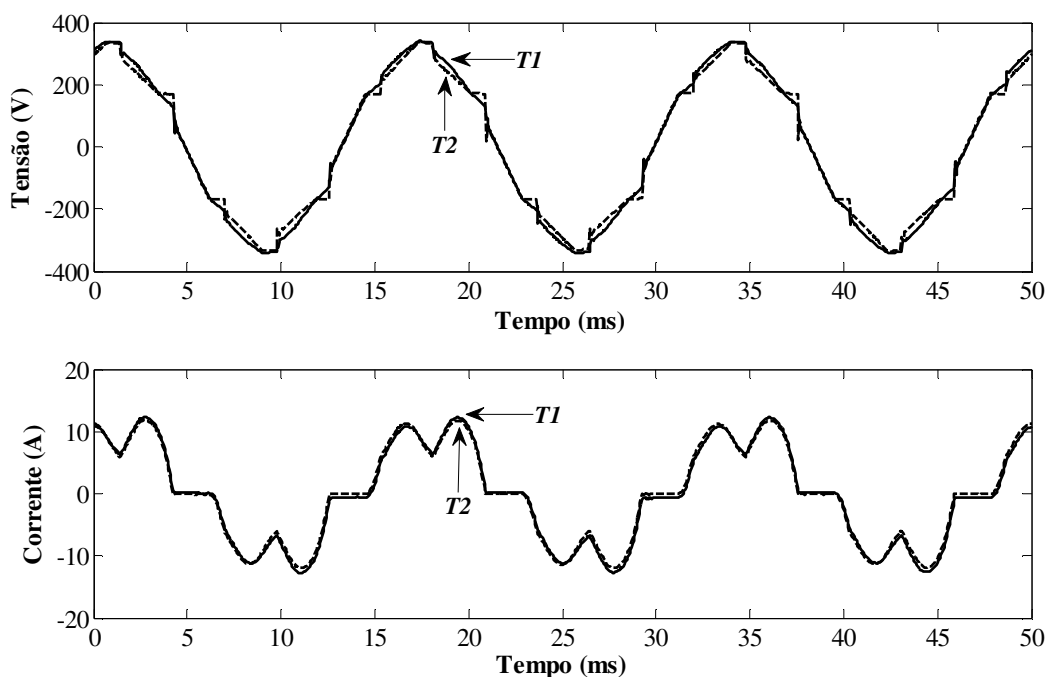


Figura 24 - Tensões e correntes na *fase a* dos transformadores *T1* e *T2* suprindo a carga C9.

A distorção na corrente de carga provoca distorção na forma de onda da tensão, sendo que os principais pontos de distorção são nos instantes de chaveamento, principalmente no transformador conectado à carga (*T2*). Pelas formas de onda das correntes apresentadas na Figura 24, percebe-se a grande distorção presente na corrente de carga (THD_i de 31,64%).

A Figura 25 apresenta os espectros harmônicos da corrente de carga.

Como a carga C9 é trifásica e sem neutro, não há presença de harmônicas múltiplas de três. O retificador trifásico de onda completa é uma carga simétrica, portanto não há componentes harmônicas de ordem par.

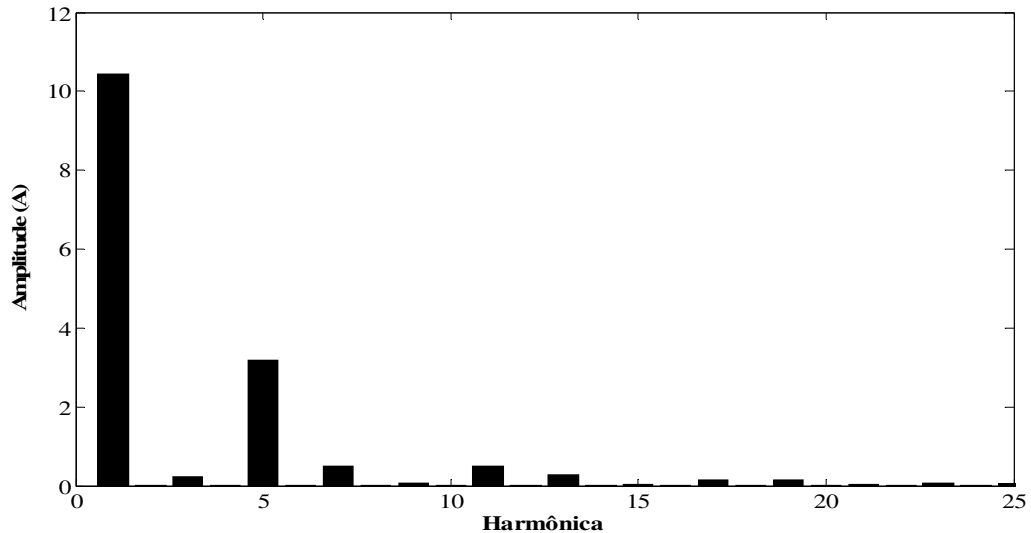


Figura 25 - Espectro harmônico da corrente de carga (*fase a*) do transformador *T2* para a carga *C9*.

4.1.4. Tensões, correntes, fatores de multiplicação, perdas, potências máximas e rendimentos dos transformadores.

Neste trabalho são determinadas para os diversos tipos de cargas utilizadas as tensões aplicadas, as correntes, as distorções harmônicas totais, os fatores de multiplicação (F_{HL} e *Fator K*), as perdas, as potências máximas (potências nominais depreciadas) e os rendimentos dos transformadores.

A Tabela 7 apresenta os valores das tensões e das correntes na entrada do transformador *T1* e na saída do transformador *T2* (carga), juntamente com suas respectivas distorções harmônicas totais (THD_v e THD_i). Também nesta tabela são mostrados os fatores de multiplicação F_{HL} , F_{HL-STR} e o *Fator K* (recomendações presentes nas referências [6][17][18]).

Para carga linear nominal sendo as correntes senoidais, os fatores de multiplicação (*Fator K*, F_{HL} e F_{HL-STR}) são próximos de 1. Em cargas não-lineares sendo as correntes não senoidais estes fatores são maiores que 1, podendo chegar a próximo de 4 (carga *C9*).

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos, a perda total nos enrolamentos, a perda no núcleo e a perda total no transformador são obtidas através dos diversos métodos apresentados na seção 3.7 (*Temporal*, *Linear*, F_{HL} e *Fator K*). A Tabela 8 apresenta os resultados dos cálculos das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos obtidas pelos

diversos métodos (para cada tipo de carga), bem como a diferença percentual em relação ao método *Temporal*.

Tabela 7 – Tensões, correntes e fatores de multiplicação calculados para os transformadores *T1* e *T2*.

Cargas	Tensão (V)		Corrente (A)			Fator de Multiplicação		
	Valor (V)	THD_v (V)	Neutro (A)	Fase (A)	THD_i (%)	F_{HL}	F_{HL-STR}	Fator K
T1								
C1	232,60	2,02	-	7,83	3,13	1,017	1,001	1,066
C2	232,96	3,46	-	7,65	16,39	1,974	1,081	2,042
C3	232,26	4,45	-	7,24	21,11	2,771	1,141	2,821
C4	232,43	3,84	-	7,45	16,96	2,147	1,089	2,132
C5	231,40	3,73	-	6,92	20,91	2,622	1,133	2,178
C6	232,39	3,81	-	7,90	23,78	2,604	1,150	2,876
C7	231,89	3,46	-	7,55	20,82	2,313	1,121	2,582
C8	232,30	2,44	-	7,60	13,81	1,686	1,057	1,684
C9	232,64	5,10	-	7,92	30,07	3,464	1,231	3,882
T2								
C1	220,58	2,09	0,02	7,63	2,07	1,010	1,001	1,041
C2	220,40	6,56	7,77	7,81	39,04	2,830	1,230	3,044
C3	220,29	9,15	8,51	7,43	45,88	3,756	1,321	3,805
C4	220,21	7,21	7,05	7,51	36,38	2,841	1,214	2,853
C5	220,39	7,33	8,75	7,16	50,16	3,837	1,353	3,500
C6	220,08	8,02	0,02	7,66	24,93	2,750	1,165	2,913
C7	220,40	7,63	5,06	7,51	29,88	2,780	1,186	2,998
C8	220,39	4,96	4,86	7,55	23,64	2,044	1,110	2,075
C9	220,29	10,44	0,02	7,65	31,64	3,703	1,255	3,955

A Figura 26 exibe as curvas referentes à Distorção Harmônica Total de corrente (THD_i) em função do fator de potência e da corrente de neutro em função do fator de potência.

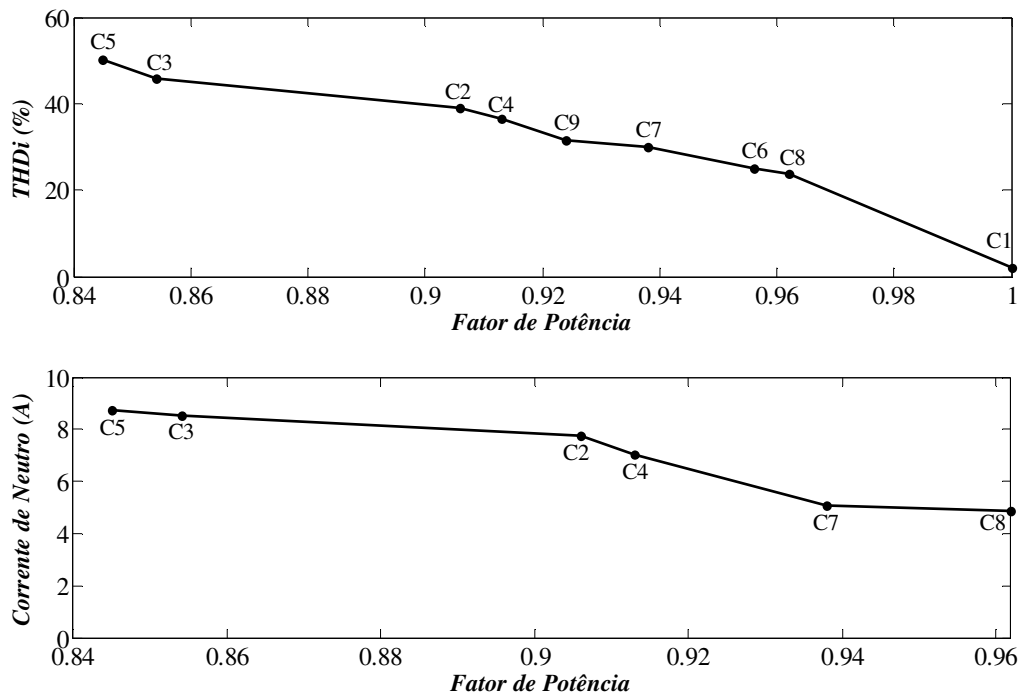


Figura 26 – Corrente de neutro e THDi em função do fator de potência

Pela Figura 26 é possível observar que à medida que o fator de potência aumenta o THD_i e a corrente de neutro diminuem. A carga C5 apresenta menor fator de potência e maior corrente de neutro e THD_i . As cargas C6 e C9 não possuem corrente de neutro.

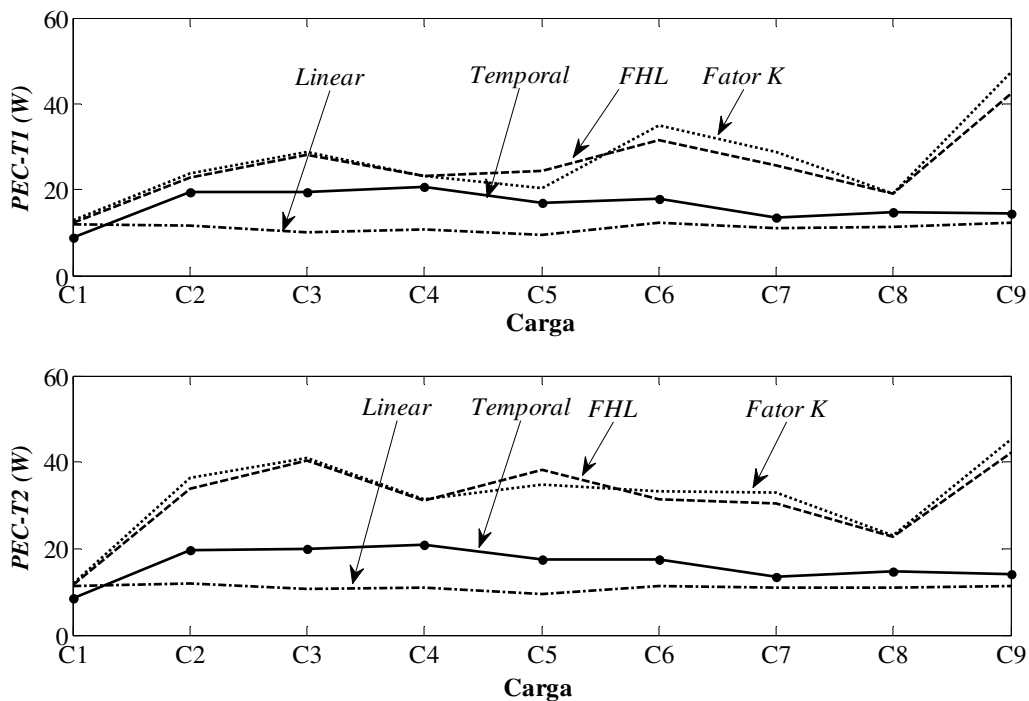
O método *Temporal*, por utilizar-se de dados medidos com transdutores de tensões e de correntes de alta precisão e tratamento no domínio do tempo, é considerado neste trabalho como o mais preciso e, as diferenças percentuais nos cálculos das perdas são em relação a ele.

As perdas por correntes parasitas nos enrolamentos obtidas pelos métodos do Fator K e do F_{HL} são calculadas com base na perda por correntes parasitas nos enrolamentos na frequência fundamental (P_{EC-O}), que por sua vez, é obtida através da resistência que representa a perda por correntes parasitas nos enrolamentos (R_{EC}). Os valores das perdas obtidas pelos métodos referenciados chegam a apresentar grandes diferenças em relação ao método *Temporal* (dependendo do tipo de carga).

As perdas por correntes parasitas nos enrolamentos dos dois transformadores pela utilização dos vários métodos (P_{EC-T1} , para o transformador $T1$, e P_{EC-T2} , para o transformador $T2$) estão apresentadas na Figura 27.

Tabela 8 – Perda por correntes parasitas nos enrolamentos dos transformadores.

Cargas	Método						
	Temporal	Modelo L		F_{HL}		Fator K	
	P_{EC} (W)	P_{EC-o} (W)	Dif. (%)	P_{EC} (W)	Dif. (%)	P_{EC} (W)	Dif. (%)
T1							
C1	8,870	11,96	34,80	12,16	37,09	12,75	43,74
C2	19,32	11,64	-39,75	23,00	19,04	23,78	23,08
C3	19,35	10,20	-47,28	28,29	46,20	28,79	48,78
C4	20,63	10,82	-47,55	23,24	12,65	23,08	11,87
C5	16,79	9,33	-44,43	24,45	45,62	20,31	26,9
C6	18,00	12,15	-32,50	31,64	75,77	34,96	94,22
C7	13,62	11,15	-18,13	25,80	89,42	28,81	111
C8	14,74	11,26	-23,60	19,00	28,90	18,98	28,76
C9	14,57	12,25	-15,92	42,34	190	47,45	225
T2							
C1	8,642	11,35	31,36	11,48	32,87	11,82	36,80
C2	19,58	11,96	-38,91	33,86	72,93	36,41	85,95
C3	19,87	10,75	-45,89	40,39	103	40,91	106
C4	20,77	10,98	-47,13	31,19	50,16	31,33	50,84
C5	17,39	9,28	-46,63	38,30	120	34,94	101
C6	17,47	11,44	-34,51	31,48	80,19	33,34	90,84
C7	13,50	10,97	18,74	30,51	125	32,91	144
C8	14,63	11,10	-24,12	22,70	55,16	23,05	57,55
C9	14,08	11,41	-18,96	42,28	200	45,16	220

Figura 27 – Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos dos transformadores $T1$ e $T2$.

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos é maior quando há mais componentes harmônicas na corrente de carga. Porém, comparando-se as curvas de perdas do método *Temporal* em relação aos outros métodos, verifica-se que este aumento é menor do que os previstos para os métodos referenciados [6][17][18].

A Tabela 9 apresenta os valores das perdas totais nos enrolamentos pelos vários métodos, bem como a diferença percentual calculada em relação às perdas totais obtidas pelo método *Temporal*.

Tabela 9 – Perdas totais nos enrolamentos dos transformadores *T1* e *T2*.

Cargas	Método						
	<i>Temporal</i>	<i>Modelo L</i>		F_{HL}		<i>Fator K</i>	
	P_w (W)	P_w (W)	Dif. (%)	P_w (W)	Dif. (%)	P_w (W)	Dif. (%)
T1							
C1	140,36	143,42	2,18	143,66	2,35	144,21	2,74
C2	147,36	139,69	-5,20	151,05	2,50	151,83	3,03
C3	131,66	122,44	-7,00	140,52	6,73	141,03	7,11
C4	139,63	129,83	-7,02	142,24	1,87	142,09	3,99
C5	119,32	111,85	-6,66	126,98	6,42	122,84	2,95
C6	151,60	145,77	-3,84	165,24	8,99	168,58	11,20
C7	136,24	133,77	-1,81	148,43	8,94	151,43	11,15
C8	138,62	135,15	-2,50	142,88	3,07	142,86	3,06
C9	148,98	146,63	-1,57	176,75	18,6	181,86	22,1
T2							
C1	133,48	136,17	2,01	136,32	2,12	136,64	2,36
C2	151,10	143,48	-5,04	165,38	9,45	167,93	11,13
C3	138,16	128,97	-6,65	158,60	14,8	159,13	15,2
C4	141,48	131,69	-6,92	151,90	7,36	152,04	7,46
C5	127,14	119,73	-5,83	148,06	16,4	144,69	13,8
C6	143,30	137,29	-4,20	157,31	9,77	159,18	11,1
C7	134,18	131,66	-1,87	151,19	12,7	153,59	14,5
C8	136,75	133,22	-2,58	144,82	5,90	145,17	6,15
C9	139,60	136,94	-1,90	167,80	20,2	170,68	22,3

Sob carga linear a perda nos enrolamentos apresenta diferenças baixas para qualquer um dos métodos, uma vez que os fatores de multiplicação para carga linear são iguais a um. Para as outras cargas existem diferenças maiores, chegando a 22,3% entre o método *Temporal* e o *Fator K* (transformador *T2*), quando supre a carga C9.

A Figura 28 apresenta os gráficos das perdas totais nos enrolamentos para os transformadores *T1* e *T2*.

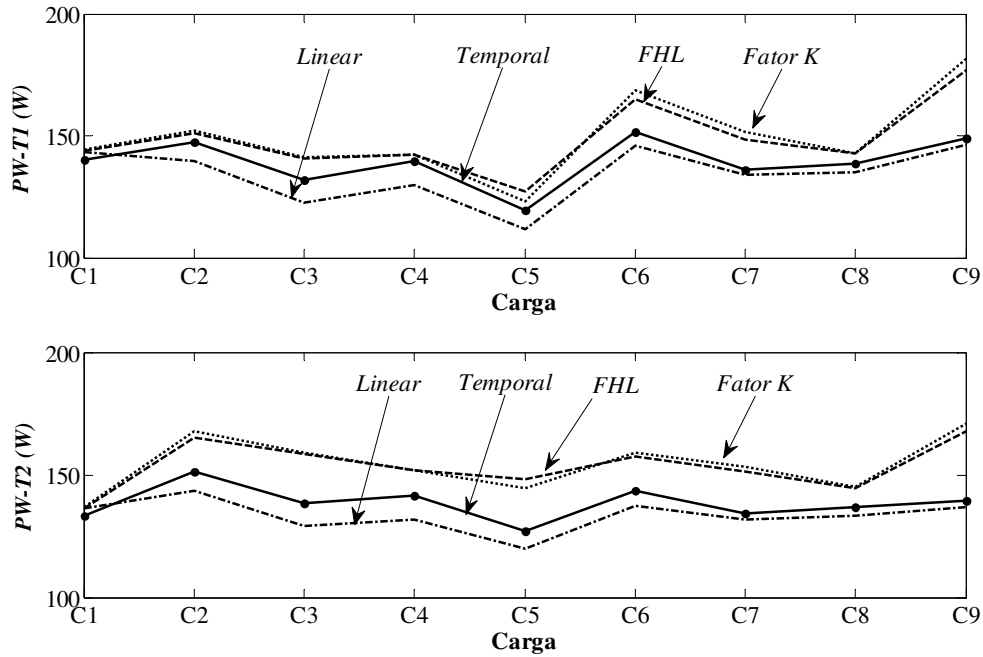


Figura 28 – Perdas totais nos enrolamentos dos transformadores $T1$ e $T2$.

As perdas totais nos enrolamentos obtidas pelos métodos do *Fator K* e do F_{HL} estão acima das obtidas pelo método *Temporal*, que por sua vez apresenta perdas superiores as apresentadas pelo método *Linear*.

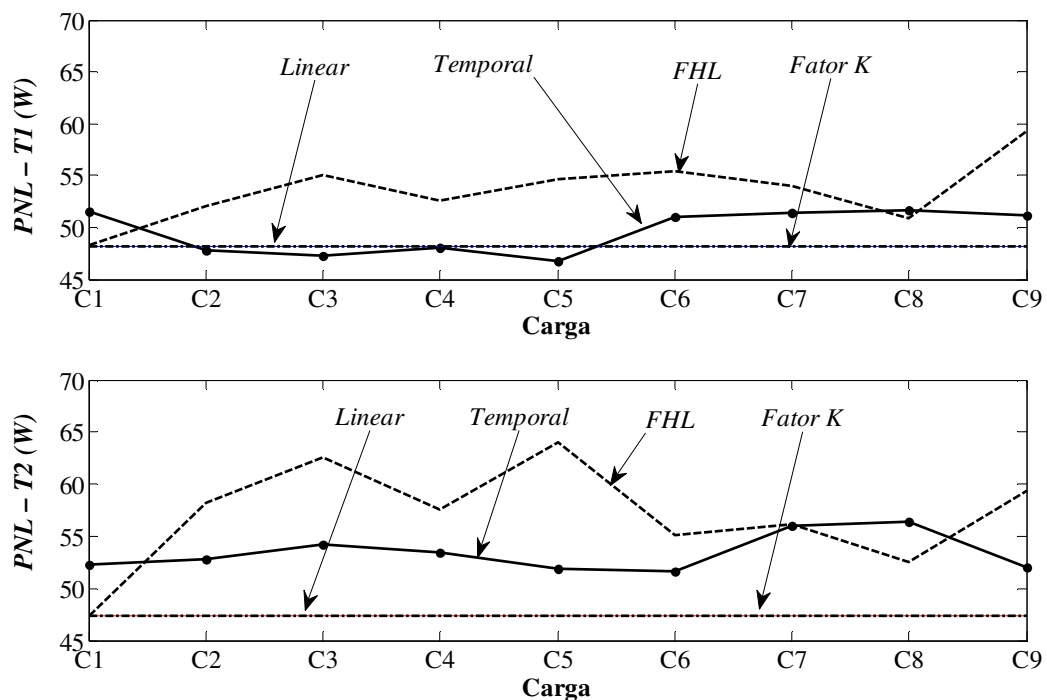
A Tabela 10 contém os valores das perdas nos núcleos para $T1$ e $T2$.

O *Fator K* não menciona alteração da perda no núcleo devido às frequências das correntes harmônicas, portanto as perdas para este método são determinadas da mesma forma que para o método *Linear*, ou seja, através do ensaio em vazio. A perda no núcleo para o método *Temporal* é maior para o transformador $T2$ (conectado à carga), quando alimenta as cargas não-lineares, conforme mostrado na Tabela 10.

A Figura 29 apresenta as curvas de perdas nos núcleos para os transformadores $T1$ e $T2$, obtidas pelos diversos métodos.

Tabela 10 – Perdas nos núcleos dos transformadores $T1$ e $T2$.

Cargas	Método						
	Temporal	Modelo L		F_{HL}		Fator K	
	P_{NL} (W)	P_{NL} (W)	Dif. (%)	P_{NL} (W)	Dif. (%)	P_{NL} (W)	Dif. (%)
T1							
C1	51,55	48,2	-6,49	48,27	-6,36	48,2	-6,49
C2	47,83	48,2	0,77	52,10	8,92	48,2	0,77
C3	47,21	48,2	2,09	54,98	16,5	48,2	2,09
C4	48,05	48,2	0,31	52,53	9,32	48,2	0,31
C5	46,78	48,2	3,04	54,59	16,7	48,2	3,04
C6	50,98	48,2	-5,44	55,44	8,75	48,2	-5,44
C7	51,47	48,2	-6,35	54,06	5,03	48,2	-6,35
C8	51,62	48,2	-6,62	50,94	-1,31	48,2	-6,62
C9	51,20	48,2	-5,86	59,35	15,91	48,2	-5,86
T2							
C1	52,34	47,35	-9,53	47,40	-9,44	47,35	-9,53
C2	52,82	47,35	-10,35	58,25	10,3	47,35	-10,35
C3	54,25	47,35	-12,7	62,57	15,3	47,35	-12,7
C4	53,50	47,35	-11,5	57,51	7,49	47,35	-11,5
C5	51,93	47,35	-8,82	64,07	23,3	47,35	-8,82
C6	51,60	47,35	-8,23	55,16	6,89	47,35	-8,23
C7	56,05	47,35	-15,52	56,18	0,23	47,35	-15,52
C8	56,45	47,35	-16,12	52,56	-6,89	47,35	-16,72
C9	51,99	47,35	-8,92	59,42	14,3	47,35	-8,92

Figura 29 – Perdas nos núcleos dos transformadores $T1$ e $T2$.

As curvas de perda no núcleo para o método *Linear* e para o *Fator K* se sobrepõem e são constantes, uma vez que ambos ignoram a variação da perda no núcleo devido às frequências harmônicas das correntes das cargas não-lineares.

A curva obtida pelo método do F_{HL} está acima da curva do método *Temporal* para a maioria das cargas. Para as cargas C1 e C8 a perda obtida pelo método do F_{HL} é menor do que a do método *Temporal*.

Para a conexão *back-to-back* e considerando-se a modelagem *T* para os dois transformadores, as tensões de magnetização são maiores que as nominais, acarretando uma maior perda no núcleo destes transformadores, pois estas perdas dependem do quadrado da tensão.

A Tabela 11 apresenta as perdas totais (enrolamentos e núcleos) para os dois transformadores, obtidas sob os diversos tipos de cargas e métodos.

Tabela 11 – Perdas totais nos transformadores *T1* e *T2*.

Cargas	Método						
	<i>Temporal</i>	<i>Modelo L</i>		F_{HL}		<i>Fator K</i>	
	P_{Total} (W)	P_{Total} (W)	Dif. (%)	P_{Total} (W)	Dif. (%)	P_{total} (W)	Dif. (%)
T1							
C1	191,91	191,62	0,00	191,93	0,00	192,42	0,00
C2	195,19	187,89	-3,74	203,15	4,08	200,03	2,48
C3	178,87	170,64	-4,60	195,50	9,30	189,23	5,79
C4	187,68	178,02	-5,14	194,77	3,77	190,28	1,38
C5	166,10	160,05	-3,64	181,57	9,31	171,04	2,97
C6	202,58	193,97	-4,25	220,68	8,93	216,77	7,00
C7	187,71	181,98	-3,05	202,48	7,87	199,63	6,35
C8	190,25	183,35	-3,62	193,83	1,88	191,06	0,42
C9	200,18	194,83	-2,67	236,09	17,9	230,06	14,9
T2							
C1	185,83	183,52	-1,24	183,72	-1,13	183,99	-0,01
C2	203,93	190,83	-6,42	223,64	9,66	215,29	5,57
C3	192,42	176,32	-8,36	221,23	14,97	206,48	7,30
C4	194,99	179,04	-8,18	209,41	7,39	199,34	2,23
C5	179,08	167,08	-6,70	212,12	18,45	192,04	7,23
C6	194,90	184,64	-5,26	212,47	9,01	206,53	5,96
C7	190,23	179,00	-5,90	207,38	9,01	200,94	5,63
C8	193,21	180,57	-6,54	197,38	2,16	192,51	-0,003
C9	191,59	184,29	-3,81	227,22	18,6	218,03	13,8

Para a carga linear (C1) o maior erro encontrado entre as perdas totais (-1,24%) está entre o método *Linear* e *Temporal*, referente ao transformador *T2*. Para as cargas não-lineares o maior erro encontrado para as perdas totais foi entre o método *Temporal* e F_{HL} , para

o transformador $T2$ (carga C9) e vale 18,6%. Neste tipo de carga não há corrente de neutro, ou seja, ausência de terceiro harmônico e seus múltiplos.

A Figura 30 apresenta as curvas das perdas totais nos dois transformadores pela utilização dos vários métodos. Verifica-se nesta figura que as curvas de perdas totais para o método F_{HL} e *Fator K* são próximas entre si e ambas sobre dimensionam as perdas no transformador, quando alimentam cargas não-lineares. A curva referente ao método *Temporal* se encontra acima da curva obtida pelo método *Linear*.

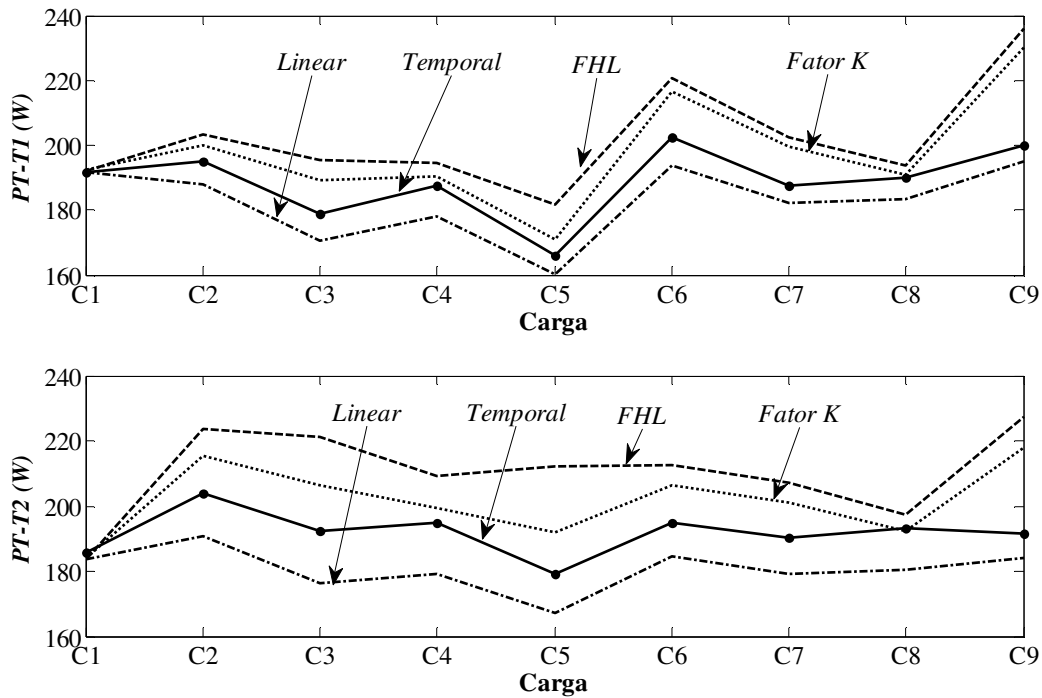


Figura 30 – Perdas totais nos transformadores $T1$ e $T2$.

A Tabela 12 apresenta além do rendimento as potências máximas que os transformadores devem suprir (potências nominais depreciadas) calculadas através dos três métodos apresentados: *Temporal*, F_{HL} e do *Fator K* (o método linear não considera variações na perda em transformador sob condição de carga não-linear).

Pela Tabela 12, verifica-se que as potências máximas (potência nominal depreciada) calculadas pelos métodos do *Fator K* e do F_{HL} são menores do que a obtida utilizando-se o método *Temporal*, com exceção da carga C1 (transformador $T2$) que apresenta um valor próximo.

Tabela 12 – Potências máximas e rendimentos dos transformadores.

Cargas	Potência Máxima (%)			Rendimento (%)
	Método			Método
	<i>Temporal</i>	F_{HL}	<i>Fator K</i>	<i>Temporal</i>
T1				
C1	99,79	99,60	99,39	96,46
C2	97,48	93,41	94,75	96,16
C3	96,76	89,87	92,63	96,07
C4	96,46	93,2	95,11	96,17
C5	97,46	91,74	96,26	96,16
C6	96,95	88,11	89,92	96,13
C7	97,83	91,37	92,63	96,26
C8	97,43	95,66	96,82	96,32
C9	98,02	81,13	84,09	96,05
T2				
C1	99,49	100	99,77	96,48
C2	95,67	85,73	89,19	95,93
C3	94,22	80,51	87,18	95,75
C4	94,50	87,41	91,54	95,97
C5	95,62	80,79	89,88	95,87
C6	96,72	88,32	90,62	96,16
C7	96,11	88,29	90,81	96,13
C8	95,62	93,38	95,11	96,17
C9	97,72	81,13	85,19	96,11

Os rendimentos apresentados nesta tabela apresentam valores menores para cargas que contém corrente de neutro (terceira harmônica e suas múltiplas). Como o método *Temporal* é o mais preciso e por isto usado como referência neste trabalho os rendimentos foram calculados em relação a ele. A carga C1 apresentou os maiores rendimentos o que já era esperado visto que esta carga é linear, o pior rendimento encontrado foi para a carga C3 no transformador *T2*.

A Figura 31 apresenta as curvas referentes à potência máxima do transformador *T2* e o rendimento para os transformadores *T1* e *T2*. Através da Figura 31 observamos que o método *Temporal* fornece potências máximas superiores aos métodos do *Fator K* e F_{HL} , o rendimento para os dois transformadores são próximos para os diversos tipos de cargas utilizadas.

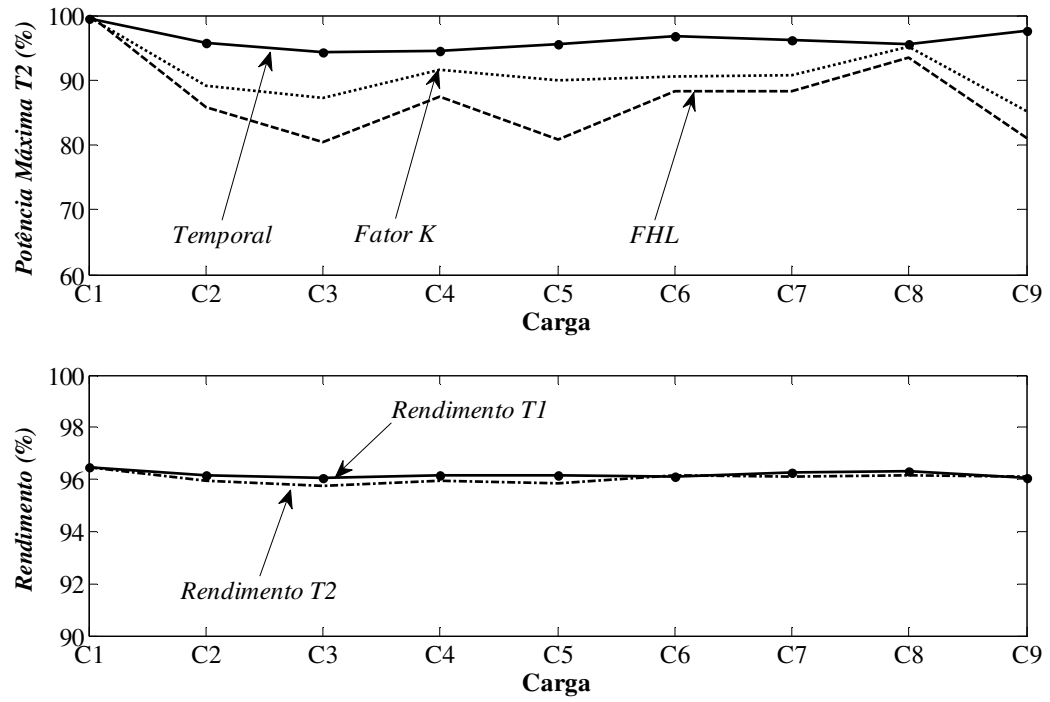


Figura 31 – Potências máximas e rendimentos para os transformadores T1 e T2.

5. FATOR DE PERDA REAL (F_{RL}).

Por meio da análise dos resultados da parte experimental quando dos transformadores $T1$ e $T2$ suprindo as cargas específicas de C1 a C9 e utilizando-se dos valores das perdas calculadas pelos vários métodos (F_{HL} , *Fator K*, *Linear* e *Temporal*), observa-se um sobre dimensionamento tanto relativos às perdas nos enrolamentos quanto para as perdas fora dos enrolamentos. Assim, para obter-se uma melhor aproximação das perdas para o dimensionamento de transformadores serão propostos novos fatores para o cálculo das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos que é chamado F_{RL} (Fator de Perda Real) e também outro fator para cálculo das perdas fora dos enrolamentos chamado F_{RL-STR} (Fator de Perda Real Fora dos Enrolamentos).

O fator F_{RL} foi obtido por meio da divisão entre perda por correntes parasitas (P_{EC}) calculada através do modelo *Temporal* adotado e a perda por correntes parasitas nos enrolamentos na frequência fundamental (P_{EC-O}), conforme equação (5.1) (semelhante à equação (3.24)).

$$F_{RL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} \quad (5.1)$$

Onde:

P_{EC} é a perda específica por correntes parasitas;

P_{EC-O} é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos na frequência fundamental.

Na Tabela 13 estão apresentadas as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) calculadas pelo modelo *Temporal* (modelo *T* - referência) e as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos calculadas na frequência fundamental (P_{EC-O}) calculadas pelo modelo *L*, ambas relativas ao transformador $T2$ no suprimento das cargas de C1 a C9.

Tabela 13 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador *T2* (modelos *T* e *L*).

Cargas	Perdas	
	P_{EC} (modelo <i>T</i>)	P_{EC-O} (modelo <i>L</i>)
C1	8,642	11,35
C2	19,58	11,96
C3	19,87	10,75
C4	20,77	10,98
C5	17,39	9,28
C6	17,47	11,44
C7	13,50	10,97
C8	14,63	11,10
C9	14,08	11,41

O fator F_{RL-STR} foi obtido por meio da divisão entre perda no núcleo (P_{NL}) calculada através do modelo *Temporal* (referência) e a perda no núcleo devido à carga linear nominal (P_{NL-R}), conforme equação (5.2) (semelhante à equação (3.33)).

$$F_{RL-STR} = \frac{P_{NL}}{P_{NL-R}} \quad (5.2)$$

Onde:

P_{NL} é a perda fora dos enrolamentos (modelo *Temporal*);

P_{NL-R} é a perda fora dos enrolamentos (modelo *L*).

Na Tabela 14 estão apresentadas as perdas fora dos enrolamentos (P_{NL}) calculadas pelo modelo *Temporal* (modelo *T* - referência) e as perdas fora dos enrolamentos (P_{NL-R}) calculadas devido às cargas linear nominal (modelo *L*), relativas ao transformador *T2* para as cargas de C1 a C9.

Tabela 14 - Perdas fora dos enrolamentos do transformador T2 (modelos T e L).

Cargas	Perdas	
	P_{NL} (modelo T)	P_{NL-R} (modelo L)
C1	52,34	47,35
C2	52,82	47,35
C3	54,25	47,35
C4	53,50	47,35
C5	51,93	47,35
C6	51,60	47,35
C7	56,05	47,35
C8	56,45	47,35
C9	51,99	47,35

Com base nas equações (5.1) e (5.2) e com auxílio das Tabelas 13 e 14 pode-se calcular os fatores de perdas F_{RL} e F_{RL-STR} .

Os novos fatores F_{RL} e F_{RL-STR} são semelhantes às equações (2.7) e (2.8) que definem F_{HL} e F_{HL-STR} [6], o que os diferem são os expoentes das ordens harmônicas, pois os expoentes quadráticos das correntes circulantes representam as perdas nos condutores. Por meio das equações (5.3) e (5.4) obtém-se os novos fatores F_{RL} e F_{RL-STR} .

$$F_{RL} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2 h^x}{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (5.3)$$

$$F_{RL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2 h^y}{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (5.4)$$

As cargas não-lineares de C2 a C9 apresentam expressivo conteúdo harmônico em relação à carga linear nominal. Analisando-se o espectro harmônico das correntes nas cargas de C2 a C9 e realizando-se algumas iterações (tentativas), pôde-se determinar os valores dos expoentes x e y da ordem harmônica (h) na obtenção das expressões matemáticas para os novos fatores F_{RL} e F_{RL-STR} , que representam os valores das perdas do transformador no suprimento de cargas não-lineares.

A Tabela 15 fornece os valores dos expoentes x e y , considerando-se o modelo T (referência) para as cargas de C2 a C9.

Tabela 15 - Valores dos expoentes x e y para as cargas de C2 a C9.

Expoente	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
x	1,36	1,31	1,58	1,29	1,36	0,90	1,34	0,76
y	0,50	0,47	0,58	0,31	0,55	0,79	1,00	0,44

Com os valores dos expoentes definidos, calculam-se os valores dos fatores F_{RL} e F_{RL-STR} que definem as perdas quando o transformador estiver suprindo os tipos de carga presentes na Tabela 15. A Tabela 16 compara os diversos fatores calculados (F_{HL} , $Fator K$, F_{RL} , F_{HL-STR} e F_{RL-STR}).

Tabela 16 - Fatores de multiplicação para as cargas de C2 a C9.

Cargas	Fatores				
	F_{HL}	$Fator K$	F_{RL}	F_{HL-STR}	F_{RL-STR}
C2	2,830	3,044	1,637	1,230	1,114
C3	3,756	3,805	1,839	1,321	1,145
C4	2,841	2,853	1,889	1,214	1,129
C5	3,837	3,500	1,869	1,353	1,094
C6	2,750	2,913	1,523	1,165	1,088
C7	2,780	2,998	1,227	1,186	1,179
C8	2,065	2,185	1,318	1,113	1,170
C9	3,703	3,955	1,231	1,255	1,097

A Figura 32 mostra o comportamento dos fatores F_{HL} , $Fator K$, F_{RL} , F_{HL-STR} e F_{RL-STR} em função com o tipo de carga. Observando-se os dados dos gráficos da Figura 32, verifica-se que os fatores utilizados internacionalmente para dimensionar as perdas nos transformadores (cargas de C2 à C9) estão acima do fator real (F_{RL}), ou seja, os fatores reais (F_{RL} e F_{RL-STR}) apresentam valores menores que os calculados através dos métodos do $Fator K$ e F_{HL} .

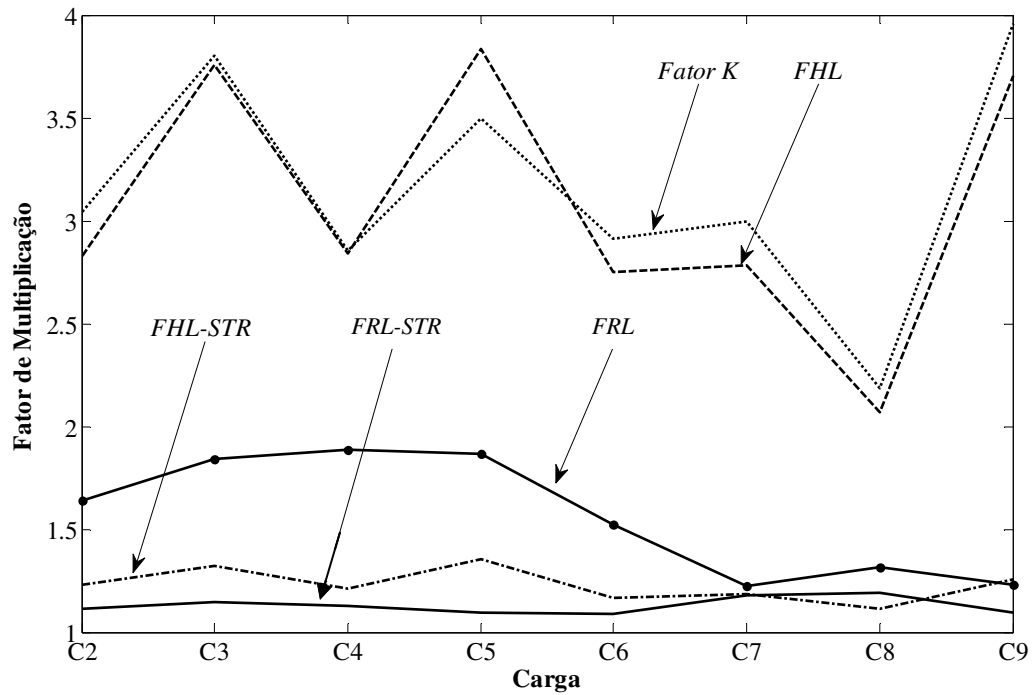


Figura 32 – Tipos de cargas em função dos fatores F_{HL} , $Fator K$ e F_{RL} .

A Figura 33 exhibe as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}), calculadas pelos métodos F_{HL} , $Fator K$, $Linear$ e F_{RL} .

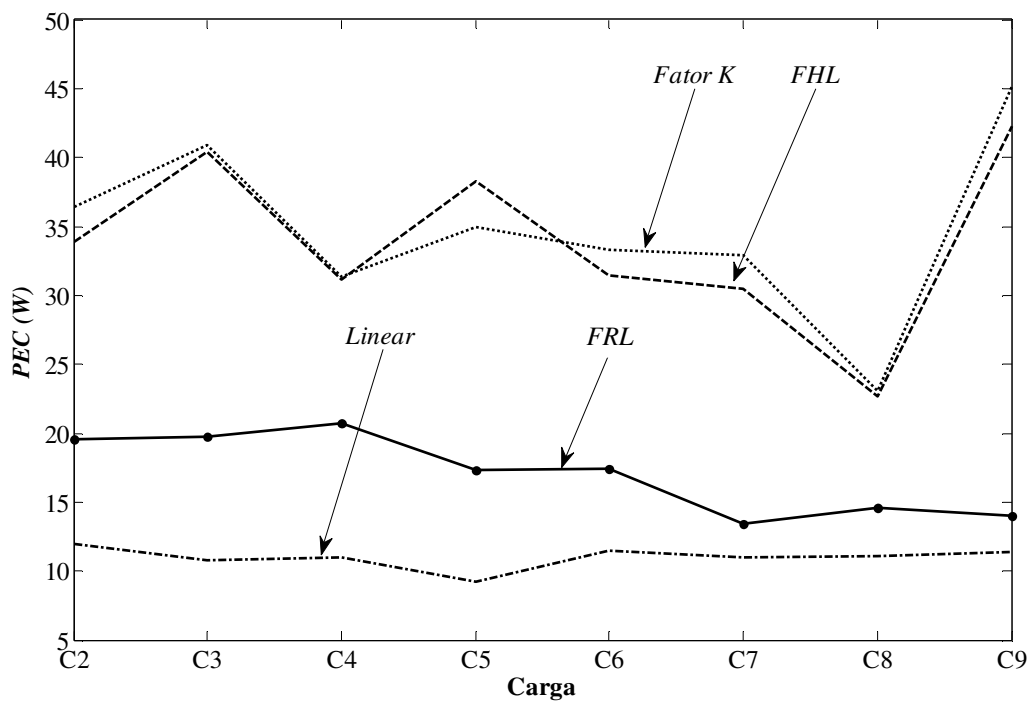


Figura 33 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) por F_{HL} , $Fator K$, $Linear$ e F_{RL} .

Analisando-se a Figura 33 observa-se que pelo método do Fator de Perda Real (F_{RL}) os cálculos das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) apresentam valores menores que os fatores utilizados internacionalmente (F_{HL} e $Fator K$), assim sendo, o novo fator não está sobre dimensionando o transformador.

A Figura 34 exibe as perdas no núcleo (P_{NL}) calculadas pelos métodos F_{HL} , $Fator K$, $Linear$ e F_{RL} . As curvas de perdas no núcleo para o método $Linear$ e para o $Fator K$ se sobrepõem e são constantes, uma vez que ambos ignoram a variação da perda no núcleo devido às frequências harmônicas das correntes de cargas.

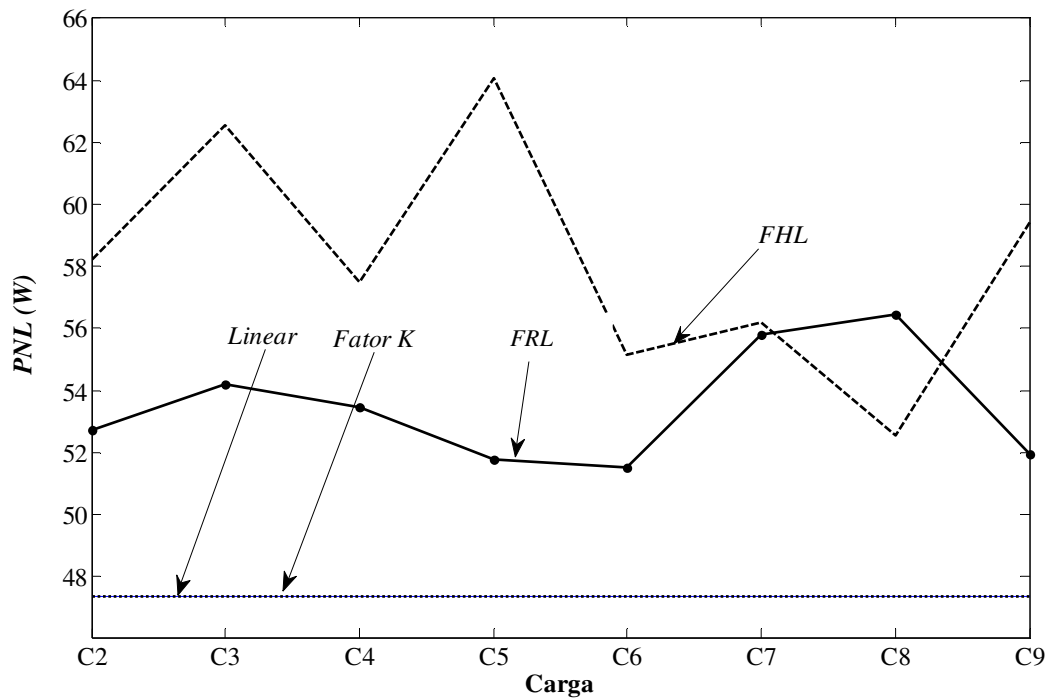


Figura 34 - Perdas no núcleo (P_{NL}) relativas aos métodos do F_{HL} , $Fator K$, $Linear$ e F_{RL} .

É possível observar na Figura 34 que as perdas no núcleo (P_{NL}) obtidas com o fator real (F_{RL}) são menores que as obtidas através do F_{HL} , com exceção da carga C8.

A Figura 35 exibe as perdas totais (P_{Total}) calculadas pelos métodos F_{HL} , $Fator K$, $Linear$ e F_{RL} . Observando-se esta figura, percebe-se que a perda total (P_{Total}) obtida através do Fator de Perda Real (F_{RL}) não sobre dimensiona o transformador. A perda total obtida com os fatores utilizados internacionalmente (F_{HL} e $Fator K$) são maiores.

O presente estudo apresentou um novo fator de perda por correntes parasitas nos enrolamentos (F_{RL}) e um novo fator para perda por correntes parasitas fora dos enrolamentos (F_{RL-STR}) para cada carga especificamente. Para isso, foi necessário fazer algumas iterações

(tentativas) utilizando-se dos espectros harmônicos dessas cargas até encontrar os expoentes adequados para x e y , os quais ao serem utilizados nas expressões (5.3) e (5.4) resultaram em valores mais próximos dos valores reais, ou seja, daqueles calculados pelo método *Temporal*.

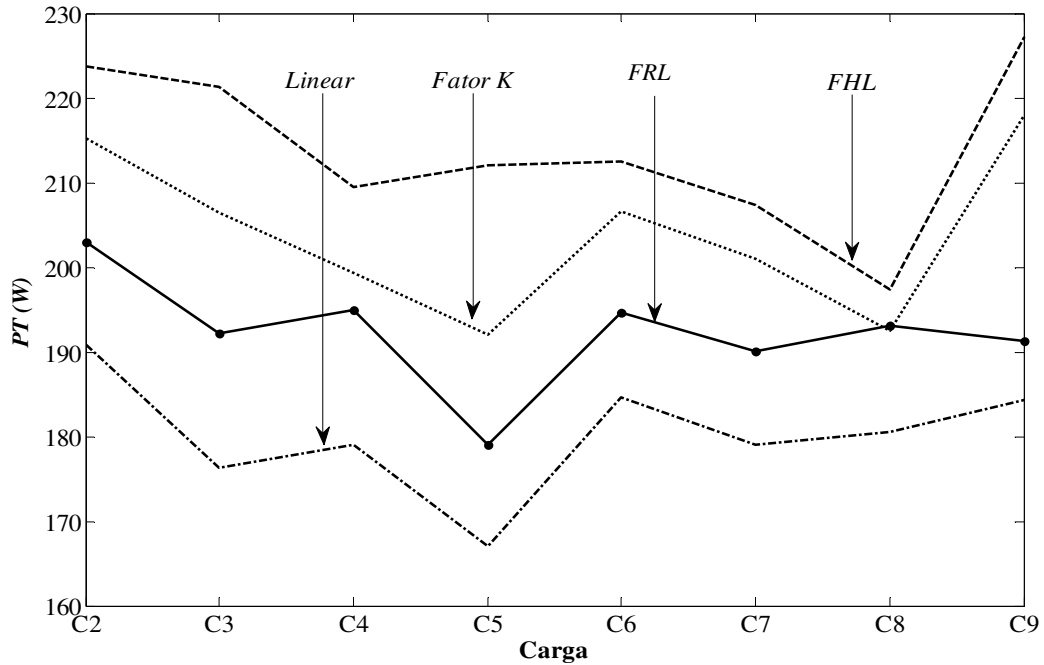


Figura 35 - Perdas totais (P_{Total}) relativas aos métodos do F_{HL} , Fator K , Linear e F_{RL} .

A Figura 36 exibe o valor destes expoentes em função do tipo de carga.

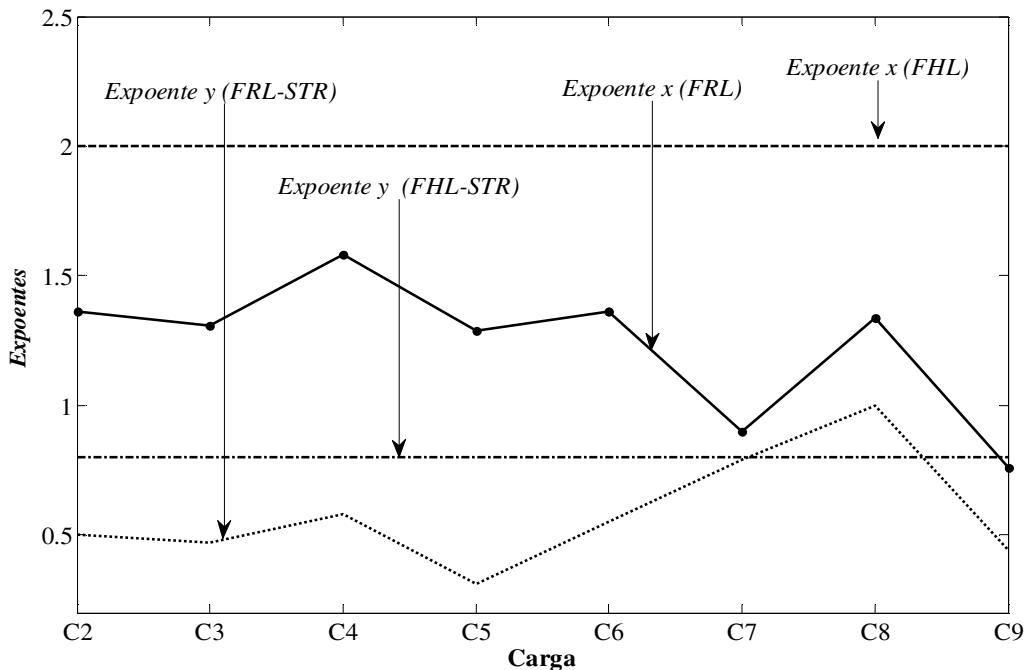


Figura 36 – Valores dos expoentes x e y em função das cargas de C2 a C9.

No intuito de encontrar uma expressão matemática que melhor represente estes fatores para qualquer tipo de carga, foi feita uma análise dos dados obtidos para as cargas de C2 a C9 e, assim chegou-se às expressões desejadas representadas pelas equações (5.5) e (5.6). Os valores dos expoentes x e y adotados são referentes àqueles encontrados para a carga C4 e C8 respectivamente (Figura 36). O expoente x referente à carga C4 e o expoente y referente à carga C8 são os de maior valor 1,6 e 1,0 respectivamente, o que define os piores casos encontrados. As equações (5.5) e (5.6) definem os novos fatores (F_{RL} e F_{RL-STR}).

$$F_{RL} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2 h^{1,6}}{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (5.5)$$

$$F_{RL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2 h^{1,0}}{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (5.6)$$

As perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$ levando-se em consideração o fator real (F_{RL}) estão apresentadas na Figura 37.

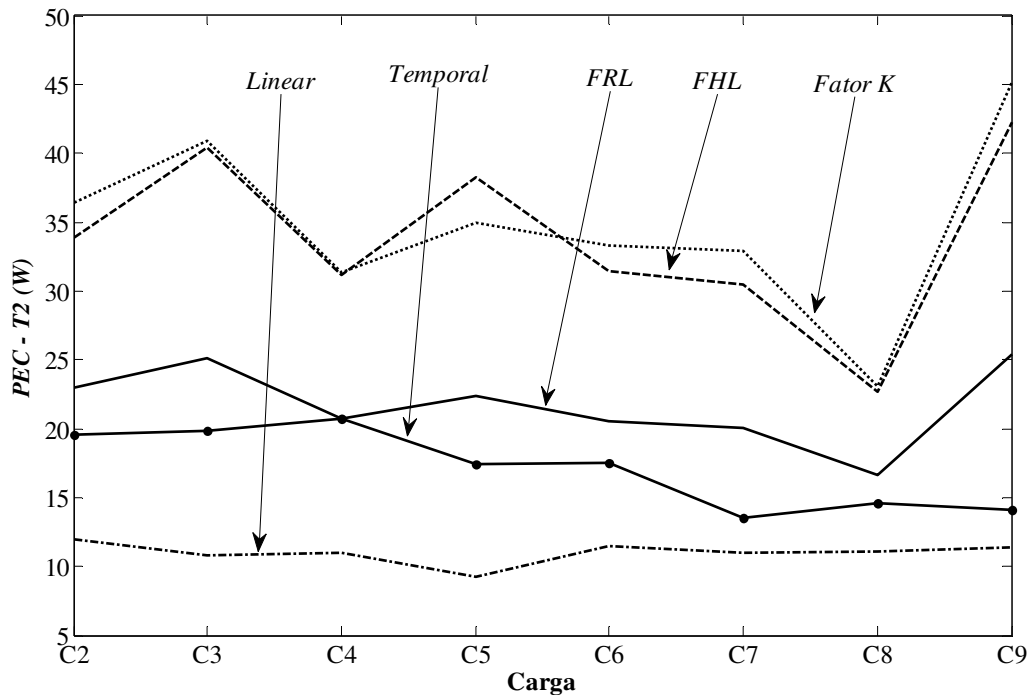


Figura 37 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador $T2$.

Pela Figura 37 observa-se que a perda por correntes parasitas calculada com o F_{RL} está próxima da curva obtida utilizando-se o método *Temporal* e, inferior às obtidas pelos métodos F_{HL} e *Fator K*.

A Figura 38 mostra a perda total nos enrolamentos do transformador $T2$.

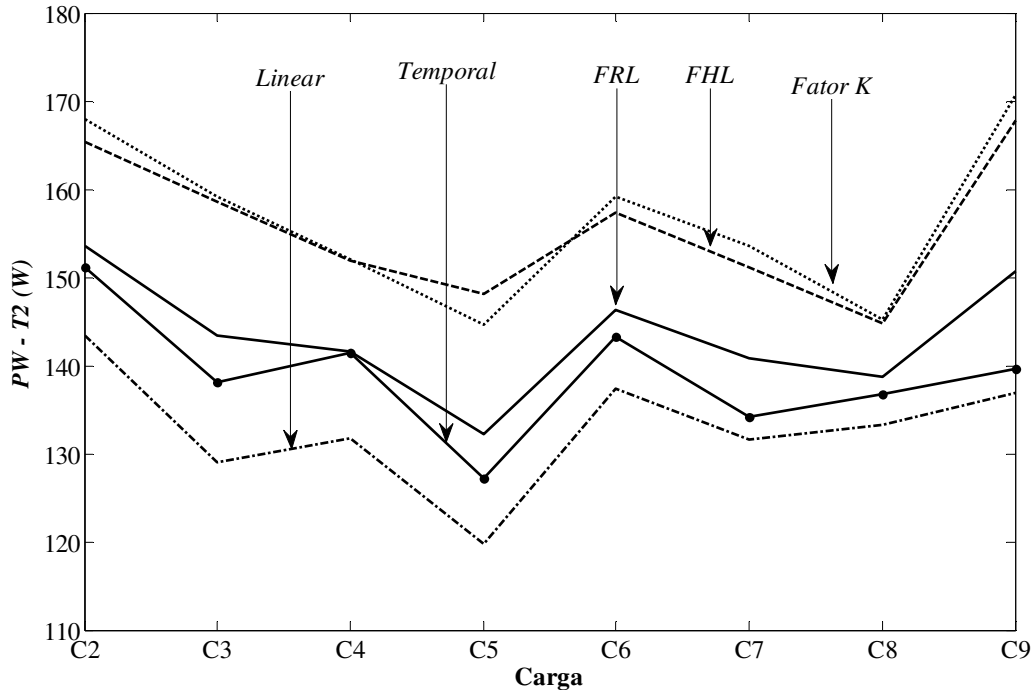


Figura 38 – Perda total nos enrolamentos do transformador $T2$.

Analisando-se a Figura 38, percebe-se novamente, que há uma proximidade das curvas das perdas nos enrolamentos relativas ao método *Temporal* e F_{RL} . A curva do Fator de Perda Real (F_{RL}) está abaixo das curvas obtidas pelos métodos do *Fator K* e F_{HL} .

A Figura 39 traz as perdas no núcleo para o transformador $T2$. Por esta figura, observa-se que a perda no núcleo calculada através do F_{RL} apresenta valores superiores à perda no núcleo calculada pelo método do F_{HL} . A perda no núcleo calculada através dos métodos *Linear* e *Fator K* são constantes.

A Figura 40 exibe as perdas totais no transformador $T2$, obtidas com o F_{RL} e com os demais métodos. Através da análise da Figura 40 pode-se notar que perda total obtida com a utilização do F_{RL} é maior que a perda total obtida quando se faz uso dos métodos *Temporal* e *Linear* para todas as cargas e maior em relação ao *Fator K* para maioria das cargas analisadas, isto se deve principalmente ao sobre dimensionamento da perda no núcleo obtida com F_{RL-STR} . O Fator de Perda Real para a perda no núcleo (F_{RL-STR}) prejudica o modelo

apresentado, pois o expoente referente ao pior caso encontrado ($\gamma=1,0$) faz com que as perdas no núcleo apresentem valores elevados para maioria das cargas o que não condiz com a realidade, ou seja, não retrata as perdas calculadas pelo modelo *T*.

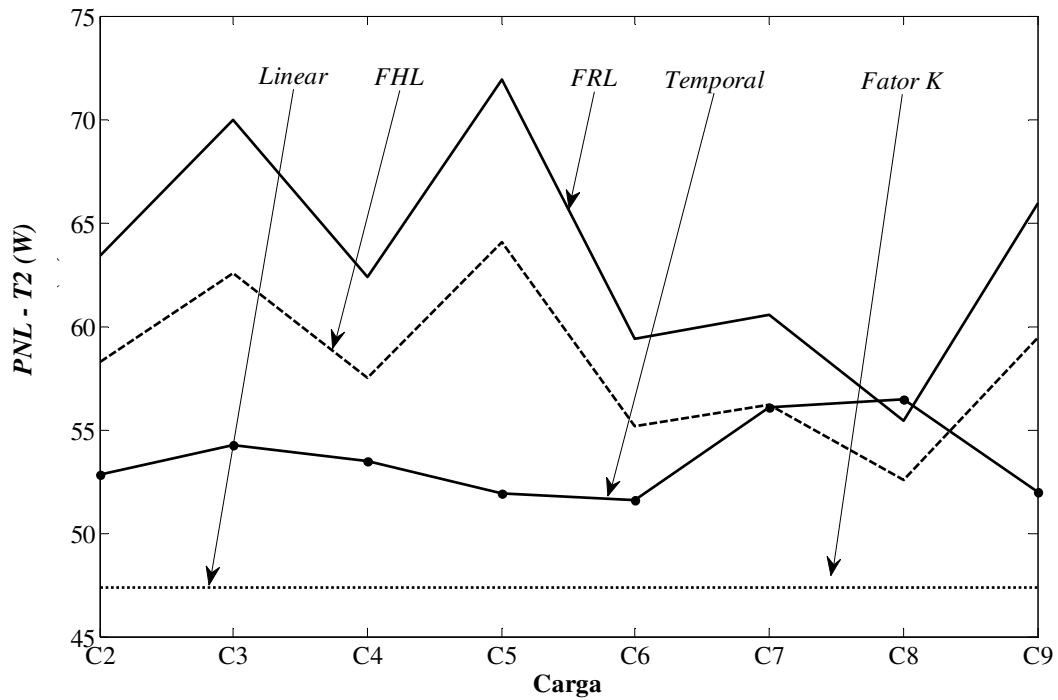


Figura 39 – Perdas no núcleo do transformador T2.

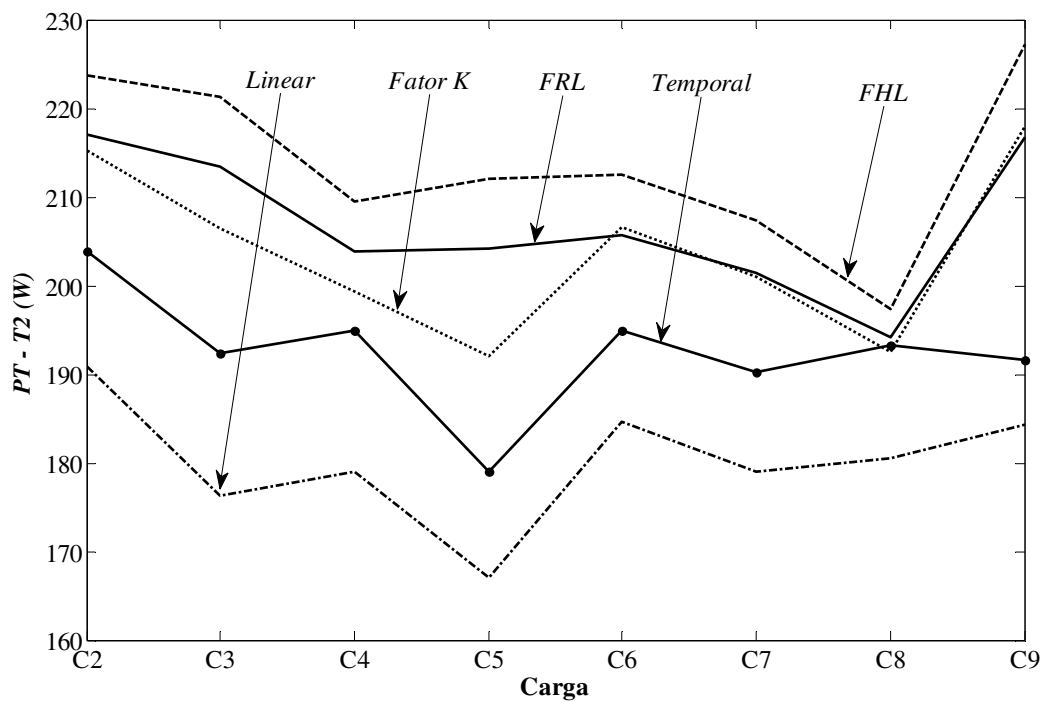


Figura 40 – Perdas totais no transformador T2.

A fim de propor um modelo que determina as perdas no núcleo para todas as cargas analisadas que melhor represente a realidade foram utilizadas como referência as perdas no núcleo obtidas pelo método *Temporal*. A nova perda no núcleo proposta é 17% maior que a perda no núcleo obtida através do modelo *Linear* e *Fator K*, conforme Figura 34 e tomando-se como base a pior situação. Esta nova perda no núcleo ($1,17P_{NL-R}$) substituiu a perda encontrada através do F_{RL-STR} em relação a todas as cargas analisadas.

A Figura 41 mostra as perdas totais no transformador T2 para esta nova abordagem de perda no núcleo ($1,17P_{NL-R}$).

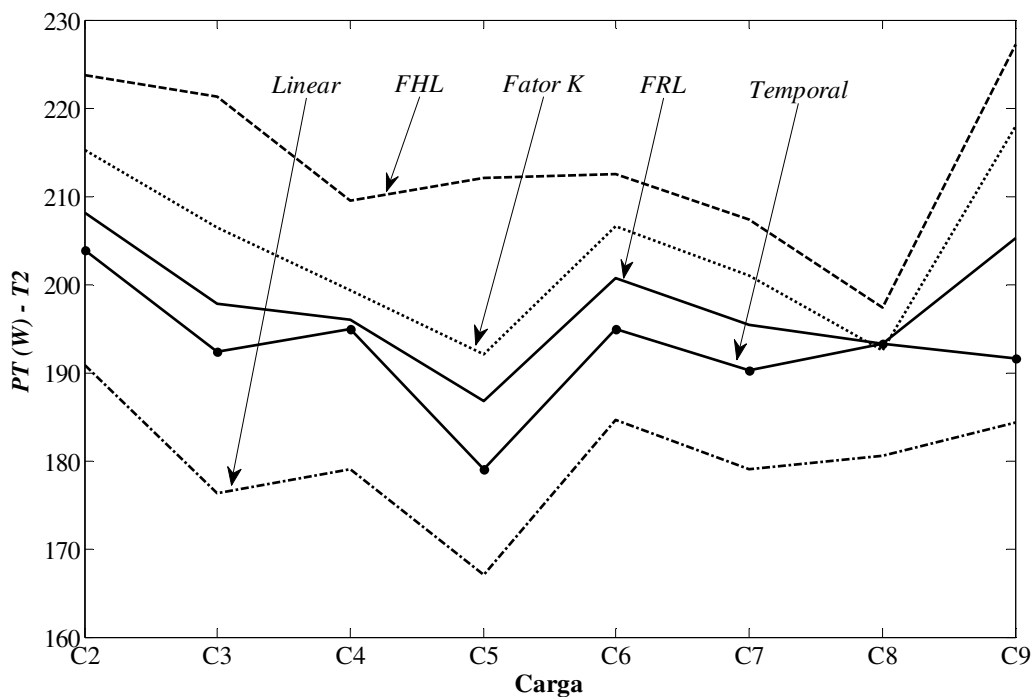


Figura 41 - Perdas totais no transformador T2 para a nova abordagem de perda no núcleo.

Através da Figura 41 pode-se observar que a perda total calculada com o novo fator (F_{RL}) está pouco superior à perda obtida com o método *Temporal* e inferior às apresentadas com a utilização dos métodos referenciados (*Fator K* e F_{HL}). Isto evidencia a eficácia do modelo proposto no dimensionamento do transformador.

Com base nos novos fatores pôde-se construir a Tabela 17 que mostra as diferenças percentuais das perdas calculadas pelo *Fator K*, F_{HL} , F_{RL} e modelo *Linear* em relação às perdas calculadas pelo modelo *Temporal* (referência). Pode-se observar nesta tabela que os cálculos das perdas pelos métodos internacionais sobre dimensionam as perdas.

Por outro lado, observa-se também, que o método proposto calcula as perdas de forma real e os erros apresentados com o uso dos novos fatores são menores, proporcionando mais economia e maior rendimento na aquisição e na operação do equipamento respectivamente.

Tabela 17 - Diferenças percentuais em relação ao modelo *T* para as cargas de C2 a C9.

Cargas	Método							
	Modelo L		F_{HL}		Fator K		F_{RL}	
	Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (T2)							
	P_{EC-O} (W)	Dif. (%)	P_{EC} (W)	Dif. (%)	P_{EC} (W)	Dif. (%)	P_{EC} (W)	Dif. (%)
C2	11,96	-38,91	33,86	72,93	36,41	85,95	23,30	18,91
C3	10,75	-45,89	40,39	103	40,91	106	25,65	29,12
C4	10,98	-47,13	31,19	50,16	31,33	50,84	21,08	20,10
C5	9,28	-46,63	38,30	120	34,94	101	22,84	31,34
C6	11,44	-34,51	31,48	80,19	33,34	90,84	20,88	19,51
C7	10,97	18,74	30,51	125	32,91	144	20,43	51,35
C8	11,10	-24,07	22,70	55,26	23,05	57,66	17,14	14,60
C9	11,41	-18,96	42,28	200	45,16	220	25,94	84,22
Perdas no núcleo (T2)								
	P_{NL-R} (W)	Dif. (%)	P_{NL} (W)	Dif. (%)	P_{NL} (W)	Dif. (%)	P_{NL} (W)	Dif. (%)
C2	47,35	-10,35	58,25	10,3	47,35	-10,35	55,40	5,52
C3	47,35	-12,7	62,57	15,3	47,35	-12,7	55,40	4,65
C4	47,35	-11,5	57,51	7,49	47,35	-11,5	55,40	2,07
C5	47,35	-8,82	64,07	23,3	47,35	-8,82	55,40	3,42
C6	47,35	-8,23	55,16	6,89	47,35	-8,23	55,40	6,85
C7	47,35	-15,52	56,18	0,23	47,35	-15,52	55,40	-1,17
C8	47,35	-16,10	52,56	-6,87	47,35	-16,10	55,40	-1,89
C9	47,35	-8,92	59,42	14,3	47,35	-8,92	55,40	6,15
Perda total (T2)								
	P_{Total} (W)	Dif. (%)	P_{Total} (W)	Dif. (%)	P_{Total} (W)	Dif. (%)	P_{Total} (W)	Dif. (%)
C2	190,83	-6,42	223,64	9,66	215,29	5,57	209,04	2,44
C3	176,32	-8,36	221,23	14,97	206,48	7,30	198,84	3,22
C4	179,04	-8,18	209,41	7,39	199,34	2,23	196,99	1,01
C5	167,08	-6,70	212,12	18,45	192,04	7,23	187,66	4,57
C6	184,64	-5,26	212,47	9,01	206,53	5,96	201,67	3,35
C7	179,00	-5,90	207,38	9,01	200,94	5,63	196,34	3,11
C8	180,56	-6,52	197,38	2,18	192,52	-0,35	194,19	0,50
C9	184,29	-3,81	227,22	18,6	218,03	13,8	206,20	7,08

6. PLANEJANDO O DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR

A metodologia a ser utilizada para o planejamento do dimensionamento de transformadores baseia-se no levantamento do espectro harmônico de cada carga individual, linear e não-linear, bem como da corrente total referente a estas cargas combinadas. Com este procedimento obtêm-se o modelo das correntes totais com seus espectros harmônicos, que será utilizado para verificar a credibilidade do planejamento do dimensionamento do transformador. Este planejamento do dimensionamento será realizado obedecendo-se aos critérios da norma IEEE Std C57.110-2008 [6]. Isto é feito utilizando-se do Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) e também do Fator de Perda Real (F_{RL}) proposto no capítulo cinco deste trabalho. Estes fatores são proporcionais às perdas nos enrolamentos dos transformadores provenientes da utilização de cargas não-lineares. O F_{HL} e o F_{RL} são definidos conforme as equações (2.7) e (5.5). Para o cálculo da corrente máxima em pu ($I_{max(pu)}$) utilizando-se do F_{RL} , normaliza-se a equação (5.1) pela potência de base (P_{dc-R}), conforme (6.1).

$$\frac{P_{EC}}{P_{dc R}} = \frac{P_{EC-O}}{P_{dc R}} * \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^{1,6}}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (6.1)$$

A perda total nos enrolamentos (P_W) é a soma da perda devido à resistência em dc (P_{dc}) com a perda por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) e, normalizada como descreve a equação (6.2).

$$\frac{P_W}{P_{dc R}} = \frac{P_{EC}}{P_{dc R}} + \frac{P_{dc}}{P_{dc R}} \quad (6.2)$$

O segundo termo da equação (6.2) pode ser escrito conforme (6.3).

$$\frac{P_{dc}}{P_{dc R}} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2}{I_R^2} \quad (6.3)$$

Substituindo-se as equações (6.1) e (6.3) em (6.2) obtêm-se a equação (6.4).

$$\frac{P_W}{P_{dc R}} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}{I_R^2} + \frac{P_{EC-O}}{P_{dc R}} * \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^{1,6} (I_h)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (6.4)$$

A equação (6.4) em pu pode ser reescrita conforme (6.5).

$$P_{W-R(pu)} = I_{max(pu)}^2 + P_{EC-O(pu)} \cdot F_{RL} \quad (6.5)$$

A corrente máxima em pu ($I_{max(pu)}$) é obtida da equação (6.5) sendo expressa conforme (6.6).

$$I_{max(pu)} = \sqrt{1 + (1 - F_{RL}) \cdot P_{EC-O(pu)}} \quad (6.5)$$

Com os fatores F_{HL} e F_{RL} calculados e utilizando-se do valor da perda nos enrolamentos por correntes parasitas para carga linear nominal do transformador (P_{EC-R}) definida conforme equação (3.12), calcula-se a corrente máxima dada em pu ($I_{max(pu)}$) definida pela equação (2.17) com a utilização do F_{HL} e pela equação (6.5) com a utilização do F_{RL} . As equações (2.17) e (6.5) não consideram as variações das perdas no núcleo entre os regimes de carga linear e carga não-linear do transformador. A potência máxima que o transformador deve alimentar em pu ($S_{derated}$) é igual à corrente máxima em pu , como mostrado pela equação (2.18).

O princípio da superposição é utilizado numa tentativa de prever o valor eficaz da corrente total gerada pela combinação das cargas lineares e não-lineares individuais, isto supondo-se que as harmônicas de mesma ordem estejam em fase. Esses valores obtidos serão comparados com os valores medidos considerando-se a operação simultânea das cargas analisadas. Desta forma, pode-se verificar a aplicabilidade ou não da superposição das harmônicas de mesma ordem das correntes de cargas lineares e não-lineares para o planejamento do dimensionamento de transformadores.

6.1. PROCEDIMENTO PARA O DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR

De acordo com a Tabela 1, as cargas analisadas de C2 a C4 e de C6 a C8 são aquelas formadas pela composição de outras cargas individuais, logo estas serão as cargas objeto de estudo neste capítulo. Através dos ensaios em curto-circuito e resistência de enrolamentos em corrente contínua dos transformadores obteve-se o valor de 0,09 pu para a perda por correntes parasitas sob carga linear nominal ($P_{EC-R(pu)}$).

O dimensionamento do transformador para as cargas mostradas na Tabela 1 foi realizado de maneira teórica (de forma planejada com cargas individuais) e de maneira real (com os dados obtidos referentes aos ensaios com as cargas operando em conjunto). Salienta-se que as aquisições de dados das tensões e das correntes bem como os espectros harmônicos dessas correntes foram obtidas na saída do segundo transformador em uma das fases (*fase a*), sendo as cargas equilibradas.

Primeiramente foi realizado o dimensionamento do transformador de forma teórica através do estudo individual das cargas e levando-se em consideração suas composições harmônicas. Desta forma, encontrou-se um valor máximo para a corrente do transformador, tendo como base o somatório das componentes harmônicas de mesma ordem das cargas individuais.

O dimensionamento real do transformador foi realizado pelas cargas combinadas (C2 a C4 e de C6 a C8), levando-se em conta os espectros harmônicos das correntes totais nos cálculos das correntes máximas em *pu* ($I_{máx(pu)}$). Com esses dois procedimentos podem-se comparar os resultados obtidos de forma teórica e de forma real. A Tabela 18 exibe os espectros harmônicos para as cargas analisadas, de forma teórica (I_{Th}) e medida (I_{Mh}), até a 25^a harmônica. Também são mostradas as correntes totais (I_{Total}) a Distorção Harmônica Total de corrente ($THDi$) o Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) bem como o Fator de Perda Real (F_{RL}). As harmônicas pares não apresentaram potências significativas, como esperado.

Nota-se na Tabela 18 que o Fator de Perda Real (F_{RL}) apresenta valores menores que o F_{HL} , isto já era esperado, pois este fator foi proposto tendo como base o modelo *Temporal* adotado como referência neste trabalho.

A Tabela 19 exibe os espectros harmônicos para as cargas de C2 a C4 e de C6 a C8, de forma medida (I_{Mh}), até a 25^a harmônica. Também são mostradas as correntes totais (I_{Total}), a $THDi$, o F_{HL} e o F_{RL} .

Tabela 18 - Espectros harmônicos das correntes teóricas para as cargas de C2 a C4 e de C6 a C8.

h	I_{Th} (C2)	I_{Th} (C3)	I_{Th} (C4)	I_{Th} (C6)	I_{Th} (C7)	I_{Th} (C8)
1	10,392	9,9953	10,387	10,745	10,347	10,792
2	0,0102	0,0142	0,0099	0,0079	0,0119	0,0101
3	3,5848	5,6228	4,6027	0,1957	2,2337	2,2330
4	0,0049	0,0084	0,0071	0,0068	0,0103	0,0081
5	1,3379	2,6190	2,4211	2,6363	3,9174	3,3244
6	0,0040	0,0061	0,0062	0,0028	0,0049	0,0049
7	0,9599	1,3441	0,9722	0,5936	0,9778	1,1379
8	0,0013	0,003	0,0041	0,0017	0,0034	0,0038
9	0,1949	0,4847	0,4887	0,0531	0,3429	0,3127
10	0,0015	0,0019	0,0023	0,0011	0,0015	0,0014
11	0,3150	0,5318	0,4803	0,4207	0,6375	0,4990
12	0,0012	0,002	0,0024	0,0008	0,0016	0,0017
13	0,1654	0,3325	0,3299	0,1814	0,3485	0,3038
14	0,0006	0,0014	0,0021	0,0010	0,0018	0,0018
15	0,0786	0,1493	0,1406	0,0243	0,095	0,0961
16	0,0010	0,0018	0,0017	0,0011	0,0019	0,0023
17	0,1327	0,2762	0,232	0,1604	0,3039	0,2617
18	0,0012	0,0019	0,0013	0,0009	0,0016	0,0013
19	0,0853	0,1598	0,1420	0,1108	0,1853	0,1437
20	0,0016	0,0025	0,0019	0,0006	0,0015	0,0021
21	0,0525	0,1273	0,1062	0,0262	0,101	0,0958
22	0,0009	0,0015	0,0015	0,0007	0,0013	0,0016
23	0,0706	0,1304	0,1201	0,0731	0,1329	0,1277
24	0,0008	0,0008	0,0011	0,0006	0,0006	0,0008
25	0,0593	0,0909	0,0736	0,0776	0,1092	0,0795
I_{Total} (A)	11,125	11,874	11,687	11,093	11,366	11,592
THD_i	38,21	64,12	51,57	25,66	45,45	39,20
F_{HL}	2,8151	5,4899	4,3951	2,8680	5,6054	4,4702
F_{RL}	1,9305	3,2589	2,6917	1,8765	3,1611	2,6359

O cálculo do valor do erro percentual (Erro%) da corrente teórica máxima em pu ($I_{Tmax(pu)}$) em relação à corrente medida máxima ($I_{Mmax(pu)}$) do transformador a ser adquirido (método do Planejamento do Dimensionamento de Transformador) é conforme equação (6.2). A Tabela 20 mostra as correntes máximas teóricas (I_{Tmaxpu}) e medidas (I_{Mmaxpu}) em pu e os erros entre elas, tomando-se como referência as correntes medidas em função do F_{HL} e do F_{RL} .

$$Erro\% = \frac{I_{Tmaxpu} - I_{Mmaxpu}}{I_{Mmaxpu}} \times 100\% \quad (6.2)$$

Tabela 19 - Espectros harmônicos, medidos, das cargas analisadas.

h	I_{Mh} (C2)	I_{Mh} (C3)	I_{Mh} (C4)	I_{Mh} (C6)	I_{Mh} (C7)	I_{Mh} (C8)
1	10,299	9,4835	9,9425	10,655	10,256	10,629
2	0,0039	0,0041	0,0078	0,0036	0,0038	0,0026
3	3,6268	3,8185	3,1760	0,0930	2,0443	2,0384
4	0,0026	0,0046	0,0035	0,0034	0,0020	0,0025
5	1,4091	1,6301	1,3822	2,5495	2,0938	1,2522
6	0,0017	0,0027	0,0022	0,0028	0,0017	0,0017
7	0,9197	1,1873	0,9395	0,5854	0,7174	0,8141
8	0,0006	0,0017	0,0013	0,0012	0,0007	0,0016
9	0,1813	0,2051	0,1538	0,0435	0,4137	0,2482
10	0,0008	0,0008	0,0006	0,0004	0,0010	0,0004
11	0,3061	0,2408	0,2627	0,3934	0,1601	0,2206
12	0,0003	0,0004	0,0004	0,0006	0,0008	0,0005
13	0,1464	0,3247	0,2417	0,1736	0,2441	0,1942
14	0,0005	0,0007	0,0004	0,0008	0,0008	0,0005
15	0,0790	0,0807	0,0475	0,0158	0,0301	0,0766
16	0,0009	0,0003	0,0005	0,0004	0,0002	0,0008
17	0,1354	0,1110	0,1243	0,1387	0,1396	0,0710
18	0,0010	0,0005	0,0010	0,0006	0,0007	0,0004
19	0,0751	0,1650	0,1270	0,1036	0,0915	0,0719
20	0,0006	0,0005	0,0007	0,0004	0,0004	0,0006
21	0,0446	0,0370	0,0058	0,0211	0,0585	0,0234
22	0,0002	0,0007	0,0005	0,0002	0,0003	0,0003
23	0,0621	0,0610	0,0741	0,0588	0,0461	0,0603
24	0,0004	0,0002	0,0001	0,0004	0,0003	0,0003
25	0,0442	0,0987	0,0722	0,0730	0,0612	0,0349
I_{Total} (A)	11,056	10,389	10,579	10,982	10,703	10,933
THD_i	39,04	45,88	36,38	24,93	29,88	23,64
F_{HL}	2,830	3,756	2,841	2,750	2,780	2,044
F_{RL}	1,9486	2,3883	1,9206	1,8259	1,8624	1,5185

Tabela 20 - Correntes máximas teóricas e medidas em pu e os erros entre elas.

Cargas	C2	C3	C4	C6	C7	C8
$I_{Tmax(pu)} - F_{HL}$	0,9325	0,8541	0,8837	0,9308	0,8511	0,8816
$I_{Mmax(pu)} - F_{HL}$	0,9320	0,9025	0,9316	0,9347	0,9337	0,9594
Erro (%)	0,005	-5,363	-5,142	-0,417	-8,846	-8,109
$I_{Tmax(pu)} - F_{RL}$	0,9572	0,8925	0,9207	0,9597	0,8975	0,9234
$I_{Mmax(pu)} - F_{RL}$	0,9563	0,9354	0,9576	0,9621	0,9604	0,9764
Erro (%)	0,09	-4,58	-3,85	-0,25	-6,54	-5,43

Pela Tabela 20, observa-se que pela utilização do Fator de Perda Real (F_{RL}) faz com que os erros entre as correntes máximas teóricas e medidas diminuísse. O maior erro encontrado é de -6,54% para a carga C7 (F_{RL}). Esta diminuição do erro no planejamento do

dimensionamento de transformador indica uma melhora do método teórico apresentado (superposição de harmônicas de mesma ordem). A Figura 42 apresenta as correntes máximas ($I_{max(pu)}$) em pu teóricas e medidas em função do F_{HL} e F_{RL} para o transformador T2.

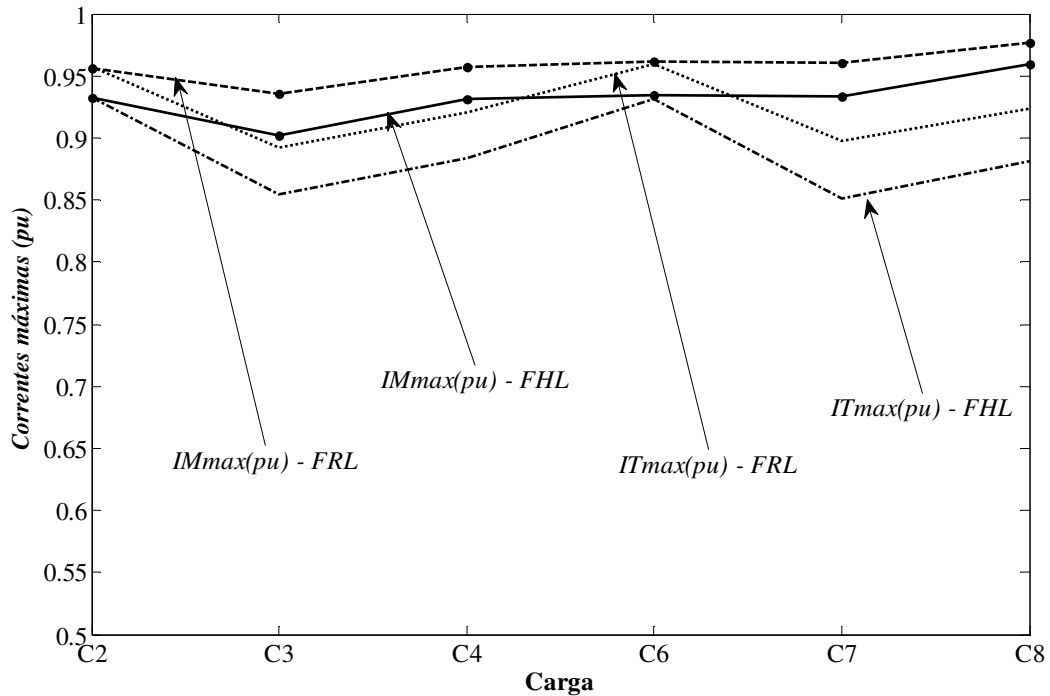


Figura 42 – Correntes máximas em pu ($I_{Tmax(pu)}$ e $I_{Mmax(pu)}$).

Na Figura 42 observa-se que as correntes máximas do transformador para as medições diretas das cargas, foram maiores que as correntes máximas obtidas em relação ao cálculo teórico (tanto para o F_{HL} quanto para o F_{RL}). Isto se deve ao fato de que as correntes harmônicas de mesma ordem de cada carga individual podem não estarem em fase. Assim, tem-se uma margem maior de segurança (no cálculo da potência máxima) para o planejamento do dimensionamento do transformador, já que estas correntes máximas são calculadas supondo-se que não haja variação da perda no núcleo entre a situação de carga linear nominal para outra condição, a de cargas combinadas lineares e não-lineares. É possível observar que as correntes máximas obtidas com o uso do F_{RL} são maiores que as obtidas com o F_{HL} e um pouco menores que as correntes máximas medidas, indicando que o novo fator proposto (F_{RL}) não está sobre dimensionando o transformador.

Para efeito de comparação foi feita uma nova análise para outros valores de perda por correntes parasitas nos enrolamentos para condição de carga linear nominal (P_{EC-R}). Tomou-se uma faixa ampla entre 1% e 20% que poderiam representar uma gama enorme de

transformadores de acordo com seus fabricantes. Na verdade, para um bom projeto de transformador, o valor de P_{EC-R} não poderia ultrapassar 10% da perda no cobre para carga linear nominal.

As Figuras 43(a e b) exibem o comportamento das correntes máximas do transformador $T2$ em pu em função de P_{EC-R} para diversos valores de F_{HL} e F_{RL} , respectivamente.

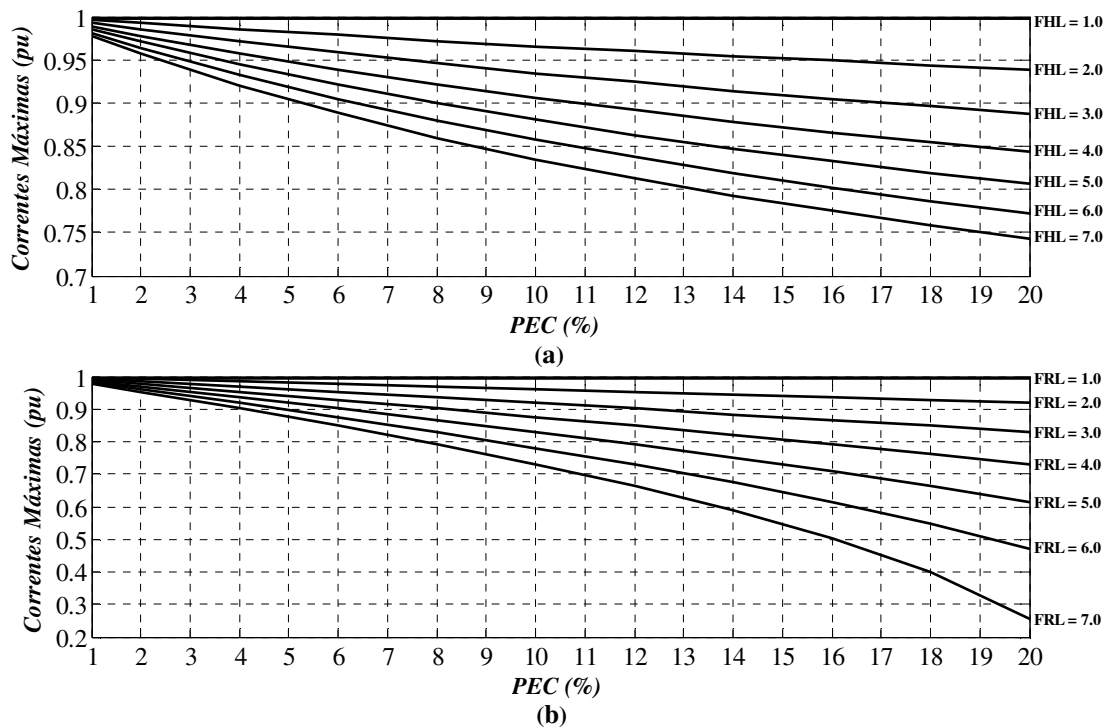


Figura 43 – Corrente máxima em pu em função da variação de P_{EC-R} , de (a) F_{HL} e de (b) F_{RL} .

Pela Figura 43 observa-se que à medida que P_{EC-R} , F_{HL} e F_{RL} aumentam, a corrente máxima suportável pelo transformador diminui, indicando a importância destes fatores no dimensionamento de transformadores. Nota-se que com o uso do F_{RL} as correntes máximas obtidas são menores que as obtidas com a utilização do F_{HL} para os mesmos valores de P_{EC-R} adotados. Estes gráficos poderiam ser utilizados numa tentativa de prever (de maneira mais rápida) a compra de um transformador conhecendo-se as cargas individuais ou ainda, diagnosticar a operacionalidade de transformador (conhecendo-se a corrente total e o valor da P_{EC-R}).

7. CONCLUSÃO

Esta pesquisa possibilita estabelecer uma comparação entre as perdas medidas e as calculadas através dos quatro métodos apresentados (modelo *Linear*, modelo *T*, F_{HL} e *Fator-K*) para dimensionamento de transformadores do tipo seco. São utilizados diversos tipos de cargas equilibradas, lineares e não-lineares, permitindo a verificação das perdas para diferentes conteúdos harmônicos nas correntes de carga. As potências utilizadas são sempre próximas às nominais dos transformadores, uma vez que as recomendações internacionais demonstram uma preocupação com o sobreaquecimento do transformador quando supre cargas não-lineares. As tensões aplicadas à configuração *back-to-back* de dois transformadores trifásicos $T1$ e $T2$ são praticamente senoidais, entretanto as distorções na forma de onda em algumas das correntes de carga provocam também distorções nas formas de onda das tensões, principalmente do transformador conectado à carga ($T2$).

Os parâmetros para os modelos L e T dos transformadores são obtidos através dos ensaios de resistências dos enrolamentos em dc, do ensaio em vazio e do ensaio em curto-circuito. As medições de tensões e de correntes, bem como o tratamento dos dados são no domínio do tempo, pela utilização de transdutores de tensão e de corrente de alta precisão e programação em LabVIEW.

Com o transformador $T2$ em vazio (configuração *back-to-back*), os valores das perdas em vazio obtidos pelo método *Temporal* estão próximos dos obtidos através dos ensaios em vazio tradicional. As diferenças percentuais são de 0,83% ($T1$) e 1,50% ($T2$).

Vários tipos de cargas são utilizados para a pesquisa. Para cada uma delas, o software LabVIEW implementado mede as tensões e as correntes e a partir daí determina os espectros harmônicos destas variáveis, as distorções harmônicas totais (THD), os fatores de multiplicação (F_{HL} e *Fator K*), as perdas, as potências nominais depreciadas e os rendimentos dos transformadores.

Observa-se que à medida que o fator de potência aumenta o THD_i e a corrente de neutro diminuem. A carga C5 apresenta o menor fator de potência (0,845) e maiores corrente de neutro (8,75 A) e THD_i (50,16%). As cargas C6 e C9 não possuem corrente de neutro.

Para carga linear, os valores das perdas (nos núcleos e nos enrolamentos dos dois transformadores) obtidas pelos diferentes métodos são próximos entre si, uma vez que isto é o ponto de partida para o cálculo das perdas adicionais relativas às cargas não-lineares.

As correntes das cargas C6 e C9 apresentam componentes harmônicas ímpares não múltiplas de três. Estas harmônicas provocam também o surgimento de componentes harmônicas de tensão, porém esta distorção é pequena. Para estas cargas, as formas de onda de corrente nos dois transformadores são praticamente idênticas.

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos é maior quando há mais componentes harmônicas na corrente de carga. Porém, comparando-se as curvas de perdas nos enrolamentos pelo método *Temporal* em relação aos outros métodos referenciados, verifica-se que este aumento das perdas é menor do que o previsto por estes métodos. A maior diferença é 220% para a carga C9, pelo método do *Fator K*.

As curvas de perdas no núcleo para os métodos *Linear* e *Fator-K* se sobrepõem e são constantes, uma vez que ambos ignoram a variação da perda no núcleo devido às frequências harmônicas da corrente de carga. A curva de perdas no núcleo obtida pelo método do F_{HL} está acima da curva do método *Temporal* para a maioria das cargas. Para as cargas C1 e C8 a perda obtida pelo método do F_{HL} é menor do que a do método *Temporal*. A maior diferença é 23,3% para a carga C5, pelo método do F_{HL} .

Para a conexão *back-to-back* dos dois transformadores ($T1$ e $T2$) e considerando-se os mesmos representados pelo modelo T , as tensões de magnetização são maiores que as nominais destes transformadores, tendo como consequência maiores perdas nos núcleos (dependem do quadrado da tensão).

Em relação às perdas totais calculadas pelos vários métodos para carga linear (C1), o maior erro encontrado (-1,24%) está entre o método *Linear* e o *Temporal* (referentes ao transformador $T2$). Para as cargas não-lineares o maior erro encontrado para as perdas totais está entre o método *Temporal* e o F_{HL} (transformador $T2$ e carga C9) e vale 18,6%. Neste tipo de carga não há corrente de neutro, ou seja, ausência de terceiro harmônico e seus múltiplos. As curvas de perdas totais para os métodos F_{HL} e *Fator K* são próximas entre si e ambas sobre dimensionam as perdas no transformador, quando alimentam cargas não-lineares.

O cálculo da potência máxima que o transformador $T2$ deve suprir (potência nominal depreciada) que mais se aproxima do método *Temporal* é o realizado através do *Fator-K*. Na verdade, a potência nominal depreciada calculada pelo *Fator-K* e pelo Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) sugerem a uma utilização de potências menores que a permitida pelo método *Temporal* (referência).

Quanto maior for a Distorção Harmônica Total da corrente da carga, maior será a perda em transformador. Porém, o aumento dessa perda pelo método *Temporal* não é igual ao previsto pelos métodos do *Fator-K* e do F_{HL} , pois estes dois últimos métodos sobre dimensionam as perdas para algumas situações, podendo levar um projetista a especificar um transformador maior que o necessário e, para outras situações, sub dimensionam podendo levar o transformador a um sobre aquecimento e prejudicar a isolamento e a sua vida útil.

Para obter-se uma melhor aproximação das perdas para o dimensionamento de transformadores suprindo cargas não-lineares foi proposto um novo fator para o cálculo das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos que é chamado Fator de Perda Real (F_{RL}) e também, outro fator para o cálculo das perdas fora dos enrolamentos que é chamado Fator de Perda Real Fora dos Enrolamentos (F_{RL-STR}).

Observa-se que o fator proposto (F_{RL}) apresenta perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) menores que os fatores utilizados internacionalmente (F_{HL} e *Fator K*), assim sendo o novo fator proposto não está sobre dimensionando o transformador para estas cargas analisadas. As perdas no núcleo (P_{NL}) obtidas com o fator proposto (F_{RL-STR}) apresentam valores superiores às perdas no núcleo calculadas pelo método do F_{HL} . A perda no núcleo calculada através dos métodos *Linear* e *Fator K* são constantes. Verifica-se também, que a perda total no transformador $T2$ pela utilização do fator proposto (F_{RL}) é maior que a perda total obtida quando se faz uso dos métodos *Temporal* e *Linear* para todas as cargas e maior em relação ao *Fator K* para maioria das cargas analisadas, isto se deve principalmente ao sobre dimensionamento da perda no núcleo obtida com F_{RL-STR} . O Fator de Perda Real Fora dos Enrolamentos (F_{RL-STR}) prejudica o modelo apresentado, pois o expoente referente ao pior caso encontrado ($y=1,0$) para a carga C8, faz com que as perdas no núcleo apresentem valores elevados para maioria das cargas o que não retrata a realidade, ou seja, não condiz com as perdas apresentadas pelo modelo T .

Com a análise das perdas no núcleo obtidas com a utilização do método *Temporal* foi proposta uma nova perda no núcleo, calculada como sendo superior em 17% da perda no núcleo obtida através do modelo *Linear* e do *Fator K*. Esta perda para estes dois fatores não apresentam variações quando submetidas às cargas não-lineares. Portanto, esta nova perda no núcleo ($1,17.P_{NL-R}$) substitui a perda encontrada através do método proposto F_{RL-STR} . Com a nova abordagem de perda no núcleo a perda total calculada com o novo fator (F_{RL}) é superior a perda obtida com o método *Temporal* e inferior aquelas apresentadas com a utilização dos

métodos referenciados (*Fator K* e F_{HL}). Isto evidencia a eficácia do modelo sugerido no dimensionamento do transformador, com sobre dimensionamento mínimo do mesmo.

Para o planejamento do dimensionamento de transformador desenvolveu-se neste trabalho uma modelagem matemática onde se considera que as componentes harmônicas de mesma ordem das correntes referentes às cargas não-lineares estejam em fase. Desta forma, foram analisadas várias combinações de cargas lineares e não-lineares para obtenção da corrente total de forma teórica e prática. Observa-se que a utilização do Fator de Perda Real (F_{RL}) fez com que os erros entre as correntes máximas teóricas e medidas diminuíssem em relação aquelas encontradas com o F_{HL} . O maior erro encontrado foi para a carga C7 (-6,54%). Esta diminuição do erro indica uma melhora do método teórico sugerido. As correntes máximas calculadas para o transformador T2 nas medições diretas das cargas foram maiores que as correntes máximas obtidas em relação ao cálculo teórico, tanto para o F_{HL} quanto para o F_{RL} . Isto se deve ao fato de que as componentes harmônicas de mesma ordem das correntes das cargas individuais podem não estarem em fase. Assim, tem-se uma margem maior de segurança para o planejamento do dimensionamento do transformador, já que estas correntes máximas são calculadas supondo-se que não haja variação da perda no núcleo para uma situação de carga linear em relação a uma situação de cargas combinadas lineares e não-lineares. As correntes máximas obtidas com o uso do F_{RL} são maiores que as obtidas com o F_{HL} , indicando que o novo fator proposto (F_{RL}) não está sobre dimensionando o transformador.

Sugere-se para trabalhos futuros criação de um fator que permita também dimensionar os transformadores imersos em óleo de forma mais coerente com a realidade. Também se sugere um estudo dos pontos de maior aquecimento no transformador e a influência das cargas não-lineares nestes pontos.

ANEXO A – ARTIGOS PUBLICADOS

SANTOS, C. R.; LISITA, L. R.; MACHADO, P. C. M. Dimensionamento de Transformador Sob Cargas Não-Lineares. VIII Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão, Goiânia – Go, 2011.

SANTOS, C. R.; LISITA, L. R.; MACHADO, P. C. M. Planejando o Dimensionamento de Transformador Operando com Cargas Lineares e Não-Lineares. IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Cuiabá – MT, 2011.

PINHEIRO NETO, D.; SANTOS, C. R.; LISITA, L. R.; MACHADO, P. C. M.; NERYS, J. W.L. Comparação do Desempenho de Medidores Trifásicos de Energia Elétrica dos Tipos Eletrônico e Indução na Presença de Harmônicos. IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Cuiabá – MT, 2011.

SANTOS, C. R.; LISITA, L. R.; MACHADO, P. C. M. Medição de Perdas em Transformadores Trifásicos do Tipo Seco Suprindo Cargas Não-Lineares. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia – GO, 2012.

PINHEIRO NETO, D.; SANTOS, C. R.; LISITA, L. R.; MACHADO, P. C. M. Efeitos da Distorção Harmônica em Medidores de Energia Elétrica do Tipo Indução. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia – GO, 2012.

ANEXO B – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ)

O sistema de medição utilizado neste trabalho é mostrado na Figura B1 e é composto por quatro partes básicas. A primeira parte são os transdutores que detectam os fenômenos físicos e produzem sinais elétricos de intensidade proporcional à grandeza detectada. Estes sinais devem ser padronizados para o limite de entrada do dispositivo DAQ [20]. Estes transdutores são de malha fechada do tipo C, que compensam a própria corrente de magnetização, 500V/10V para os transdutores de tensões e 50A/5V para os transdutores de correntes. Os transdutores de tensão possuem uma largura de faixa de 0 a 300 kHz, enquanto dos transdutores de corrente a largura de faixa é de 0 a 500 kHz.

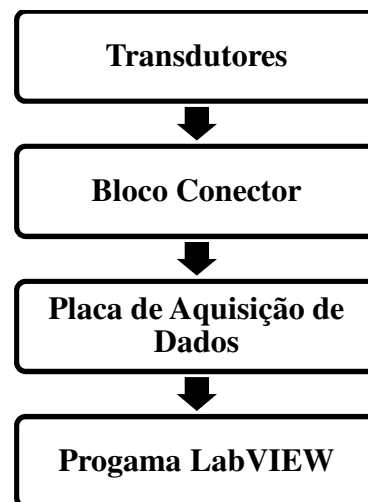


Figura B 1 – Sistema de medição utilizado.

A segunda parte, após os transdutores, o sinal passa por um bloco conector blindado de 68 pinos SCB – 68 (68 – Pin Shielded Connector Block). O SCB-68 é uma placa blindada com 68-pinos da National Instruments. Quando se tem disponível o SCB - 68 com placas Series AT – MIO – 16X ou MIO – 16E, podem-se usar os 16 terminais para conectar sinais para as 16 entradas analógicas.

A terceira parte, após o bloco conector, o sinal é enviado para uma placa de aquisição de dados (Hardware DAQ – PCI-MIO-16E-1), através de um cabo blindado.

A última parte é o sistema de aquisição de dados. Neste trabalho o hardware DAQ utilizado pertence à série de equipamentos PCI-E da National Instruments, modelo PCI-MIO-16E-1. Os equipamentos desta série possuem um conversor Analógico-Digital (ADCs) de 12 bits com 16 entradas analógicas e um conversor Digital-Analógico (DACs) com 12 bits.

Outro componente do sistema de aquisição de dados é o software. É através dele que são realizados todos os cálculos e a exibição dos dados adquiridos. A maioria das aplicações DAQ utiliza driver software. Um driver software é a parte do software que programa diretamente os registros do hardware DAQ, gerenciando a operação e a integração com os recursos do computador, como interrupções do processador, DMA e memória. Um driver software oculta os níveis baixos e detalhes de programação do hardware, munindo o usuário com uma interface prática e amigável.

O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que usa ícones no lugar de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW usa uma programação tipo fluxo de dados. Este fluxo determina a execução. O software integra os transdutores, bloco conector e hardware DAQ em um completo e funcional sistema de aquisição de dados [20].

ANEXO C – DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS

As cargas alimentadas pelos transformadores *T1* e *T2* devem ser dimensionadas de forma que estes transformadores alimentem potências próximas à nominal. Os valores das variáveis e parâmetros obtidos pelos cálculos são valores bem próximos dos nominais.

Para a carga linear e nominal (C1) são utilizadas resistências que podem ser ligadas em delta ou em estrela. Neste trabalho são utilizadas conexões em estrela, conforme Figura C1.

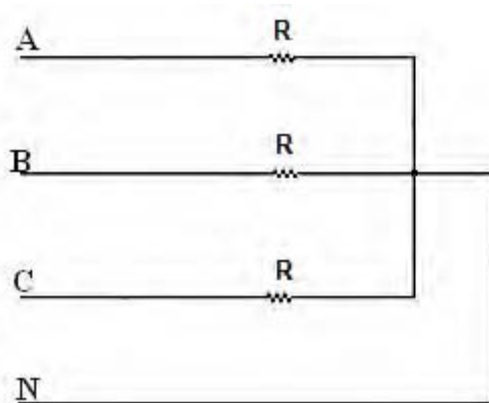


Figura C 1 – Carga linear nominal trifásica em Y com fator de potência unitário.

O cálculo do valor das resistências para carga linear nominal por fase (R_{Lf}) pode ser realizado através da equação (C.6.1).

$$R_{Lf} = 3 \cdot \frac{V_{Rf}^2}{P} \quad (\text{C.6.1})$$

Onde V_{Rf} é a tensão nominal de fase do transformador para o lado de tensão inferior.

A carga C2 é uma composição de carga linear e retificadores monofásicos, conforme a Figura C2. Nesta configuração a carga linear representa cerca de 30% do carregamento, os 70% restantes é devido aos retificadores monofásicos.

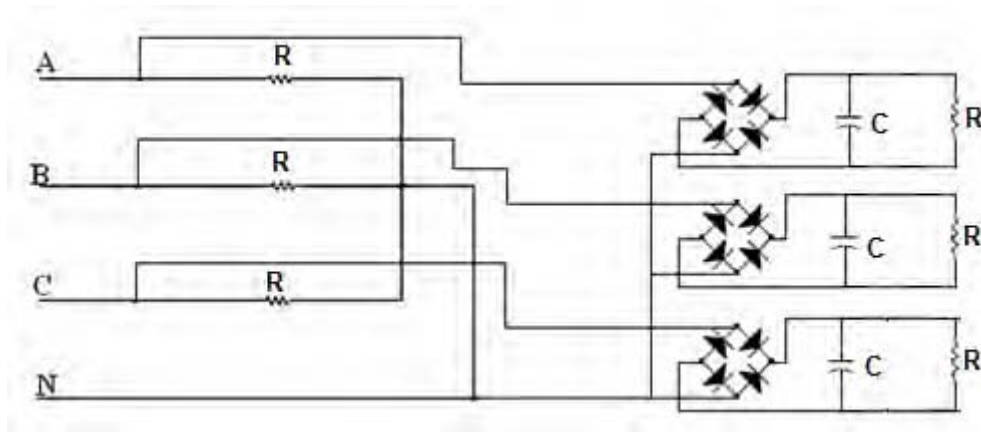


Figura C 2 – Esquema de ligação para carga C2.

A carga C3 é uma composição de lâmpadas eletrônicas, computadores e retificadores monofásicos, conforme a Figura C3. Nesta configuração as lâmpadas eletrônicas e os computadores representam cerca de 30% do carregamento, os 70% restantes é devido aos retificadores monofásicos.

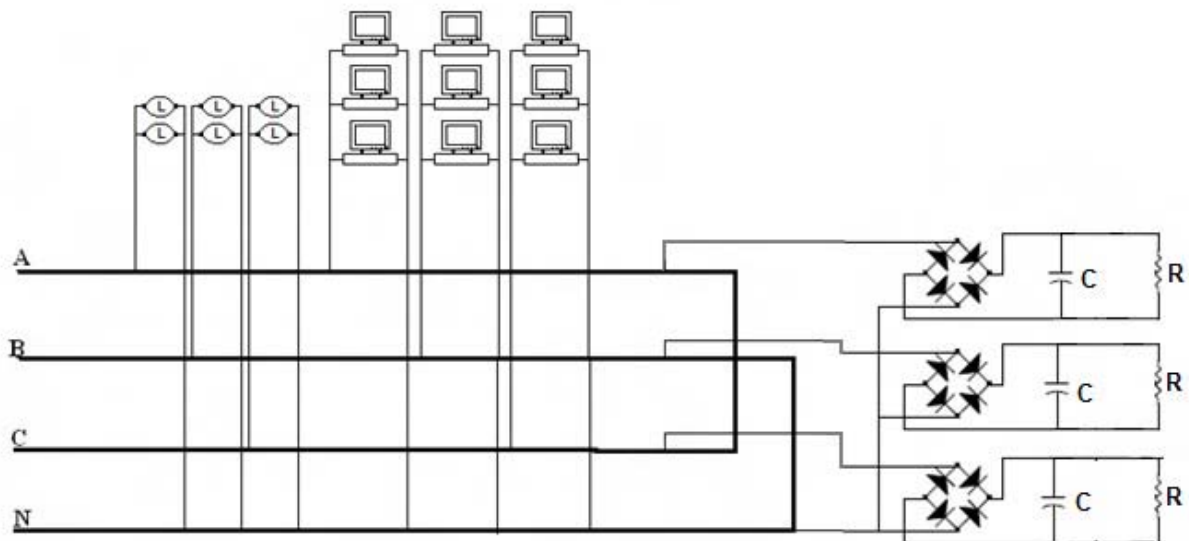


Figura C 3 – Esquema de ligação para carga C3.

A carga C4 é composta de lâmpadas eletrônicas, computadores, carga linear e retificadores monofásicos, conforme a Figura C4. Nesta configuração os retificadores monofásicos representam 40% do carregamento, as lâmpadas eletrônicas e os computadores representam cerca de 30% e a carga linear os 30% restantes.

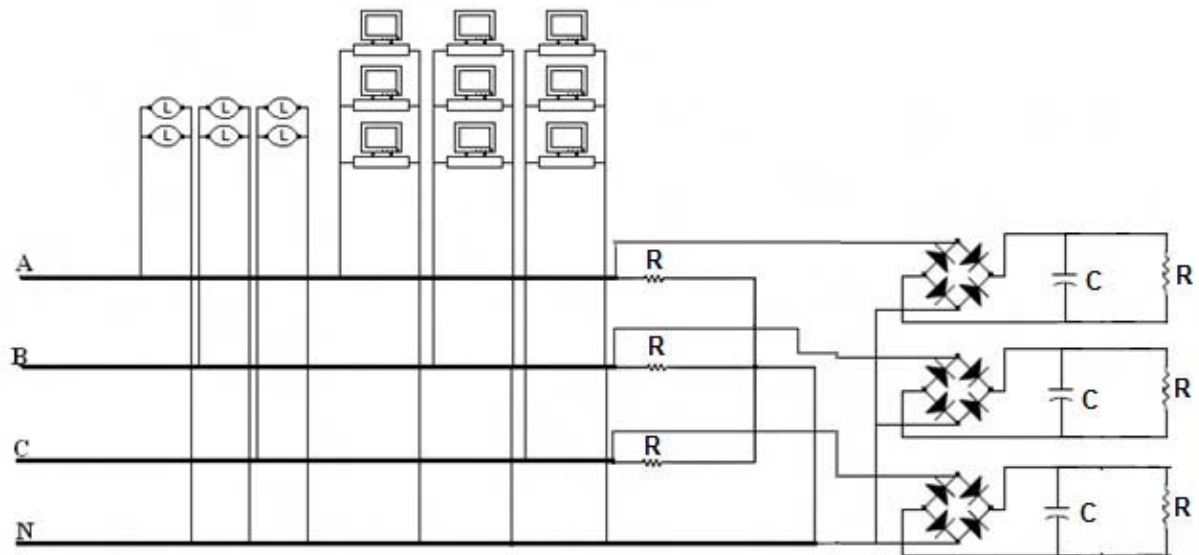


Figura C 4 – Esquema de ligação para a carga C4.

A carga C5 é composta por retificadores monofásicos conforme a Figura C5.

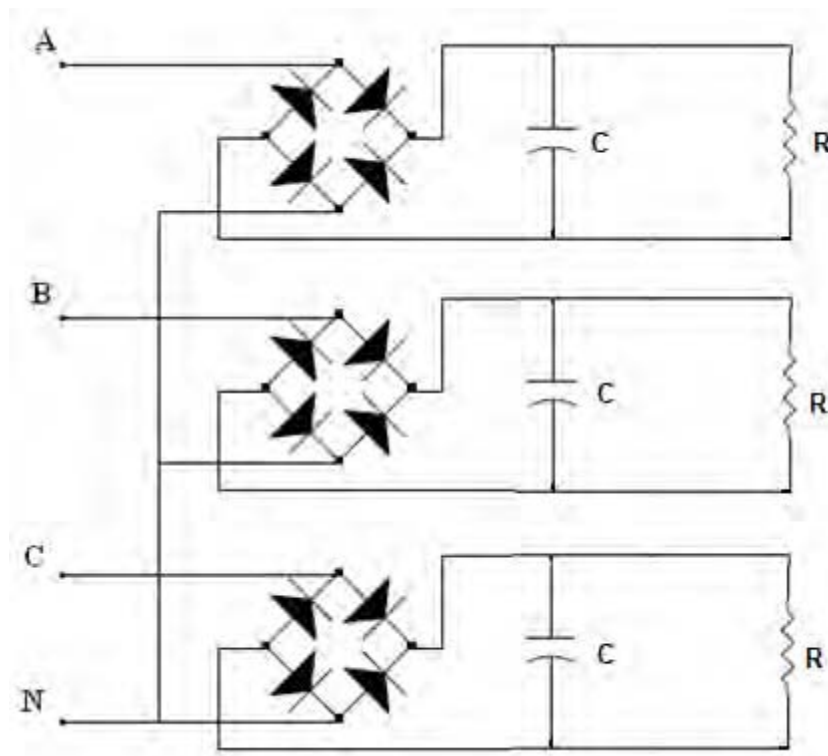


Figura C 5 – Esquema de ligação para a carga C5.

A carga C6 é uma composição de carga linear e retificador trifásico, conforme a Figura C6. Nesta configuração a carga linear representa cerca de 30% do carregamento, os 70% restantes é devido ao retificador trifásico.

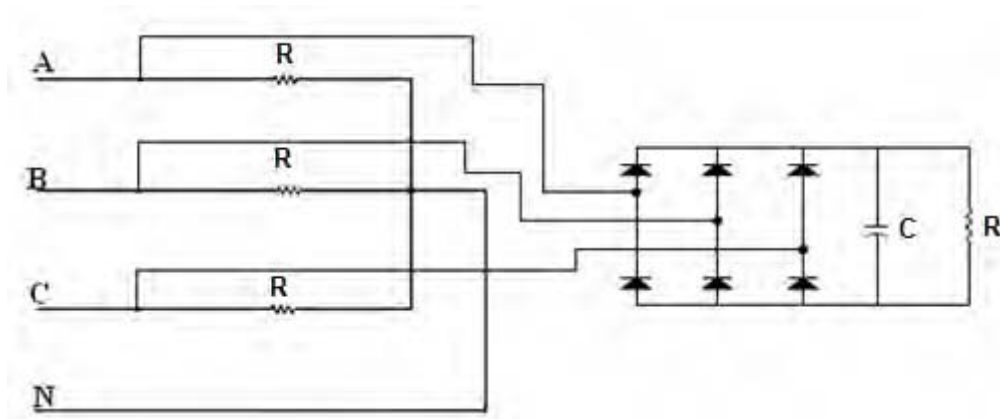


Figura C 6 – Esquema de ligação para carga C6.

A carga C7 é composta de lâmpadas eletrônicas, computadores e retificador trifásico, conforme a Figura C7. Nesta configuração as lâmpadas eletrônicas e os computadores representam cerca de 30% do carregamento, os 70% restantes é devido ao retificador trifásico.

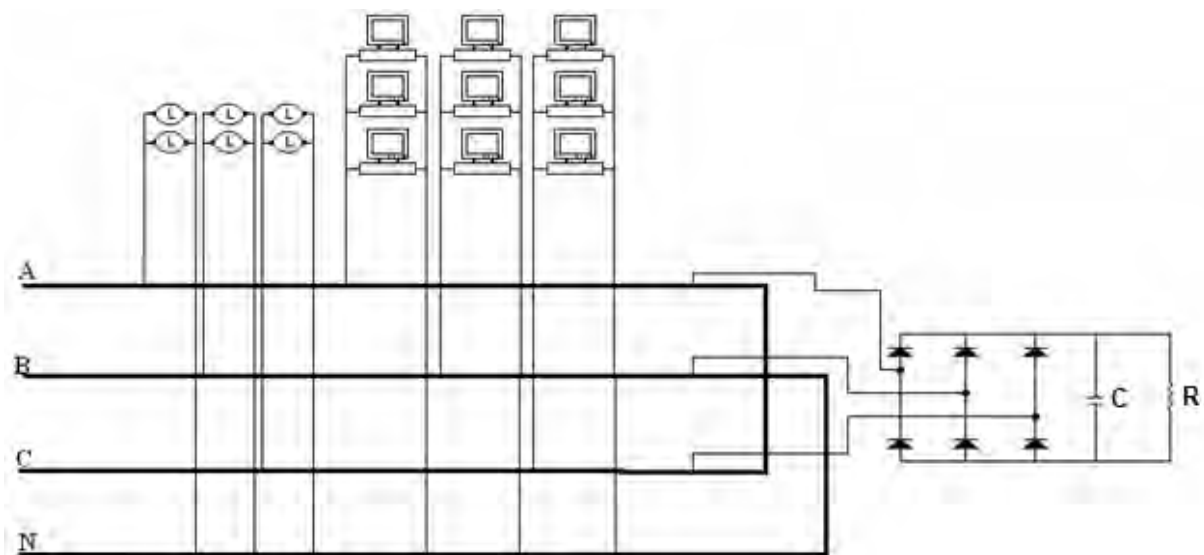


Figura C 7 – Esquema de ligação para a carga C7.

A carga C8 é composta de lâmpadas eletrônicas, computadores, carga linear e retificador trifásico, conforme a Figura C8. Nesta configuração o retificador trifásico representa 40% do carregamento, as lâmpadas eletrônicas e os computadores representam cerca de 30% e a carga linear os 30% restantes.

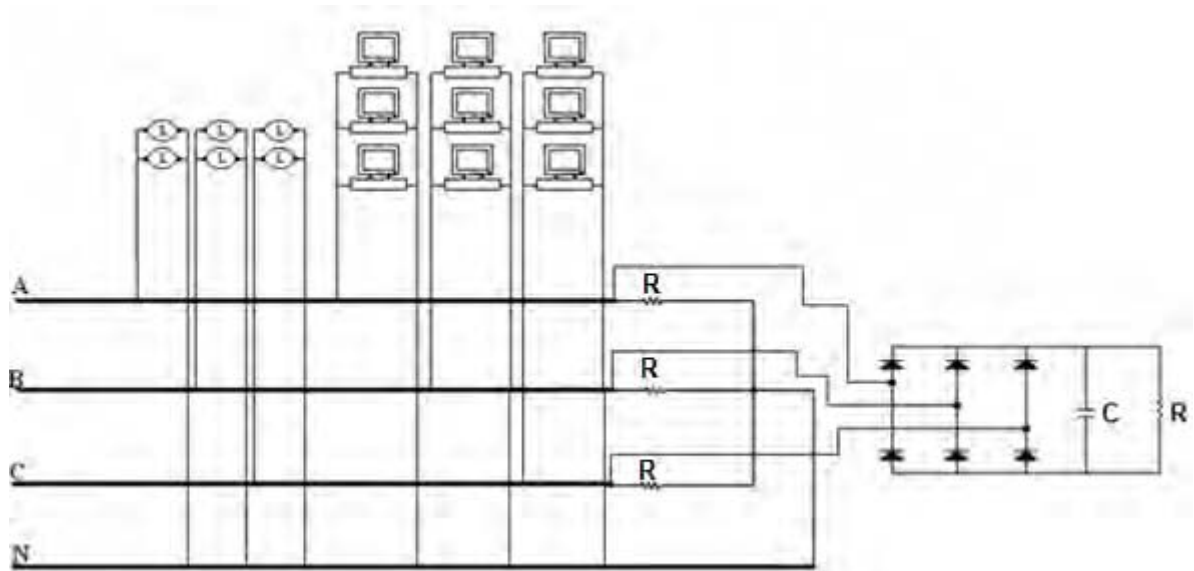


Figura C 8 – Esquema de ligação para carga C8.

A carga C9 é composta por um retificador trifásico conforme a Figura C9.

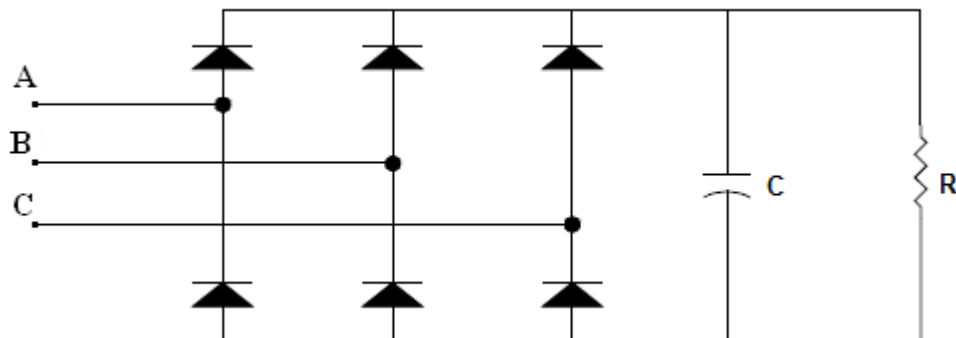


Figura C 9 – Esquema de ligação para carga C9.

O cálculo das resistências de carga conectadas aos retificadores é realizado de forma que a potência aparente de entrada do retificador (potência fornecida pelo transformador) seja próxima à nominal. De acordo com a necessidade de composição de cada carga é utilizado 30%, 70% ou 100% do valor de resistência encontrado.

Através da teoria de retificadores [24], pode-se dimensionar a resistência de carga através dos valores de tensão e de corrente de entrada, que para este trabalho são os nominais. Este cálculo é realizado através da equação (C.6.2), para os retificadores monofásicos do tipo ponte (onda completa) e pela equação (C.6.3), para retificador do tipo ponte com seis diodos

(retificador trifásico de onda completa). Nestas equações o valor nominal da tensão de fase é de 220 V.

$$R_{monof} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{I_R} = \frac{311,12}{I_R} \quad (\text{C.6.2})$$

$$R_{trif} = \frac{0,7804 \cdot 220 \cdot \sqrt{2} \sqrt{3}}{I_R} = \frac{420,55}{I_R} \quad (\text{C.6.3})$$

As resistências obtidas para realização da pesquisa estão apresentadas na Tabela 21. As capacitâncias utilizadas são respectivamente 430 μF para os retificadores monofásicos e de 1080 μF para o retificador trifásico.

Tabela 21 – Resistências obtidas para realização dos ensaios.

Cargas	Resistências utilizadas - R (Ω)	Resistências obtidas - R (Ω)
Carga linear 30%	100	100
Carga linear 100%	63//63//400	30
Retificador monofásico 30%	63+63	126
Retificador monofásico 70%	8+63	71
Retificador monofásico 100%	13+63//63	45
Retificador trifásico 30%	63+79	142
Retificador trifásico 70%	14+63	77
Retificador trifásico 100%	63	63

ANEXO D – FOTOS DO SISTEMA IMPLEMENTADO

A Figura D1 mostra o sistema de aquisição de dados utilizado no trabalho: transdutores e computador (LabVIEW).



Figura D 1– Sistema de aquisição de dados.

A Figura D2 mostra o quadro de cargas (lado direito da foto) utilizado no trabalho.



Figura D 2 – Quadro de cargas

A Figura D3 exibe os dois transformadores do tipo seco conectados na configuração *back-to-back*. A Figura D4 ilustra o varivolt utilizado no trabalho.



Figura D 3 – Transformadores do tipo seco conectados em back-to-back.



Figura D 4 – Varivolt utilizado nos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFONSO, J. L.; & MARTINS, J. S. *Qualidade de energia elétrica na indústria*. 2003. EUVEO.
- [2] PORT, R. J. Uma Análise Aplicada Sobre Medição e Faturamento de Potências e Energias Não Ativas. 2006. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [3] DALILA, M.S.; KHALID, M. N.; MD SHAH M. Distribution Transformer Losses Evaluation under Non-Linear Load. Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities, p. 1-6, September 2009.
- [4] KLINE, A. D. Transformers in SCR Converter Circuits, in Conf. Rec. IEEE Ind. Applicat. Soc., 1981 Annu. Meeting, p. 456-458.
- [5] SHELDON, P. K.; IVEY, C. L. Application, Design and Rating of Transformer Containing Harmonic Currents, in Conf. Rec. 1990 IEEE Pulp, Paper Ind. Tech. Conf., pp. 19-31.
- [6] IEEE Std C57.110-2008. Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. IEEE, New York, USA, February 2008.
- [7] FUCHS, E. F.; ROESLER, D. J.; MASOUM, M. A. S. Are Harmonic Recommendations According to IEEE and IEC Too Restrictive? IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 4, p. 1775-1786, October 2004.
- [8] LISITA, L. R. Determinação de Perdas, Eficiência e Potência Máxima de Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares. 2004. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.

- [9] GUIMARÃES, M. B. Comparação entre Métodos de Cálculo de Perdas em Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares. 2006. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- [10] OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. Transformadores: Teoria e Ensaios, São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- [11] DEL TORO, V. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
- [12] MAKAROV, S. N.; EMANUEL, A. E. Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power – Proceedings, v. 1, n. 1, p. 87-90, October 2000.
- [13] LISITA, L. R.; NERYS, J. W. L.; BATISTA, A. J.; OLIVEIRA, A. M.; MOREIRA, A. C. Perda Adicional no Núcleo em Transformadores Trifásicos Alimentando Cargas Não-Lineares. IEEE Latino Americana, Dezembro 2003.
- [14] SADATI, S. B.; TAHANI, A.; JAFARI, M.; DARGAHI, M. Derating of Transformers under Non-sinusoidal Loads. Eleventh International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. OPTIM 2008, p. 263-268, August 2008.
- [15] VECCHIO, R. M. D.; POULIN, B.; FEGHALI, T. P.; SHAH, D. M.; AHUJA, R. Transformers Design Principles, USA: CRC Press, 2002.
- [16] FUCHS, E. F.; YILDIRIM, D.; GRADY, W. M. Measurement of eddy-current loss coefficient PEC-R, derating of single phase transformers, and comparison with K-factor approach. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, p. 148-154, January 2000.
- [17] UL 1561, Dry-Type General Purpose and Power Transformer, Underwriters Laboratory, Inc., Northbrook-IL, USA, 1994.

- [18] UL 1562, Transformers, Distribution, Dry-Type – Over 600 Volts, Underwriters Laboratory, Inc., Northbrook-IL, USA, 1994.
- [19] IEEE Std 100-1977. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, 2nd Ed., Wiley-Interscience, 1977.
- [20] MOREIRA, A. C.; LISITA, L. R.; NERYS, J. W. L., BATISTA, A. J. Measurement and Treatment of Signals Using Labview. VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Joinville – SC, v. 1, 2004.
- [21] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasil 2012.
- [22] CAMARGO, J. M. Análise do Desempenho Térmico e Vida Útil de Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares. Dissertação de mestrado. 2005. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.
- [23] IEEE 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE, New York, USA, February 1992.
- [24] RASHID, M. H. Eletrônica de potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações, São Paulo-SP: Makron Books, 2002.