

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO



**Determinação de Perdas, Eficiência e Potência Máxima de
Transformadores de Distribuição Alimentando Cargas Não-
Lineares**

LUIZ ROBERTO LISITA

Orientador: Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys

Co-orientador: Prof. Dr. Adalberto José Batista

Goiânia

2004

LUIZ ROBERTO LISITA

**DETERMINAÇÃO DE PERDAS, EFICIÊNCIA E POTÊNCIA
MÁXIMA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO
ALIMENTANDO CARGAS NÃO-LINEARES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
em Engenharia Elétrica 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. José Wilson Lima Nerys

Co-orientador: Prof. Dr. Adalberto José Batista

Goiânia

2004

LUIZ ROBERTO LISITA

**DETERMINAÇÃO DE PERDAS, EFICIÊNCIA E POTÊNCIA
MÁXIMA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO
ALIMENTANDO CARGAS NÃO-LINEARES**

Dissertação defendida e aprovado em 10 de fevereiro de 2004, pela
Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys
Presidente da Banca-Orientador (UFG)

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira
Examinador externo (UFU)

Prof. Dr. Adalberto José Batista
Co-orientador (UFG)

Prof. Dr. Antônio Melo de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de trabalho e pesquisa. Agradeço a Companhia Energética de Goiás pelo financiamento da maior parte deste trabalho. Agradeço ao professor Adalberto José Batista por idealizar e elaborar este projeto de pesquisa. Agradeço aos professores Antônio Melo de Oliveira e Paulo César Miranda Machado pelas contribuições e incentivos. Agradeço a meu orientador José Wilson Lima Nerys pela paciência, presteza e incentivo. Agradeço em especial ao bolsista e Engenheiro Eletricista Alexandre Cândido Moreira pelo auxílio na programação computacional deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FOTOS.....	11
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
RESUMO	20
ABSTRACT	21
1. INTRODUÇÃO	22
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
1.2. ESTADO DA ARTE.....	23
1.3. ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO	25
2. CLASSIFICAÇÃO DAS PERDAS EM TRANSFORMADORES	28
2.1. CONSIDERAÇÕES	28
2. PERDAS POR UNIDADE EM TRANSFORMADORES.....	29
2.3. EFEITOS DAS CORRENTES HARMÔNICAS NAS DIVERSAS PERDAS DO TRANSFORMADOR	30
2.3.1. <i>Efeito da componente cc da corrente de carga.....</i>	31
2.3.2. <i>Efeito das correntes harmônicas sobre a perda no núcleo.....</i>	31
2.3.3. <i>Efeito das correntes harmônicas sobre a perda nos enrolamentos em cc.....</i>	32
2.3.4. <i>Efeito das correntes harmônicas na perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC})</i>	33
2.3.5. <i>Efeito das correntes harmônicas na P_{OSL}.....</i>	37
2.3.6. <i>Efeito da elevação de temperatura na superfície do óleo - ΔT_{op}</i>	38
2.4. FATOR DE PERDA HARMÔNICA (FHL) PARA CORRENTES PARASITAS EM ENROLAMENTOS E DEFINIÇÃO DO $FATOR-K$	39
2.5. FATOR DE PERDA HARMÔNICA PARA OUTRA PERDA ADICIONAL (P_{OSL}).....	41
2.6. DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)	42
2.7. CAPACIDADE EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR.....	43
3. MODELAGEM.....	44
3.1. CÁLCULO DAS POTÊNCIAS DE ENTRADA E DE SAÍDA PARA CADA TRANSFORMADOR	49
3.2. CÁLCULO DA PERDA NO NÚCLEO	50
3.3. CÁLCULO DA PERDA NO COBRE	52
3.4. CÁLCULO DAS PERDAS POR CORRENTES PARASITAS NOS ENROLAMENTOS (P_{EC}) PARA CADA TRANSFORMADOR	53

3.5.	CÁLCULO DO RENDIMENTO.....	54
3.6.	CÁLCULO DAS CORRENTES E POTÊNCIAS MÁXIMAS (I_{MAX} E S_{MAX}) OU <i>DERATING</i> 56	
3.7.	MEDIÇÕES INDIRETAS NAS PERDAS NO NÚCLEO E COBRE (MODELO L - REFERENCIADO)	58
3.8.	REDUÇÕES DE POTÊNCIAS.....	59
3.8.1.	<i>Deratings</i>	59
3.8.2.	<i>Redução de potencia aparente (RAPR)</i>	59
3.8.3.	<i>Capacidade de potência ativa (RPC)</i>	60
4.	SIMULAÇÃO PRÁTICA.....	61
4.1.	PRIMEIRA ETAPA -TRANSFORMADOR A VAZIO E CARGA LINEAR RESISTIVA NOMINAL	62
4.2.	SEGUNDA ETAPA – CARGA LINEAR INDUTIVA	63
4.3.	TERCEIRA ETAPA – CARGA NÃO-LINEAR EM PONTE CA/CC COMPOSTA POR SEIS DIODOS	68
4.4.	QUARTA ETAPA – CARGA NÃO-LINEAR COMPOSTA POR PONTE CA/CC A TRÊS DIODOS.....	77
4.5.	CORRENTE DE NEUTRO	88
5.	COMPARAÇÃO ENTRE AS PERDAS NO NÚCLEO E NO COBRE OBTIDAS ATRAVÉS DO MODELO ADOTADO E DO MODELO REFERENCIADO	90
6.	CONCLUSÃO	98
7.	APÊNDICES.....	101
A.	DADOS DOS TRANSFORMADORES	101
A.1.	<i>Dados de placa</i>	101
A.2.	<i>Indutância de dispersão (L_{ac})</i>	101
A.3.	<i>Resistência em corrente contínua (R_{dc})</i>	101
A.4.	<i>Correção da resistência cc em função da perda e temperatura..</i> 104	
B.	TRANSDUTORES UTILIZADOS E PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ).....	106
B.1.	<i>Precisão dos sensores</i>	107
B.2.	<i>Amostragem dos dados</i>	107
C.	PERDAS EM DOIS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CONECTADOS <i>BACK-TO-BACK</i> E POTÊNCIAS APARENTES MÁXIMAS (S_{1MAX} E S_{2MAX})	108
D.	FOTOGRAFIAS DO PROTÓTIPO.....	111
E.	PAINEL FRONTAL E DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA EM LABVIEW	115
F.	CONFIGURAÇÃO DAS CARGAS.....	117
8.	ARTIGOS SUBMETIDOS.....	119
9.	REFERÊNCIAS.....	120

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Configuração <i>back-to-back</i> de dois transformadores trifásicos <i>delta – y</i> alimentando carga não-linear e medições sendo realizadas pelos lados de baixa tensões.	25
Fig. 2. Campo eletromagnético produzido por correntes de carga em enrolamentos de transformador.	33
Fig. 3. Fluxos dispersos em transformadores.	34
Fig. 4. Configuração <i>back-to-back</i> por fase de dois transformadores - modelo L.....	46
Fig. 5. Configuração <i>back-to-back</i> por fase de dois transformadores - modelo T.....	47
Fig. 6. Perda no núcleo para os dois transformadores em função do fator de potência de entrada e saída.	65
Fig. 7. Perda no cobre para o transformador T_2 em função do fator de potência de saída.	66
Fig. 8. Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 em função do fator de potência de saída	66
Fig. 9. Rendimento para o transformador T_2 em função do fator de potência de saída	67
Fig. 10. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação ao fator de perda harmônica (FHL_2), com carga composta por ponte a seis diodos.	69
Fig. 11. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação ao fator de potência de saída (FP_{out}), em relação a carga composta por ponte a seis diodos.	70

Fig. 12. Perda no núcleo para o transformador T_2 em função da THD_{v2} , relativo a carga composta por ponte a seis diodos.....	70
Fig. 13. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação à distorção harmônica total de corrente (THD_{i2}), com carga composta por ponte a seis diodos.	71
Fig. 14. Perda no cobre para o transformador T_2 em relação a distorção harmônica total de corrente (THD_{i2}), com carga composta por ponte a seis diodos.	72
Fig. 15. Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 em relação à distorção harmônica total de corrente (THD_{i2}), com ponte a seis diodos.....	72
Fig. 16. Capacidade de potência ativa para o transformador T_2 em relação a distorção harmônica total de corrente (THD_{i2}), com ponte a seis diodos.	73
Fig. 17. Rendimento para o transformador T_2 em relação à distorção harmônica total de corrente (THD_{i2}), com ponte a seis diodos.....	74
Fig. 18. Corrente na fase c do primário do transformador T_1 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a seis diodos, com THD_{i1} igual a 40,4207 %.....	74
Fig. 19. Corrente na fase c do secundário do transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a seis diodos, com THD_{i2} igual a 40,8102%.....	75
Fig. 20. Tensão de entrada na fase c para o transformador T_1 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a três diodos, com THD_{v1} igual a 2,2015 %	75
Fig. 21. Tensão de saída na fase c para o transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a três diodos, com THD_{v2} igual a 9,3613%.....	76

Fig. 22. Tensão e corrente de excitação do transformador T_2 na <i>fase c</i> , com THD_{v2} igual a 12,39%.	76
Fig. 23. Perda no núcleo em função da distorção harmônica total de corrente (THD_{i2}).	79
Fig. 24. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação ao fator de potência de saída (Fp_{out}).	80
Fig. 25. Perda no núcleo em relação à componente cc da corrente de excitação (i_{odc}), para carga composta por ponte a três diodos.	80
Fig. 26. Perda no núcleo em relação à corrente de excitação (I_{orms}), para carga composta por ponte a três diodos.	81
Fig. 27. Corrente na <i>fase c</i> do primário do transformador T_1 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a três diodos, com THD_{i1} igual a 90,0891%.	82
Fig. 28. Corrente na <i>fase c</i> do secundário do transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a três diodos, com THD_{i2} igual a 108,47%.	82
Fig. 29. Tensão de saída na <i>fase c</i> para o transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc a três diodos, com THD_{v2} igual a 12,39%.	83
Fig. 30. Tensão e corrente de excitação do transformador T_2 na <i>fase c</i> , com THD_{v2} igual a 12,39%.	83
Fig. 31. Perda no cobre para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	85
Fig. 32. Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	85
Fig. 33. Potência aparente máxima (S_{MAX}) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	86

Fig. 34. Capacidade de potência ativa (RPC_2) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	87
Fig. 35. Rendimento (η) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	88
Fig. 36. Corrente de neutro do transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	89
Fig. 37. Perda no núcleo total para os dois transformadores conectados <i>back-to-back</i> alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por seis diodos.	92
Fig. 38. Perda no cobre total para os dois transformadores conectados <i>back-to-back</i> alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por seis diodos.	93
Fig. 39. Perda no núcleo total para os dois transformadores conectados <i>back-to-back</i> alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	94
Fig. 40. Perda no cobre total para os dois transformadores conectados <i>back-to-back</i> alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.	96
Fig. 41. Erros (%) relativos às perdas no núcleo e cobre para os dois transformadores alimentando cargas não-lineares a três diodos, utilizando-se os dois métodos.	96
Fig. 42. Painel frontal de controle, medição e tratamento de sinais relativos às perdas em transformadores alimentando cargas (não)-lineares.....	116
Fig. 43. Carga linear com fator de potência unitário.....	117
Fig. 44. Carga linear indutiva..	117
Fig. 45. Carga não-linear composta por ponte a seis diodos.....	118
Fig. 46. Carga não-linear composta por ponte a três diodos.....	118

LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Configuração back-to-back de dois transformadores trifásicos Δ -Y.....	112
Foto 2 - Transdutores de tensões e correntes, bloco conector, caixa de distribuição, chave blindada e fonte simétrica cc.....	112
Foto 3 - Computador digital conectado aos transdutores via placa de aquisição de dados e bloco conector.....	113
Foto 4 - Protótipo de simulação em operação.....	113
Foto 5 - Carga resistiva trifásica.....	114
Foto 6 - Vista dos transdutores, varivolt, carga resistiva e sala de teste de transformadores.....	114
Foto 7 - Analisador de energia elétrica de alta precisão (DRANETZ- BMI).....	115
Foto 8 - Medidor de resistência em cc de precisão (FLUKE 8508A REFERENCE MULTIMETER).....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Perdas a vazio e em carga para as condições nominais	62
Tabela 2. Perda em carga para a condição linear com fator de potência indutivo.....	64
Tabela 3. Perdas em transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte <i>ca/cc</i> composta por seis diodos	68
Tabela 4. Harmônicas de tensões e correntes de carga e corrente de excitação para os dois transformadores, na <i>fase c</i> , com thd_{i2} igual a 40,8102%.....	77
Tabela 5. Perdas em transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte <i>ca/cc</i> composta por três diodos	78
Tabela 6. Harmônicas de tensão, corrente de carga e corrente de excitação na <i>fase c</i> do transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte <i>ca/cc</i> composta por três diodos, com THD_{i2} igual a 108,47%.....	84
Tabela 7 . Comparação dos métodos para os cálculos das perdas no núcleo e cobre com carga linear nominal.	90
Tabela 8 . Comparação dos métodos para os cálculos das perdas no núcleo e cobre com carga não-linear em ponte <i>ca/cc</i> a seis diodos.	91
Tabela 9 . Comparação dos métodos para os cálculos das perdas no núcleo e cobre com carga não-linear em ponte <i>ca/cc</i> a três diodos.....	94
Tabela 10. Resistência dos enrolamentos em <i>cc</i> para o transformador T_1 ..	103
Tabela 11. Resistência dos enrolamentos em <i>cc</i> para o transformador T_2 ..	104
Tabela 12. Precisão dos sensores.....	107
Tabela 13. Largura de faixa dos transdutores e placa de aquisição de dados	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ca	- Corrente alternada
β	- Constante de temperatura
DAQ	- Data Acquisition
cc	- Corrente contínua
f_h	- Frequência harmônica
FHL	- Fator de Perda Harmônica
FHL_1	- Fator de Perda Harmônica para o transformador T_1
FHL_2	- Fator de Perda Harmônica para o transformador T_2
F_{HL-STR}	- Fator de Perda Harmônica para outras perdas adicionais
Fp	- Fator de potência
Fp_{in}	- Fator de potência de entrada
Fp_{out}	- Fator de potência de saída
h	- Ordem harmônica
i	- Fase
I	- Valor <i>rms</i> da corrente de carga
I_h	- Valor <i>rms</i> da harmônica h
I_{MAX}	- Corrente máxima
I_{1MAX}	- Corrente aparente máxima para o transformador T_1
I_{2MAX}	- Corrente aparente máxima para o transformador T_2
$I_{1MAX-pu}$	- Corrente aparente máxima por unidade para o transformador T_1
$I_{2MAX-pu}$	- Corrente aparente máxima por unidade para o transformador T_2
i_{11}	- Sensor de corrente da <i>fase a</i> do transformador T_1
i_{12}	- Sensor de corrente da <i>fase b</i> do transformador T_1

i_{13}	- Sensor de corrente da <i>fase c</i> do transformador T_1
i_{21}	- Sensor de corrente da <i>fase a</i> do transformador T_2
i_{22}	- Sensor de corrente da <i>fase b</i> do transformador T_2
i_{23}	- Sensor de corrente da <i>fase c</i> do transformador T_2
i_N	- Sensor de corrente de neutro do transformador T_2
i_{a1}	- Corrente instantânea na <i>fase a</i> do transformador T_1
i_{b1}	- Corrente instantânea na <i>fase b</i> do transformador T_1
i_{c1}	- Corrente instantânea na <i>fase c</i> do transformador T_1
i_{a2}	- Corrente instantânea na <i>fase a</i> do transformador T_2
i_{b2}	- Corrente instantânea na <i>fase b</i> do transformador T_2
i_{c2}	- Corrente instantânea na <i>fase c</i> do transformador T_2
I_{odc}	- Componente <i>cc</i> da corrente de excitação
i_{opu}	- Corrente de excitação em por unidade
I_{orms}	- Corrente de excitação <i>rms</i>
I_{pu}	- Valor <i>rms</i> da corrente de carga em <i>pu</i>
I_R	- Corrente nominal
I_l	- Valor <i>rms</i> da corrente de carga na frequência fundamental
L_{ac}	- Indutância de dispersão média para os dois transformadores
L_{acef}	- Indutância de dispersão por fase relativa à baixa tensão para o modelo T
$L_{ac1médio}$	- Indutância de dispersão média para o transformador T_1
$L_{ac2médio}$	- Indutância de dispersão média para o transformador T_2
P_{cu}	- Perda no cobre
P_{cu1i}	- Perda no cobre para o transformador T_1 por fase
P_{cu2i}	- Perda no cobre para o transformador T_2 por fase
P_{cu1}	- Perda no cobre para o transformador T_1
P_{cu2}	- Perda no cobre para o transformador T_2

- P_{cu1-R} - Perda no cobre nominal para o transformador T_1
 P_{cu2-R} - Perda no cobre nominal para o transformador T_2
 $P_{cuTotali}$ - Perda no cobre total por fase para os dois transformadores
- $P_{cuTotal}$ - Perda no cobre total para os dois transformadores
 P_{EC} - Perda adicional por correntes parasitas em enrolamentos
 $P_{EC\ pu}$ - Perda por correntes parasitas em enrolamentos por unidade
 $P_{EC\ Ii}$ - Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_1 por fase
 $P_{EC\ 2i}$ - Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 por fase
 $P_{EC\ 1}$ - Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_1
 $P_{EC\ 2}$ - Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2
 P_{EC-FHL} - Perda por correntes parasitas em enrolamentos calculada por FHL
 P_{EC-R} - Perda por correntes parasitas em enrolamentos sob condições nominais de carga linear
 $P_{EC-R\ pu}$ - Perda por correntes parasitas em enrolamentos sob condições nominais de carga linear por unidade
- P_{ini} - Potência de entrada por fase
 P_{in1i} - Potência de entrada por fase para o transformador T_1
 P_{in2i} - Potência de entrada por fase para o segundo transformador
 P_{in1} - Potência de entrada para o primeiro transformador
 P_{in2} - Potência de entrada para o segundo transformador
 P_{LL} - Perda em carga
 P_{MAX} - Potência ativa máxima de saída
 P_{NLi} - Perda no núcleo por fase

- P_{N1Li} - Perda no núcleo por fase para o transformador T_1
- P_{N12i} - Perda no núcleo por fase para o transformador T_2
- P_{N1} - Perda no núcleo para o transformador T_1
- P_{N2} - Perda no núcleo para o transformador T_2
- P_{N1-R} - Perda no núcleo nominal para o transformador T_1
- P_{N2-R} - Perda no núcleo nominal para o transformador T_2
- P_{NL} - Perda no núcleo
- $P_{NLTotali}$ - Perda no núcleo total por fase para os dois transformadores
- $P_{NLTotal}$ - Perda no núcleo total para os dois transformadores
- P_{OSL-R} - Perda adicional por correntes parasitas em outras partes que não sejam enrolamentos sob condições nominais de carga linear
- $P_{OSL-R} pu$ - Perda adicional por correntes parasitas em outras partes que não sejam enrolamentos sob condições nominais de carga linear por unidade
- $P_{OSL} pu$ - Perda adicional por correntes parasitas em outras partes que não sejam enrolamentos por unidade
- P_{OSL} - Perda adicional por correntes parasitas em outras partes que não sejam enrolamentos
- P_{outi} - Potência de saída por fase
- P_{out1i} - Potência de saída por fase para o transformador T_1
- P_{out2i} - Potência de saída por fase para o transformador T_2
- P_{out1} - Potência de saída para o transformador T_1
- P_{out2} - Potência de saída para o transformador T_2
- P_{Rdc} - Perda na resistência cc
- P_{Total} - Perda total para os dois transformadores
- P_{Totali} - Perda total para os dois transformadores por fase
- P_{TSL} - Perda adicional por correntes parasitas
- pu - por unidade

- $R_{acbaixa}$ - Resistência efetiva em ca relativa à baixa tensão para o modelo T
- R_{acefi} - Resistência em ca efetiva por fase
- R_{APR} - Redução de potência aparente
- R_{dc} - Resistência em cc
- $R_{dcmedio}$ - Resistência média em cc
- $R_{dc\Delta medio}$ - Resistência média em cc para a conexão Δ
- R_{dc-AB} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais AB para a conexão Δ
- R_{dc-BC} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais BC para a conexão Δ
- R_{dc-CA} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais CA para a conexão Δ
- $R_{dc\Delta-y}$ - Resistência equivalente em cc média para a conexão Δ transformada para a conexão Y
- $R_{dcymedio}$ - Resistência média em cc para a conexão Y
- R_{dc-ab} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais ab
- R_{dc-bc} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais bc
- R_{dc-ca} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais ca
- R_{dc-Top} - Resistência equivalente em cc corrigida para a temperatura de operação
- $R_{ECbaixai}$ - Resistência adicional por correntes parasitas em enrolamentos por fase relativa à baixa tensão para o modelo T por fase
- R_{ECalta} - Resistência média adicional por correntes parasitas em enrolamentos por fase relativa à alta tensão para o modelo T
- $R_{ECaltai}$ - Resistência adicional por correntes parasitas em enrolamentos por fase relativa à alta tensão para o modelo T por fase

$R_{ECbaixa}$	- Resistência média adicional por correntes parasitas em enrolamentos por fase relativa à baixa tensão para o modelo T
R_{ECefi}	- Resistência adicional por correntes parasitas em enrolamentos por fase
RPC	- Capacidade de potência ativa
RPC_1	- Capacidade de potência ativa para o transformador T_1
RPC_2	- Capacidade de potência ativa para o transformador T_2
η	- Rendimento
η_{1pu}	- Rendimento em pu para o transformador T_1
η_{2pu}	- Rendimento em pu para o transformador T_2
rms	- Valor eficaz
S_{MAX}	- Potência aparente máxima
S_{1MAX}	- Potência aparente máxima para o transformador T_1
S_{2MAX}	- Potência aparente máxima para o transformador T_2
$S_{1MAX-pu}$	- Potência aparente máxima por unidade para o transformador T_1
$S_{2MAX-pu}$	- Potência aparente máxima por unidade para o transformador T_2
S_R	- Potência aparente nominal
T_{ensaio}	- Temperatura de ensaio
THD	- Distorção Harmônica Total
THD_i	- Distorção Harmônica Total de corrente
THD_v	- Distorção Harmônica Total de tensão
THD_{i2}	- Distorção Harmônica Total de corrente para o transformador T_2
THD_{v2}	- Distorção Harmônica Total de tensão para o transformador T_2
T_{op}	- Temperatura de operação
T_{op-R}	- Temperatura de operação nominal
Θ_{TO}	- Temperatura na superfície do óleo sob condições de cargas não-lineares

- Θ_{TO-R} - Temperatura na superfície do óleo na frequência fundamental em condições de carga linear
- v_{o1} - Tensão de excitação para o transformador T_1
- v_{o2} - Tensão de excitação para o transformador T_2
- v_{o1i} - Tensão de excitação para o transformador T_1 por fase
- v_{o2i} - Tensão de excitação para o transformador T_2 por fase
- v_{o2pu} - Tensão de excitação para o transformador T_2 por unidade
- v_{11} - Sensor de tensão da *fase a* do transformador T_1
- v_{12} - Sensor de tensão da *fase b* do transformador T_1
- v_{13} - Sensor de tensão da *fase c* do transformador T_1
- v_{21} - Sensor de tensão da *fase a* do transformador T_2
- v_{22} - Sensor de tensão da *fase b* do transformador T_2
- v_{23} - Sensor de tensão da *fase c* do transformador T_2

RESUMO

Com o crescente desenvolvimento tecnológico de equipamentos elétricos e eletrônicos e sendo suas utilizações alimentadas pelos transformadores de distribuição, surgem como conseqüências destas cargas não-lineares, distorções nas formas de ondas das correntes e numa escala menor nas tensões dos transformadores. Os efeitos das correntes e tensões não-senoidais em transformadores são as perdas adicionais, que elevam a temperatura comprometendo a isolação e reduzindo a sua vida útil. Estas perdas adicionais provocam queda no rendimento, menor confiabilidade, aumento na corrente de excitação e de neutro, aumento do ruído sonoro e em casos extremos, a queima destes transformadores. A proposta deste trabalho é analisar o funcionamento de transformadores alimentando cargas não-lineares, através das medições de tensões e correntes e, a partir daí, calcular a perda no núcleo (P_{NL}), a perda no cobre (P_{cu}), a corrente máxima, a eficiência e a capacidade real de transferência de potência do transformador. As medições são efetuadas pela configuração *back-to-back* e o modelo adotado é o trifásico instantâneo com medições e cálculos realizados fase por fase. A metodologia a ser implementada utiliza alguns dados de relatório de testes e programação *LabVIEW*.

Palavras-Chave: Perdas em transformador, harmônicas, cargas não-lineares, correntes não-senoidais, Deratings.

ABSTRACT

As a consequence of the increasing technological development of electrical and electronic equipments, which are supplied by distribution transformers, the current and the voltage of transformers have presented distorted waveforms. These non-sinusoidal currents and voltages in transformers result in additional losses, which cause increase in temperature and reduction to the transformer insulation and lifetime. These additional losses cause decrease in the transformer efficiency, reduced reliability, increase in the excitation and in the neutral currents, increase in the audible noise and, in extreme operation conditions they may result in the transformer failure. The purpose of this work is to analyse the behaviour of the voltages and currents of distribution transformers when they are supplying energy to non-linear loads and, from this analysis, to calculate the core losses (P_{NL}), the resistive losses (P_{cu}), the maximum current, the efficiency and the effective capability of power transfer. The measurements are performed using the back-to-back configuration and the adopted model is the three-phase instantaneous model with measurements and calculus made per phase. This work is implemented using some data from previous tests and the programming language is LabVIEW.

Keywords -- Transformer losses, harmonic, nonlinear loads, nonsinusoidal currents, derating.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A crescente utilização de cargas não-lineares tem elevado significativamente as distorções harmônicas nos sistemas elétricos, apresentando, como conseqüências, a redução da eficiência e por vezes a má operação destes sistemas e de seus componentes. Mesmo quando alimentadas por tensões senoidais, cargas não-lineares produzem correntes não-senoidais. Correntes não-senoidais causam perdas adicionais em equipamentos elétricos, principalmente nos transformadores.

Equipamentos para acionamentos com velocidades controladas em motores de corrente alternada (*ca*) e corrente contínua (*cc*), cargas alimentadas por diodos, tiristores, computadores, TVs, eletrodomésticos acionados por motores universais, lâmpadas eletrônicas e outros, solicitam da fonte transformadora altos níveis de correntes com conteúdos harmônicos em relação às condições normais (lineares) de operação.

A vida da isolamento de transformadores está ligada diretamente a pontos nos quais existam concentrações de perdas (regiões de altas temperaturas). Estas regiões de alta densidade de perdas se tornam um dos principais fatores na determinação do desempenho e da vida útil do transformador.

1.2. Estado da arte

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 razoável porcentagem da carga total do transformador. Foi sugerido então, nesta reunião, que uma norma fosse criada para auxiliar na previsão da nova capacidade de carga do transformador baseado na sua quantidade de distorção harmônica. Uma comissão formada por vinte e dois representantes, entre eles fabricantes e usuários, teve seu primeiro encontro para estudos em outubro de 1980.

Um artigo do IEEE elaborado por Alexander D. Kline [1] 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 1989 este grupo de trabalho recebeu do IEEE uma premiação pelas reconhecidas contribuições para as indústrias e originalidade do trabalho. Kennedy e Ivey [2] em seu artigo de 1990, descreveu aplicações e considerações de projeto para transformadores contendo correntes harmônicas baseado na IEEE C57.110-1986 [3]. A intenção da IEEE

C57.110-1986 era criar procedimentos para determinar a capacidade de transformadores na existência de correntes de cargas não-lineares, mas a simbologia usada no documento de 1986 era muito confusa em termos das terminologias usadas nos projetos de transformadores. Um outro grupo de trabalho foi formado pela Comissão de Transformadores para revisar a IEEE C57 110.86 . Em 1996, Linden W. Pierce [4] escreveu mais um artigo sobre projeto e aplicações de transformadores alimentando cargas não-lineares. Em 1998, finalmente sai a revisão da C57 110. Este documento ficou pronto e passou a ser identificado por IEEE C57 110-1998 [3]. A partir daí, inúmeros trabalhos sobre este tema, principalmente sobre transformadores monofásicos tem sido apresentados e publicados. No que se refere a transformadores trifásicos de distribuição configurados *back-to-back* e conexão *Delta-Y*, não foi encontrado na literatura passada e atual nenhum trabalho prático apresentado e publicado. Alguns trabalhos recentes [5], [6] e [7] apresentam metodologia semelhante em transformadores monofásicos, onde os autores trabalham com a modelagem L para os transformadores conectados *back-to-back*. No Brasil, alguns grupos de trabalhos tem pesquisado sobre qualidade de energia elétrica. Destaca-se os estudos desenvolvidos na UFU sobre perdas e expectativa de vida em transformadores alimentando cargas não-lineares [8] e [9].

Na verdade, há uma carência na literatura mundial a respeito da determinação das perdas em “transformadores trifásicos de distribuição” alimentando cargas não-lineares. A proposta deste trabalho é justamente determinar estas perdas com maior precisão, utilizando-se para isto, a configuração *back-to-back* de dois transformadores trifásicos modelados pelo circuito equivalente T . A vantagem deste procedimento é que as medições podem ser realizadas pelos lados de baixa tensão.

1.3. Organização deste trabalho

Diante da necessidade de diagnosticar as causas e analisar os efeitos das correntes e tensões não-senoidais geradas pelas cargas alimentadas pelos transformadores, foi montado um protótipo para simulação prática contendo dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando cargas lineares e não-lineares, conforme Fig. 1. Esta figura mostra as medições sendo realizadas pelos lados de baixa tensão, através de transdutores de tensão e de corrente ligados a uma placa de aquisição de dados e esta, por sua vez, ligada a um computador digital. Foi desenvolvido um software na programação em LabVIEW, para realizar as medições das tensões e correntes de fases e determinação das perdas no núcleo, no cobre, da perda por correntes parasitas em enrolamentos, da corrente máxima, da redução da potência aparente, do rendimento e da capacidade potência ativa para os dois transformadores trifásicos conectados *back-to-back* alimentando cargas lineares e não-lineares.

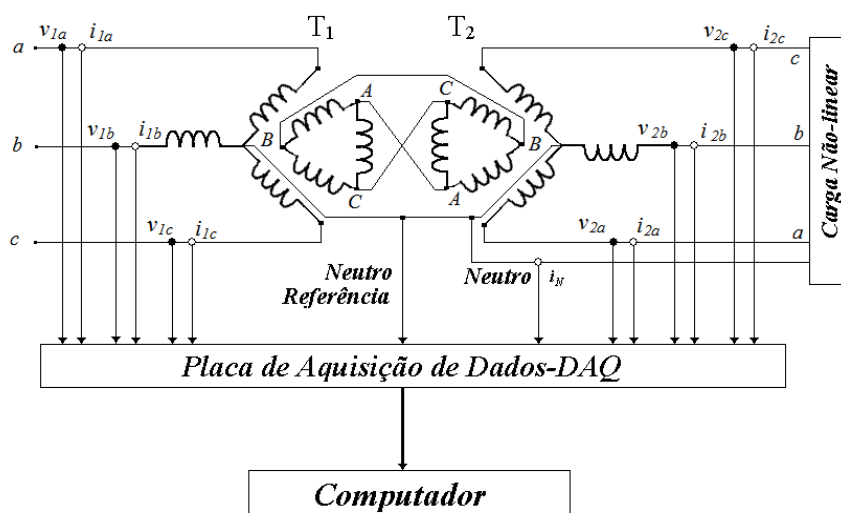


Fig. 1. Configuração *back-to-back* de dois transformadores trifásicos *Delta – Y*, alimentando carga não-linear e medições sendo realizadas pelos lados de baixa tensão.

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 em enrolamentos (P_{EC}) e partes estruturais (P_{OSL}), fator de perda harmônica (FHL), elevação da temperatura do nível do óleo (ΔT_{op}), *fator-k*, distorção harmônica total de tensão ou corrente (THD_v ou THD_i), *Derantings* e capacidade de potência ativa (RPC). Estas definições são baseadas na padronização do *IEEE*, conforme [3].

O capítulo três apresenta a modelagem matemática proposta neste trabalho para os cálculos das perdas no núcleo e no cobre, dada perda por correntes parasitas em enrolamentos, rendimento, corrente máxima, potência aparente máxima e da capacidade de potência ativa para os dois transformadores conectados *back-to-back*. Neste equacionamento, adota-se inicialmente o modelo L para o cálculo da resistência efetiva de dispersão por fase de cada transformador.

Ainda no capítulo três é apresentado uma comparação do modelo utilizado neste trabalho com outro modelo utilizado em outros trabalhos.

O capítulo quatro é dirigido à parte experimental. Para isto, foi construído um protótipo contendo dois transformadores trifásicos de distribuição Δ -Y, 13,8/0,38 kV, conectados *back-to-back*. Este arranjo destina-se à simulação prática, a qual compreende cinco etapas. A primeira trata dos dois transformadores operando a vazio e também com carga linear nominal. Na segunda etapa os transformadores alimentam carga linear com variação do fator de potência indutivo. Na terceira parte os transformadores suprem cargas

não-lineares do tipo conversor *ca/cc* a seis diodos. Na quarta parte os transformadores alimentam cargas também não-lineares compostas por um conversor *ca/cc* a três diodos. Na quinta parte é analisada a corrente de neutro referente ao segundo transformador alimentando cargas não-lineares a quatro condutores.

No capítulo cinco é realizada uma comparação do modelo adotado neste trabalho, referente aos cálculos das perdas no núcleo e cobre, com o modelo adotado na literatura internacional, conforme [5], [6] e [7].

O capítulo seis apresenta as conclusões gerais deste trabalho.

São mostrados no Apêndice A: os dados de placa dos transformadores, a indutância de dispersão, a forma de obtenção das resistências dos enrolamentos em *cc*, a correção dos valores das resistências em *cc* e a construção do circuito equivalente *T*.

No Apêndice B são apresentados os transdutores de tensão e de corrente, a placa de aquisição de dados, a precisão dos transdutores e a taxa de amostragem dos sinais adquiridos.

As equações matemáticas utilizadas neste trabalho, são desenvolvidas no Apêndice C.

Em seguida, no Apêndice D tem-se as fotografias das partes do protótipo implementado neste trabalho.

Finalmente, o Apêndice E mostra o Painel Frontal de Controle, contendo as medições e resultados dos cálculos dos parâmetros e variáveis.

2. CLASSIFICAÇÃO DAS PERDAS EM TRANSFORMADORES

2.1. Considerações

Neste capítulo, serão abordados sobre a classificação das perdas em transformadores baseada na norma IEEE Std. C57. 110. 1998; sobre os efeitos das correntes de cargas não-lineares nas perdas dos transformadores; sobre as definições do fator de perda harmônica (*FHL*), *fator-k*, distorção harmônica total de tensão e de corrente (*THD*).

As Perdas nos transformadores podem ser classificadas como Perda no Núcleo ou Perda de Excitação (P_{NL}), Perda em Carga ou Perda nas Impedâncias (P_{LL}) e Perda Total (P_{Total}) que é a soma das Perdas no Núcleo e em Carga [3], conforme equação (2.1).

$$P_{Total} = P_{NL} + P_{LL} \quad (2.1)$$

A perda em carga (P_{LL}) é composta pela perda na resistência *cc* (R_{dc}) dos enrolamentos ($P_{Rdc} = R_{dc} \cdot I^2$) mais a perda adicional por correntes parasitas (P_{TSL}). A perda adicional é atribuída aos fluxos magnéticos dispersos nos enrolamentos, núcleo, união de núcleo, blindagens magnéticas, paredes de tanque, etc. Desta forma os fluxos dispersos são subdivididos e apresentam perda adicional por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC}) e perda adicional por correntes parasitas em outras partes que não sejam os enrolamentos (P_{OSL}), tais como núcleo, união de núcleo, estrutura metálica e

tanque [3], conforme equação (2.2). Portanto, a perda total em carga pode ser estabelecida de acordo com a equação (2.3).

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.2)$$

$$P_{LL} = R_{dc} \cdot I^2 + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.3)$$

2. Perdas por unidade em transformadores

O maior interesse sobre a operação de transformadores, sob condições de cargas não-lineares, é determinar a perda adicional por correntes parasitas, principalmente nos enrolamentos, pois esta perda estará contribuindo no sobre-aquecimento destes transformadores. É interessante considerar também a densidade de perda nos enrolamentos por unidade (pu). A corrente de base é a corrente nominal (I_R) e a densidade de perda base é a densidade de perda nos enrolamentos na resistência cc ($R_{dc} \cdot I_R^2$) [4]. Dividindo-se a equação (2.3) por esta perda base (aplicada às condições de carga nominal), obtém-se a equação (2.4).

$$P_{LL-R} pu = 1 + P_{EC-R} pu + P_{OSL-R} pu \quad (2.4)$$

Conhecida a perda por correntes parasitas em enrolamentos sob condições nominais de carga linear (P_{EC-R}), a perda por correntes parasitas devido às cargas não-lineares (P_{EC}) [3] pode ser expressa por (2.5).

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \cdot h^2 \quad (2.5)$$

Onde,

h - ordem harmônica

I_h – Valor eficaz da respectiva harmônica

A corrente base *rms* (I_R) é a corrente nominal com transformador alimentando carga linear.

O valor *rms* em *pu* [3] da corrente não-senoidal referente às cargas não-lineares é dado pela equação (2.6).

$$I_{pu} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 pu} \quad (2.6)$$

A equação (2.5) pode também ser escrita na forma *pu*, conforme equação (2.7), onde a corrente de base é a corrente nominal (I_R) e a base de perda ($R_{dc} \cdot I_R^2$) é a perda na resistência *cc*.

$$P_{EC} pu = P_{EC-R} pu \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 pu \cdot h^2 \quad (2.7)$$

2.3. Efeitos das correntes harmônicas nas diversas 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 predominância de harmônicas de ordem ímpar, par ou até mesmo uma combinação delas.

Cargas que prevaleçam harmônicas de corrente de ordem ímpar múltiplas de três e componente cc da corrente de carga, podem gerar em alguns transformadores conectados em Y um aumento da corrente de excitação, elevando-se assim, as perdas no núcleo [3] e [4].

2.3.1. Efeito da componente cc da corrente de carga

Corrente harmônica pode ocorrer de estar acompanhada por uma componente cc da corrente de carga. Esta componente cc da corrente de carga aumentará as perdas no núcleo do transformador. Dependendo deste nível da componente cc , poderá haver uma elevação da corrente de magnetização e, conseqüentemente uma elevação do nível do som audível [3]. Espera-se que a componente cc da corrente de carga não afete na capacidade de transferência de potência do transformador.

2.3.2. Efeito das correntes harmônicas sobre a perda no núcleo

As harmônicas presentes na corrente de carga podem criar distorções na forma de onda da tensão e corrente. Estas distorções, juntamente com a componente cc da corrente de carga, têm como conseqüência 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 na perda no núcleo [2] e [4]. A perda no núcleo pode ser dividida entre as perdas por correntes parasitas e por histerese e uma pequena parte referente à corrente de excitação nos enrolamentos do primário dos

transformadores. Esta perda por correntes parasitas no núcleo não é a mesma que nos enrolamentos por correntes parasitas. A perda de excitação é basicamente uma função da laminação, quantidade e qualidade do aço utilizado no núcleo, frequência de operação e fator de distorção dado para o aço durante a fase de corte e empilhamento. Esta perda é determinada em *Watt/kg* de núcleo. Devido a diferentes processos de fabricação esta perda poderá variar de fabricante para fabricante e será influenciada pelos fatores externos, tais como cargas não-lineares. 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 na saturação do mesmo. Com o transformador nestas condições a corrente de excitação e o nível sonoro aumentarão e, dependendo da intensidade dessa indução, a corrente de excitação poderá atingir até níveis de corrente de curto-circuito, podendo afetar permanentemente a curva de histerese. Tudo isto contribuirá para elevar a perda no núcleo [2] e [4].

2.3.3. Efeito das correntes harmônicas sobre a perda nos enrolamentos em cc

Se o valor *rms* da corrente de carga (I) é aumentado devido as correntes harmônicas, então a perda ($R_{dc}.I^2$) será incrementada de acordo com o quadrado do aumento do nível da corrente. Note que, se o valor eficaz da corrente de carga é mantido com a adição de correntes harmônicas, a componente fundamental então será reduzida. Mas, se a componente fundamental é mantida enquanto correntes harmônicas são aumentadas, então o valor *rms* da corrente de carga aumentará, podendo levar o transformador à

operação em sobrecarga [2] e [4]. Este é um ponto de limitação da potência aparente em transformadores alimentando cargas não-lineares (*Derating*).

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

Para o entendimento sobre a geração da perda por correntes parasitas em enrolamentos, verifica-se que fluxos eletromagnéticos dispersos, conforme Figura 2, geram tensões através de cada condutor [10]. Estas tensões são responsáveis pela circulação de correntes parasitas nestes enrolamentos. Os fluxos dispersos nos enrolamentos fluem axialmente através das bobinas e então se curvam radialmente através dos enrolamentos. Estes fluxos apresentam sua maior concentração nas regiões entre os dois enrolamentos (da baixa e alta tensão). Esta concentração de fluxos magnéticos produz correntes parasitas com maior intensidade no início e final destes enrolamentos. Este fato geralmente produz um aquecimento além do normal nestas regiões.

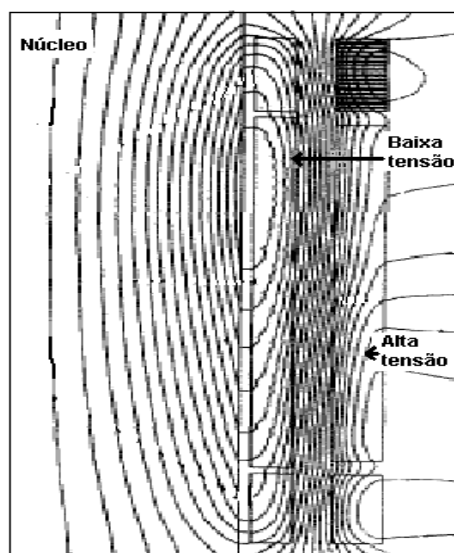


Fig. 2. Campo eletromagnético produzido por correntes de carga em enrolamentos de transformador.

As componentes de fluxos dispersos do interior do enrolamento da baixa tensão geralmente tem sua maior concentração para o lado da coluna do núcleo devido a sua baixa relutância no caminho de retorno. O enrolamento de alta tensão divide esta composição de fluxos, com parte deles sendo atraídos em direção ao núcleo e o restante para as junções de núcleo, partes estruturais, tanque ou ainda, por caminhos de retorno com alta relutância não magnética, como o ar (para transformador do tipo seco) ou como o óleo (para transformador imerso em líquido isolante), conforme Fig 3 [3]. A maior parte dos fluxos dispersos tem uma tendência em frangear-se interiormente em direção ao comprimento do núcleo. O enrolamento interno da baixa tensão do transformador geralmente é o que apresenta uma perda maior por correntes parasitas comparado com o enrolamento da alta tensão. Os fluxos dispersos, cortando através das espessuras dos condutores nos enrolamentos, geram a perda por correntes parasitas, que geralmente é proporcional ao quadrado da corrente no condutor. Entretanto, a configuração do modelo do condutor nos enrolamentos afeta também as perdas por correntes parasitas [10].

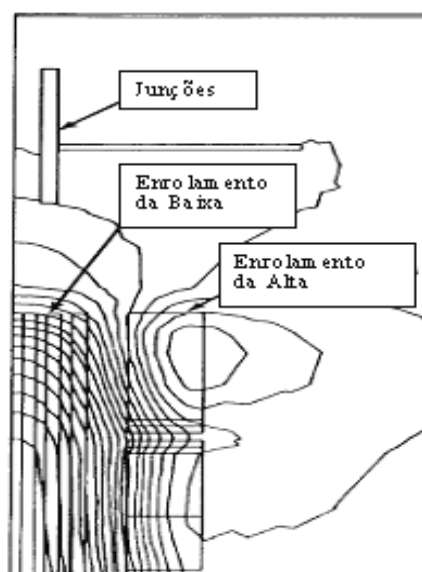


Fig. 3. Fluxos dispersos em transformadores.

Considera-se que a perda por correntes parasitas nos enrolamentos apresenta variação com o quadrado da intensidade do campo eletromagnético. Em vez de se usar o quadrado da intensidade do campo eletromagnético, usa-se o quadrado da corrente de carga composta por cada harmônica [10]. A perda por correntes parasitas também apresenta variação proporcional com o quadrado da frequência para cada componente harmônica. Na realidade, devido ao efeito pelicular, fluxos eletromagnéticos podem não penetrar totalmente nos condutores em altas frequências. Este fato tornaria este cálculo conservador, embora uma potência de 2 (dois) seja usada [2], [3], [4] e [5]. O efeito do aumento das perdas por correntes parasitas produzidas pelas correntes de cargas harmônicas é gerar calor, o qual deve ser dissipado pelo transformador. Esta perda por correntes parasitas é uma das partes das perdas que mais afeta a eficiência do transformador. Isto é visto como sendo o aspecto mais crítico e de interesse em relação ao aumento das perdas produzidas por correntes de cargas harmônicas. O aumento da perda por correntes parasitas é produzido nos condutores que transportam as correntes não-senoidais. Tudo isto, tem o efeito de elevar ainda mais a temperatura em pontos já quentes do transformador, a qual se torna um fator de maior limitação em um projeto de transformador. A perda nos enrolamentos devido as correntes parasitas (P_{EC}) no espectro de frequência com potência significativa, tende a ser proporcional ao quadrado da corrente de carga e ao quadrado da frequência [3].

As equações de (2.4) a (2.6) se referem, na prática, às correntes medidas com carregamento nominal. Sabe-se que no campo isto é raramente encontrado. Então um novo termo é necessário para descrever a perda por correntes parasitas nos enrolamentos em medições de qualquer corrente na frequência fundamental. Este termo é denominado P_{EC-O} , que representa a

perda por correntes parasitas em enrolamentos na freqüência fundamental com carga linear.

As equações de (2.5) a (2.7) podem agora ser reescritas mais genericamente. Pelo exposto, a perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC}) é definida [3] pela equação (2.8).

$$P_{EC} = P_{EC-O} \cdot \sum_{h=1}^{h=h \max} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^2 \quad (2.8)$$

Removendo-se o termo *rms* da corrente I do somatório da equação (2.8), obtém-se a equação (2.9).

$$P_{EC} = P_{EC-O} \cdot \frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} I_h^2 \cdot h^2}{I^2} \quad (2.9)$$

O valor *rms* da corrente de carga não-senoidal é dado por (2.10).

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h \max} I_h^2} \quad (2.10)$$

A corrente *rms* I referente a equação (2.9), poderá ser expressa em termos das componentes de freqüência pela substituição de (2.10) em (2.9). Deste procedimento, chega-se a equação (2.11).

$$P_{EC} = P_{EC-O} \cdot \frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h \max} I_h^2} \quad (2.11)$$

2.3.5. Efeito das correntes harmônicas na P_{OSL}

É admitido que a outra perda adicional (P_{OSL}) produzida no núcleo, junções, tanque e outras partes estruturais, também é proporcional ao quadrado da corrente de carga. Contudo esta perda não aumentará na proporção do quadrado da frequência, como é o caso da perda por correntes parasitas nos enrolamentos. Estudos de fabricantes e outros pesquisadores mostram que a perda adicional por correntes parasitas em barramentos, conexões, tanque e partes estruturais incrementam por um fator exponencial harmônico de 0.8 ou até mesmo menor [2] e [10]. A elevação de temperatura nestas regiões serão menos significativas em transformadores imersos em líquido que em enrolamentos para transformadores do tipo seco. Contudo esta perda deverá ser convenientemente considerada para transformadores imersos em óleo isolante, conforme o tipo de carga não-linear. A P_{OSL} é geralmente proporcional à corrente elevada a uma potência ligeiramente menor que dois. Por outro lado, com o aumento da frequência, a profundidade de penetração do fluxo disperso decresce. De qualquer forma, quando um transformador é submetido à carga contendo correntes harmônicas, esta perda adicional eleva a temperatura nestas partes metálicas a níveis acima do normal. Em casos extremos, a temperatura das paredes do tanque pode aumentar em tais proporções que, podem produzir bolhas de ar sob a pintura exterior dos tanques. 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 também gases combustíveis, que poderiam conduzir a uma falha. Felizmente, estes casos são raros. Em geral, transformadores do tipo seco de classe equivalente a transformadores imersos em óleo isolante terão estas perdas menores devido à redução da intensidade de campo magnético em partes estruturais circunvizinhas ao núcleo e aos enrolamentos. Isto é devido à existência de poucas partes metálicas em transformador do tipo seco. Em compensação, as partes existentes dissipam menos calor que um outro transformador equivalente imerso em óleo. Do exposto, define-se a outra perda adicional (P_{OSL}) [3], conforme equação (2.12).

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 \cdot h^{0.8} \quad (2.12)$$

Onde, P_{OSL-R} representa a perda por correntes parasitas em outras partes que não sejam enrolamentos na frequência fundamental com carga totalmente linear e nominal.

2.3.6. Efeito da elevação de temperatura na superfície do óleo - ΔT_{op}

Os efeitos das correntes harmônicas discutidos anteriormente apresentam como resultado final um aumento da perda total no transformador. Este aumento da perda obviamente aumentará a temperatura do transformador em relação ao seu valor de corrente senoidal com carga linear. Em geral, este acréscimo da perda terá o mesmo efeito como se tivesse o mesmo aumentado

seu carregamento. Para transformadores imersos em óleo isolante a elevação da temperatura na superfície do óleo (ΔT_{op}) será incrementada com o aumento da perda total com cargas harmônicas. Qualquer incremento na outra perda adicional por correntes parasitas (P_{OSL}), irá também afetar a elevação da temperatura na superfície do óleo. Define-se a elevação da temperatura no nível do óleo (ΔT_{op}) [3] para transformadores suprindo correntes de carga não-senoidais, conforme equação (2.13).

$$\Delta T_{op} = \Delta T_{op-R} \cdot \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL-R}} \right)^{0,8} \quad (2.13)$$

Onde, ΔT_{op-R} representa a elevação de temperatura do nível do óleo sobre a temperatura ambiente, com transformadores operando na frequência fundamental e carga linear nominal.

2.4. Fator de perda harmônica (*FHL*) para correntes parasitas em enrolamentos e definição do *Fator-k*

É interessante definir um simples número que poderá ser usado para determinação da capacidade do transformador no suprimento de potência para uma carga. *FHL* é um fator de proporcionalidade aplicado à perda por correntes parasitas em enrolamentos. Esta perda representa um aquecimento efetivo como consequência das correntes de cargas harmônicas. *FHL* é a razão da perda total por correntes parasitas em enrolamentos devido às harmônicas (P_{EC}), pela perda por correntes parasitas na frequência fundamental (P_{EC-O}). Esta definição [3] é representada pela equação (2.14).

$$FHL = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2} \quad (2.14)$$

Da equação (2.10), permite-se que FHL seja calculado em termos do valor atualizado da corrente rms harmônica. Vários esquemas de medições sugerem que cálculos de correntes normalizadas sejam feitos em termos da corrente rms total ou da primeira harmônica (fundamental).

A equação (2.14) pode ser adaptada para estas situações, bastando para isto dividir ambos numerador e denominador por I_1 (corrente harmônica fundamental) ou por I (corrente rms total). Aplicando-se estas correntes à equação (2.14) termo a termo, resultará nas equações (2.15) e (2.16).

$$FHL = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (2.15)$$

Nota-se que a quantidade (I_h/I_1) pode ser diretamente lida ou medida em algum passo por algum procedimento computacional.

$$FHL = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (2.16)$$

O fator *FHL* é uma função da distribuição das correntes harmônicas sendo independente da magnitude relativa.

O *Fator-k* nominal representa uma avaliação opcional aplicada a transformador indicando sua conveniência na alimentação de cargas com correntes não-senoidais. A definição para este *Fator-k* nominal [3] semelhante ao *FHL* é dada pela equação (2.17).

$$Fator - k = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 pu \cdot h^2 \quad (2.17)$$

A diferença entre *FHL* e *Fator-k* é a corrente adotada como base. Para o *FHL* utiliza-se a corrente de operação (*I*), conforme denominador da equação (2.14). Para o *Fator-k*, a corrente de base é a corrente nominal, conforme equações (2.6) e (2.17).

2.5. Fator de perda harmônica para outra perda adicional (P_{OSL})

Embora a elevação de temperatura devido à outra perda adicional (P_{OSL}) não seja geralmente considerada para transformadores do tipo seco, ela pode ter uma substancial conseqüência em transformadores imersos em líquido isolante. Uma relação similar ao Fator de Perda Harmônica para perda por correntes parasitas em enrolamentos também existe para esta outra perda adicional em um transformador, e pode ser desenvolvida de maneira similar. Embora, a perda devido às junções de barras, parte estrutural, tanque, etc, seja proporcional ao quadrado da corrente de carga, o expoente da frequência é menor ou igual a 0.8 [2] e [3], conforme equação (2.12).

A equação correspondente ao Fator de Perda Harmônica normalizada para a corrente *rms* total [3] é dada pela equação (2.18).

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{ax}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (2.18)$$

2.6. Distorção Harmônica Total (*THD*)

As definições da Distorção Harmônica Total de tensão (*THD_v*) e Distorção Harmônica Total de corrente (*THD_i*), conforme [11], são mostradas pelas equações (2.19) e (2.20). Essas definições representam as distorções na forma de onda em relação à componente fundamental de tensão ou corrente.

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=2}^{h_{max}} V_j^2}{V_1^2}} \quad (2.19)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=2}^{h_{max}} I_j^2}{I_1^2}} \quad (2.20)$$

2.7. Capacidade Equivalente do Transformador

É pressuposto que o transformador seja capaz de suprir uma corrente de carga contendo alguma(s) harmônica(s) desde que a perda total com o transformador em carga, e levando-se em consideração as regiões de maior perda por correntes parasitas nos enrolamentos, não exceda o nível para carga total com frequência nominal e condições de forma de onda senoidal. É importante dizer que uma condição limitante é a densidade de perdas nas regiões de maior perda por correntes parasitas em enrolamentos. Com relação à corrente de neutro, recomenda-se que a bitola deste condutor tenha capacidade de suportar até três vezes a corrente nominal. Portanto, esta será a base usada para estabelecimento da capacidade equivalente de transformadores alimentando correntes de cargas não-lineares [3] e [5].

3. MODELAGEM

Para modelagem matemática utilizada neste trabalho, optou-se pela utilização de dois transformadores trifásicos de distribuição conectados *back-to-back*. A escolha em trabalhar com a configuração *back-to-back*, é que, as medições podem ser realizadas pelos lados de baixa tensão, eliminando-se o uso de TP's e de TC's em outras configurações. Os cálculos das perdas adicionais, corrente máxima, redução da potência aparente, capacidade de potência ativa e eficiência em transformadores trifásicos alimentando cargas não-lineares, são baseados na modelagem T para os transformadores e apresenta os seguintes aspectos:

- As cargas alimentadas pelos transformadores são não-lineares balanceadas.
- A aquisição e tratamento de dados são realizadas por um sistema de medição composto por transdutores de precisão, placa de aquisição de dados e PC, em tempo real [12].
- Os transdutores para medições são instalados pelos lados de baixas tensões.
- Os parâmetros dos transformadores são referidos também para os lados de baixas tensões.

- A modelagem matemática baseia-se inicialmente no cálculo de uma resistência em *ca* efetiva por fase (R_{acefi}) que representa as perdas no cobre, considerando-se o modelo *L*, conforme Fig. 4. A composição desta resistência é apresentada na equação (3.1).

$$R_{acefi} = R_{dc} + R_{ECefi} \quad (3.1)$$

onde,

R_{dc} - Representa a resistência média por fase do enrolamento em corrente contínua (*cc*), obtida do ensaio de resistência dos enrolamentos em *cc*, conforme Apêndice A.

R_{ECefi} - Representa a resistência devido às correntes parasitas em enrolamentos por fase e é responsável pela perda adicional por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}).

- Adota-se inicialmente o modelo *L*, Fig. 4 para os cálculos da resistência efetiva de dispersão e corrente de excitação e, a posteriori, o modelo *T*, Fig. 5 para os cálculos da tensão de excitação relativa à perda no núcleo (P_{NL}) e também da perda no cobre (P_{cu}), para cada transformador.
- As medições das tensões e correntes de entrada e saída, cálculos das potências reais de entrada e saída e as perdas nos transformadores são estruturadas na programação LabVIEW em sua forma instantânea [13].

A Fig. 4 representa o modelo *L* por fase para os dois transformadores conectados *back-to-back* com seus respectivos parâmetros, tensões e

correntes, ambos referidos à baixa tensão (Conexão Y). Após este passo, é construído o circuito equivalente dos dois transformadores conectados *back-to-back*, considerando-se o modelo T , conforme Fig. 3 e Apêndice B. Para obtenção deste circuito T , são utilizados alguns parâmetros relativos aos ensaios de rotina de curto-circuito e resistência dos enrolamentos em corrente contínua (cc). Os parâmetros são a indutância de dispersão média (L_{ac}) e resistências médias em cc ($R_{dcbaixa}$ e R_{dcalta}) dos enrolamentos da alta e baixa tensão.

Os cálculos das perdas no núcleo e cobre para os transformadores referentes a estas outras fontes literárias, são baseados apenas em medições de tensões e correntes considerando-se o modelo L para os transformadores [5] e [6], conforme Fig. 4.

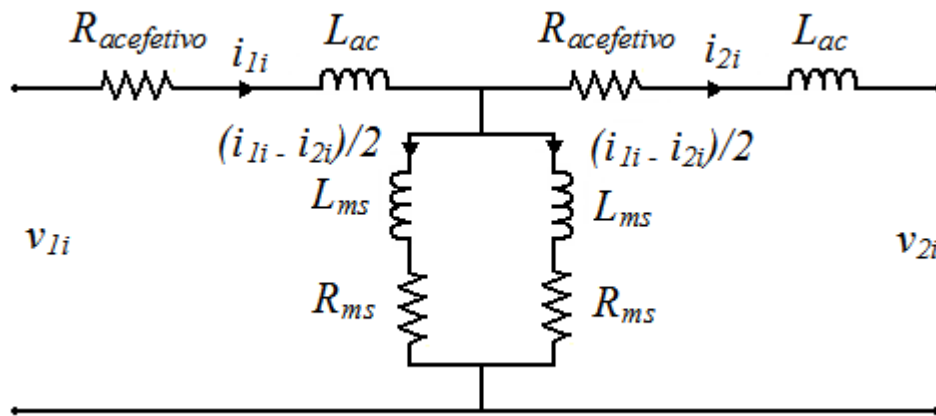


Fig. 4. Configuração *back-to-back* por fase de dois transformadores - modelo L .

A Fig. 5 representa o modelo T por fase dos dois transformadores conectados *back-to-back* com seus respectivos parâmetros, tensões e correntes referidos à baixa tensão (Conexão Y).

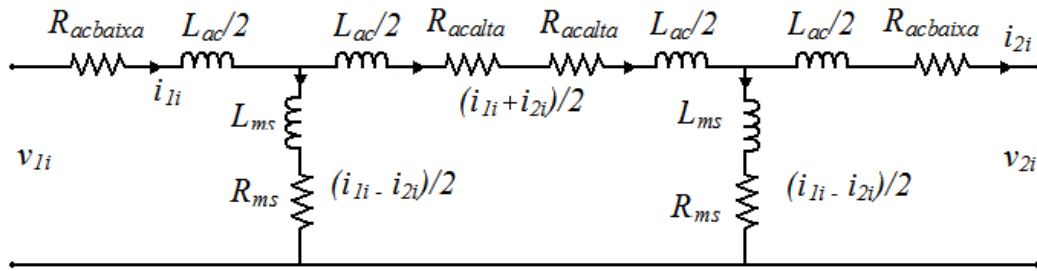


Fig. 5. Configuração *back-to-back* por fase de dois transformadores - modelo T .

O cálculo de R_{acefi} é realizado matematicamente pela diferença entre as tensões de entrada e saída considerando-se o modelo L para cada transformador e configurados *back-to-back*, conforme Fig. 4. Multiplicando-se a equação (3.2) pela soma das correntes i_1 e i_2 com o intuito de representação de aspecto de potência, e integrando-a no período amostrado, obtém-se o valor efetivo da resistência (R_{acefi}), que representa a perda no cobre (P_{cu}) para o modelo L , relativo a cada transformador. O período amostrado equivale a sessenta ciclos da fundamental, ou seja um segundo. Trabalhou-se também com a multiplicação da equação (3.2) com as correntes i_1 e i_2 separadamente e os resultados obtidos foram idênticos. A escolha em trabalhar com equações de potências médias é que estas podem gerar números reais para as resistências efetivas de dispersão, sendo que, as equações de tensões médias geram valores nulos. Quando se trabalha puramente com as equações de tensões (3.2), as resistências efetivas de dispersão ficam representadas por uma forma de onda (programação LabVIEW), podendo apresentar transitórios indesejáveis com valor *rms* não esperado. O valor da

indutância de dispersão (L_{ac}) é considerado constante durante o processo de simulações práticas com cargas não-lineares. Pesquisas recentes mostram que a indutância de dispersão pode apresentar variação em altas frequências [14], ou seja, acima de 3000 Hz. As frequências amostradas neste trabalho são até a quinquagésima harmônica (50th). Por outro lado, a variação da indutância de dispersão em transformadores em função da frequência é um dado bastante conservativo, já que cargas não-lineares geram uma composição espectral harmônica de amplitudes distintas, tornando esta variação da indutância menos significativa, para os casos reais quando transformadores alimentam cargas não-lineares. O valor médio desta indutância de dispersão é obtido pelo ensaio de rotina de curto-circuito [15], [16] e [17], conforme Apêndice A. A equação de “potência por fase” (3.3) é o resultado da manipulação aritmética entre as variáveis tensões e correntes de entrada e saída.

$$v_{1i} - v_{2i} = R_{acefi} \cdot i_{1i} + L_{ac} \cdot \frac{di_{1i}}{dt} + R_{acefi} \cdot i_{2i} + L_{ac} \cdot \frac{di_{2i}}{dt} \quad (3.2)$$

$$R_{acefi} = \frac{\int_0^T (v_{1i} - v_{2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt - L_{ac} \int_0^T \frac{d(i_{1i} + i_{2i})}{dt} \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt}{\int_0^T (i_{1i} + i_{2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt} \quad (3.3)$$

Para a composição das perdas nos transformadores conectados *back-to-back*, considera-se que estas apresentam perda no núcleo (P_{NL}) e perda no cobre (P_{cu}) [2] e [10]. A perda no cobre é composta pela perda na resistência

$cc (R_{dc} \cdot I^2)$ mais a perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC}). A perda por correntes parasitas em outras partes que não sejam enrolamentos, tais como núcleo, junções, parafusos, tanque e blindagens está embutida no cálculo da perda total, conforme balanço de perdas [2].

3.1. Cálculo das potências de entrada e de saída para cada transformador

Os cálculos das potências ativas [5] de entrada (P_{ini}) e de saída (P_{outi}) para a configuração *back-to-back* para os dois transformadores e por fase são realizadas pelas equações de potências médias (3.4) a (3.7) respectivamente, onde índice i representa a respectiva fase.

A potência média de entrada por fase do transformador T_1 (igual à potência de entrada da Configuração *back-to-back*) é calculada pela equação (3.4):

$$P_{ini} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{1i} \cdot i_{1i} \cdot dt \quad (3.4)$$

A potência de saída por fase do transformador T_2 (igual à potência de saída da configuração *back-to-back*) é calculada pela equação (3.5):

$$P_{outi} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{2i} \cdot i_{2i} \cdot dt \quad (3.5)$$

As potências médias totais de entrada e de saída são dadas pelas equações (3.6) e (3.7):

$$P_{in} = \sum_{i=1}^3 P_{ini} \quad (3.6)$$

$$P_{out} = \sum_{i=1}^3 P_{outi} \quad (3.7)$$

3.2. Cálculo da perda no núcleo

A obtenção da Perda no Núcleo (P_{NLI}) para cada transformador é feita calculando-se as tensões relativas a cada perda, conforme modelo *T*, Fig. 5. As correntes de magnetização (excitação) são consideradas idênticas para ambos transformadores e valem cinquenta por cento da diferença entre as correntes de entrada e de saída para a configuração *back-to-back*, conforme modelo *L*, Fig.4. A perda no núcleo por fase e total para o transformador T_1 é determinada pelas equações (3.8) e (3.9), conforme Apêndice C.

$$P_{NLI} = \frac{1}{2T} \int_0^T v_{oli} \cdot (i_{1i} - i_{2i}) \cdot dt \quad (3.8)$$

$$P_{NL1} = \sum_{i=1}^3 P_{NLI} \quad (3.9)$$

A perda no núcleo por fase e total para o transformador T_2 é determinada pelas equações (3.10) e (3.11), conforme Apêndice C.

$$P_{NL2i} = \frac{1}{2T} \int_0^T v_{o2i} \cdot (i_{1i} - i_{2i}) \cdot dt \quad (3.10)$$

$$P_{NL2} = \sum_{i=1}^3 P_{NL2i} \quad (3.11)$$

A tensão de excitação (v_{o1} ou v_{o2}) para cada transformador é determinada pelas equações (3.12), para o transformador T_1 , e (3.13) para o transformador T_2 , considerando-se o modelo T . Este procedimento, para os cálculos destas tensões de excitação é um aspecto inovador deste trabalho, pois, é considerado o modelo T para os transformadores. Sabe-se que na literatura internacional utiliza-se o modelo L .

$$v_{o1i} = v_{1i} - R_{acbaixa} \cdot i_{1i} - \frac{1}{2} \cdot L_{acef} \cdot \frac{di_{1i}}{dt} \quad (3.12)$$

$$v_{o2i} = v_{2i} + R_{acbaixa} \cdot i_{2i} + \frac{1}{2} \cdot L_{acef} \cdot \frac{di_{2i}}{dt} \quad (3.13)$$

sendo,

L_{acef} - Indutância de dispersão por fase relativa à baixa tensão considerando-se o modelo T , conforme Apêndice A.

$R_{acbaixa}$ - Resistência efetiva em *ca* relativa à baixa tensão considerando-se o modelo *T*, conforme Apêndice A.

3.3. Cálculo da perda no cobre

O cálculo da perda no cobre para cada transformador (P_{cu}) é estruturado também no modelo *T* dos dois transformadores configurados *back-to-back*, conforme Fig.5. A perda no cobre é baseada no cálculo do valor médio da soma das potências instantâneas dissipadas nos enrolamentos da alta tensão e baixa tensão, conforme Apêndice 6.3. Esta representação matemática leva em consideração também alguns parâmetros do transformador em vez de apenas valores de tensões e correntes medidas [3], [4] e [5]. Com este procedimento pode-se testar o balanço das perdas e, verificar a eficiência e credibilidade deste modelo e trabalho.

As equações (3.14) e (3.15) determinam estas perdas por fase e total para o transformador T_1 , sendo que o primeiro termo do segundo membro da equação (3.14) representa a perda no cobre para o enrolamento da baixa tensão, enquanto que o segundo termo do segundo membro desta equação representa a perda no cobre para o enrolamento da alta tensão, conforme Apêndice C.

$$P_{cu1i} = \frac{1}{T} \int_0^T [R_{acbaixa} \cdot i_{1i}^2 + \frac{1}{4}(v_{o1i} - v_{o2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i})] \cdot dt \quad (3.14)$$

$$P_{cu1} = \sum_{i=1}^3 P_{cu1i} \quad (3.15)$$

A perda no cobre para o transformador T_2 é calculada de modo semelhante. As equações (3.16) e (3.17) representam estas perdas por fase e total, conforme Apêndice C.

$$P_{cu2i} = \frac{1}{T} \int_0^T [R_{acbaixa} \cdot i_{2i}^2 + \frac{1}{4}(v_{o1i} - v_{o2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i})] \cdot dt \quad (3.16)$$

$$P_{cu2} = \sum_{i=1}^3 P_{cu2i} \quad (3.17)$$

3.4. Cálculo das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) para cada transformador

A perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC}) por fase e total para cada transformador é determinada baseando-se no cálculo do valor médio da soma das potências instantâneas dissipadas nas resistências adicionais devido às correntes parasitas nos enrolamentos da alta e baixa tensão, conforme modelo T . Estas resistências adicionais ($R_{ECbaixa}$ e R_{ECalta}) são consideradas iguais e, foram obtidas pela divisão de R_{ECefi} por dois, conforme equação (3.18). Estas perdas por fase e total para o transformador T_1 são dadas pelas equações (3.19) e (3.20). A corrente da alta tensão por fase é dada pela média aritmética entre as correntes de entrada e saída.

$$R_{ECbaixai} = R_{ECaltai} = \frac{1}{2} \cdot R_{ECefi} \quad (3.18)$$

$$P_{EC1i} = \frac{1}{T} \int_0^T [R_{ECbaixai} \cdot i_{1i}^2 + R_{ECaltai} \cdot \left(\frac{i_{1i} + i_{2i}}{2} \right)^2] \cdot dt \quad (3.19)$$

$$P_{EC1} = \sum_{i=1}^3 P_{EC1i} \quad (3.20)$$

A perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC}) por fase e total relativo ao transformador T_2 é feita de modo semelhante que para o transformador T_1 , conforme equações (3.21) e (3.22).

$$P_{EC2i} = \frac{1}{T} \int_0^T [R_{ECbaixai} \cdot i_{12}^2 + R_{ECaltai} \cdot \left(\frac{i_{1i} + i_{2i}}{2} \right)^2] \cdot dt \quad (3.21)$$

$$P_{EC2} = \sum_{i=1}^3 P_{EC2i} \quad (3.22)$$

3.5. Cálculo do Rendimento

A eficiência ou rendimento (η) para cada transformador é obtida pela razão entre as potências reais de entrada e saída também para cada transformador. A potência de entrada para o transformador T_1 (P_{in1}) é a potência de entrada para a configuração *back-to-back* (P_{in}), conforme equação (3.23), e a potência de

saída para o transformador T_1 (P_{out1}) é a diferença entre a potência de entrada e as respectivas perdas para o transformador T_1 , conforme equação (3.24).

$$P_{in1} = P_{in} \quad (3.23)$$

$$P_{out1} = P_{in1} - P_{NL1} - P_{cu1} \quad (3.24)$$

A potência de entrada para o transformador T_2 (P_{in2}) é justamente a potência de saída do transformador T_1 , conforme equação (3.25) e finalmente, a potência de saída para o transformador T_2 (P_{out2}) é a potência de saída para a configuração *back-to-back* (P_{out}), conforme equação (3.26).

$$P_{in2} = P_{out1} \quad (3.25)$$

$$P_{out2} = P_{out} \quad (3.26)$$

Os rendimentos em *pu* para o transformador T_1 (η_{1pu}) e transformador T_2 (η_{2pu}) são obtidos pelas equações (3.27) e (3.28).

$$\eta_{1pu} = \frac{P_{out1}}{P_{in1}} \quad (3.27)$$

$$\eta_{2pu} = \frac{P_{out2}}{P_{in2}} \quad (3.28)$$

3.6. Cálculo das correntes e potências máximas (I_{MAX} e S_{MAX}) ou *Deratings*

Os cálculos das correntes máximas dos dois transformadores são baseados nos balanços das perdas relativas à alimentação pelos transformadores de carga linear e carga não-linear. Para qualquer aumento da perda total para cada transformador além da perda total nominal, acarretará uma elevação da temperatura de operação acima da nominal. Nesta situação as isolações dos transformadores ficam comprometidas. Diante disto, faz-se necessário limitar as correntes de cargas. Estas equações baseiam-se na teoria da conservação de energia ou princípio de *Lavoisier*. A soma da perda no núcleo nominal (P_{NL-R}) com a perda no cobre nominal (P_{cu-R}) para as condições de carga linear deverá ser igual a perda no núcleo (P_{NL}) mais a perda no cobre ($3 \cdot R_{acefmédio} \cdot I_{1Max}^2$) em condições de carga não-linear, para cada transformador. O modelo adotado para estes cálculos é um modelo híbrido, ou seja, modelo *L* para perda no cobre e modelo *T* para perda no núcleo. As equações (3.29) e (3.30) limitam estas correntes nos dois transformadores conectados *back-to-back*.

$$P_{NL1-R} + P_{cu1-R} = 3 \cdot R_{acefmédio} \cdot I_{1Max}^2 + P_{NL1} \quad (3.29)$$

$$P_{NL2-R} + P_{cu2-R} = 3 \cdot R_{acefmédio} \cdot I_{2Max}^2 + P_{NL2} \quad (3.30)$$

Onde,

$R_{acefmédio}$ é a resistência efetiva média nas fases dos transformadores.

As equações (3.31) e (3.32), obtidas das equações (3.29) e (3.30), representam as respectivas correntes máximas para cada transformador conectado *back-to-back*.

$$I_{1MAX} = \sqrt{\frac{P_{NL1-R} + P_{cu1-R} - P_{NL1}}{3 \cdot R_{acefmédio}}} \quad (3.31)$$

$$I_{2MAX} = \sqrt{\frac{P_{NL2-R} + P_{cu2-R} - P_{NL2}}{3 \cdot R_{acefmédio}}} \quad (3.32)$$

Os valores das correntes máximas por unidade (*pu*) para os dois transformadores podem ser determinados pelas divisões destas correntes máximas pela corrente nominal (I_R). Destas operações resultam as equações (3.33) para o transformador T_1 e (3.34) para o transformador T_2 .

$$I_{1MAX-pu} = \frac{I_{1MAX}}{I_R} \quad (3.33)$$

$$I_{2MAX-pu} = \frac{I_{2MAX}}{I_R} \quad (3.34)$$

A Potência Máxima Aparente para cada transformador alimentando carga não-linear (*Derating*) é obtida multiplicando-se os valores *pu* das correntes máximas pela Potência nominal Aparente (S_R), conforme equações (3.35) e (3.36) e Apêndice C.

$$S_{1MAX} = I_{1MAX-pu} \cdot S_R \quad (3.35)$$

$$S_{2MAX} = I_{2MAX-pu} \cdot S_R \quad (3.36)$$

3.7. Medições indiretas nas perdas no núcleo e cobre (modelo L - referenciado)

Nesta etapa pretende-se determinar as perdas totais no núcleo (P_{NL}) e cobre (P_{cu}) para a configuração *back-to-back*, sem levar em consideração nenhum parâmetro dos transformadores. Estas medições indiretas são efetuadas mediante cálculos destas mesmas perdas considerando-se apenas as correntes e tensões de entrada e saída [2], [4] e [10]. A finalidade deste passo é o confronto destes cálculos com o modelo adotado neste trabalho. As equações (3.37) e (3.38) permitem determinar estas perdas por fase considerando-se o modelo *L*.

$$P_{NLTotali} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (v_{1i} + v_{2i}) \cdot (i_{1i} - i_{2i}) \cdot dt \quad (3.37)$$

$$P_{cuTotali} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (v_{1i} - v_{2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt \quad (3.38)$$

A perda total é determinada pelo somatório das fases relativo à soma das equações (3.37) e (3.38), conforme equação (3.39).

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^3 (P_{NLTotali} + P_{cuTotali}) \quad (3.39)$$

3.8. Reduções de potências

Algumas importantes relações de potências são definidas, com o intuito de estabelecer a capacidade de transformadores quando suprirem correntes não-senoidais.

3.8.1. Deratings

De acordo com [5] e [11], *Deratings* de um transformador é definido como uma intencional redução de aplicação de cargas em situações de tensões e correntes não-senoidais. Ou ainda, *Deratings* é a máxima potência aparente em *pu* que um transformador poderá fornecer quando do suprimento de cargas não-lineares, sem comprometer sua isolação. A equação (3.40) representa esta potência.

$$Deratings = \frac{S_{MAX}}{S_R} \quad (3.40)$$

3.8.2. Redução de potencia aparente (*RAPR*)

O *Deratings* com relação à redução da potência aparente é apresentado por [1]. A redução da potência aparente nominal é estabelecida tomando-se como base a máxima potência aparente ou *Deratings*, quando transformadores alimentam cargas não-lineares. Esta definição é dada pela equação (3.41).

$$RAPR = \left[\left(\frac{S_R - S_{MAX}}{S_R} \right) \right] \cdot 100\% \quad (3.41)$$

3.8.3. Capacidade de potência ativa (*RPC*)

Para o caso em que transformadores alimentam cargas não-lineares como conversores com filtros capacitivos, a potência ativa será necessariamente menor que a potência aparente. Neste caso, faz-se necessário definir um termo que limita a potência ativa [2]. A equação (3.42) representa a capacidade de potência ativa.

$$RPC = \frac{P_{MAX}}{S_R} \quad (3.42)$$

Onde P_{MAX} é a potência ativa máxima de saída, obtida de S_{MAX} , levando-se em consideração o fator de potência de saída.

4. SIMULAÇÃO PRÁTICA

A parte experimental é composta por cinco etapas, sendo as quatro primeiras relativas às aplicações de cargas nos transformadores conectados *back-to-back*. É analisado na quinta etapa, o comportamento da corrente de neutro do transformador T_2 alimentando carga não-linear. A primeira etapa representa os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga linear nominal e também a vazio. A segunda etapa apresenta os transformadores alimentando cargas lineares para diversos valores de fator de potência indutivo. Na terceira etapa, os transformadores alimentam cargas não-lineares em ponte *ca/cc* composta por seis diodos com variação do filtro capacitivo na saída da ponte. A quarta etapa mostra os dois transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte *ca/cc* composta por três diodos com variação também do filtro capacitivo na saída desta ponte. Para todas situações de cargas são utilizados dois transformadores trifásicos do mesmo lote de fabricação, cujos números de série são sequenciais. Os dados dos transformadores, bem como, da indutância de dispersão média e resistência média em *cc* na temperatura de ensaio, são apresentados no Apêndice A. Estes parâmetros foram obtidos pelos ensaios em curto-circuito e resistência dos enrolamentos em *cc* na temperatura de 25°C (ambiente). Para todas as etapas, é apresentado nas tabelas e gráficos duas formas de cálculos das perdas por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC} e P_{EC-FHL}). A primeira forma baseia-se na modelagem adotada, conforme equações (3.21) e (3.22) e a segunda, na IEEE Std C57-110-1998, conforme equação (2.5), [3]. O objetivo deste procedimento é o confronto teórico e prático nos cálculos destas perdas.

4.1. Primeira Etapa -Transformador a vazio e carga linear resistiva nominal

Nesta primeira e em todas as outras etapas, os transformadores conectados *back-to-back* foram energizados pelo barramento da companhia energética local. A Tabela 1 mostra o comportamento da perda no núcleo (P_{NL}), perda no cobre (P_{cu}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado (P_{EC}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo referenciado (P_{EC-FHL}), resistência efetiva média de dispersão e rendimento para os transformadores operando a vazio e também para operação em condições nominais, com carga linear. A carga linear é mostrada no Apêndice F, conforme Fig. 43.

Tabela 1. Perdas a vazio e em carga para as condições nominais

Transformador	T_1		T_2	
Carga	Linear	Vazio	Linear	Vazio
I_{rms} (A)	1.4931	1.6432	1.4931	1.6432
P_{NL} (W)	122.3484	133.7335	129.0926	129.7504
THD_v (%)	2.9124	3.0755	2.7824	3.0828
THD_i (%)	10.8757	37.9336	2.795	xxxxxxx
FHL	1.1309	2.6146	1.0224	xxxxxxx
$R_{acef\text{ médio}}$ (Ohms)	0.2241	0.3049	0.2241	0.3049
P_{cu} (W)	368.6667	6.5303	359.7477	1.1781
P_{EC} (W)	21.3945	1.6379	20.8769	xxxxxxx
P_{EC-FHL} (W)	23.6904	xxxxxxx	20.8272	xxxxxxx
Rendimento (%)	96.848	xxxxxxx	96.648	xxxxxxx
P_{in} (W)	15577.665	271.1923	14583.86	130.9285
P_{out} (W)	15086.650	130.9285	14095.02	xxxxxxx

Observa-se que, devido a Distorção Total Harmônica da corrente de excitação (THD_i), para os transformadores operando a vazio, há um aumento na resistência efetiva de dispersão. Isto tem como consequência, uma perda de aproximadamente 5% da perda no núcleo nesta resistência de dispersão, devido à corrente de excitação dos transformadores circularem por estas resistências. Sabe-se que esta perda não é computada nos ensaios de rotina normais [4] e [5]. As perdas no núcleo para os transformadores operando a vazio são maiores que as perdas para os mesmos transformadores operando em condições de carga linear nominal. Isto porque os níveis das tensões de excitações para os transformadores a vazio são maiores.

4.2. Segunda Etapa – Carga linear indutiva

Na segunda etapa os transformadores conectados *back-to-back* alimentam cargas lineares indutivas, conforme Apêndice F, Fig. 44. Esta simulação prática para carga indutiva tem como objetivo confrontar a perda no núcleo com transformadores alimentando cargas capacitivas. Pelo modelo adotado, e dependendo da carga ser capacitiva ou indutiva, a tensão de excitação poderá avançar ou atrasar-se em relação à tensão de alimentação com carga linear nominal, e com isto, a amplitude desta tensão poderá também aumentar ou diminuir. Este fato tem como consequência, uma alteração também na corrente de excitação para mais ou para menos, respectivamente. Desta forma, o valor médio do produto desta tensão pela corrente de excitação também sofrerá alteração de forma quadrática. Serão analisadas nas terceira e quarta etapas os transformadores alimentando cargas capacitivas.

A Tabela 2 apresenta o comportamento da perda no núcleo (P_{NL}), perda no cobre (P_{cu}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado (P_{EC}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo referenciado (P_{EC-FHL}) e rendimento para os transformadores operando com diversos valores de fator de potência de entrada para o transformador T_1 e fator de potência de saída para o transformador T_2 .

Tabela 2. Perda em carga para a condição linear com fator de potência indutivo

Transformador	T_1			T_2		
Carga	Indutivo1	Indutivo2	Indutivo3	Indutivo1	Indutivo2	Indutivo3
P_{NL} (W)	127.1287	124.4965	123.0343	149.4628	147.0544	145.8231
THD_v (%)	2.4681	2.4612	2.3750	2.3914	2.5250	2.4089
THD_i (%)	9.2849	8.9301	8.3076	2.4019	2.5436	2.1836
F_p	0.9888	0.9703	0.9603	1.0000	0.9926	0.9851
S_{in} (VA)	14152.83	14599.72	14908.47	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx
S_{out} (VA)	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	13093.49	13334.71	13569.43
P_{cu} (W)	329.0135	353.2871	364.6788	317.7681	338.5893	349.025
P_{EC} (W)	17.3142	19.9274	19.7987	16.8639	19.2872	19.1428
P_{EC-FHL} (W)	21.3172	22.5559	21.7102	19.3186	20.5501	19.9543
P_{in} (W)	13993.63	14166.09	14316.80	13546.04	13696.84	13836.94
P_{out} (W)	13547.29	13696.85	13836.94	13102.08	13235.96	13366.65
Rendimento (%)	96.8014	96.6876	96.6483	96.7226	96.6351	96.6012

A Fig. 6 representa as perdas no núcleo para os dois transformadores conectados *back-to-back* considerando-se a carga linear com variação do fator de potência indutivo.

Em algumas situações de representações gráficas, são introduzidas equações representativas do comportamento desta perda em função da

grandeza relacionada. As equações selecionadas para esta representação foram as que mais se aproximaram das curvas reais.

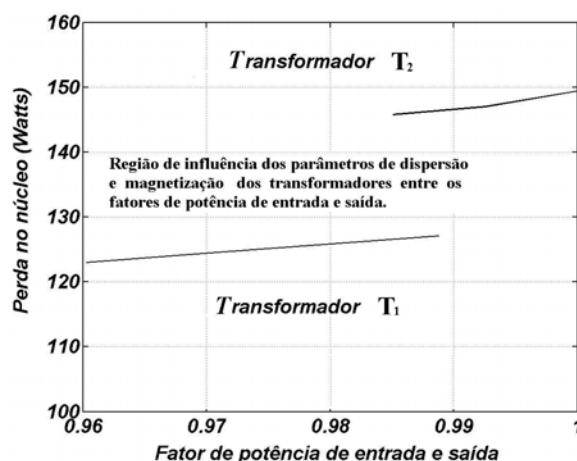


Fig. 6. Perda no núcleo para os dois transformadores em função do fator de potência de entrada e saída.

Observa-se que a perda no núcleo diminui com a diminuição do fator de potência, para o caso deste ser indutivo. Isto se explica devido ao aumento do defasamento angular entre a tensão de excitação (modelo T para os transformadores) e a própria tensão de alimentação para as condições de carga linear nominal. Este fato provoca uma redução na amplitude da tensão de excitação e, conseqüentemente, uma diminuição também na corrente de excitação. As duas combinações geram uma perda no núcleo menor, conforme Fig. 6.

As Figuras 7, 8 e 9 representam a perda no cobre, perda por correntes parasitas em enrolamentos e rendimento em função do fator de potência de saída relativos ao transformador T_2 .

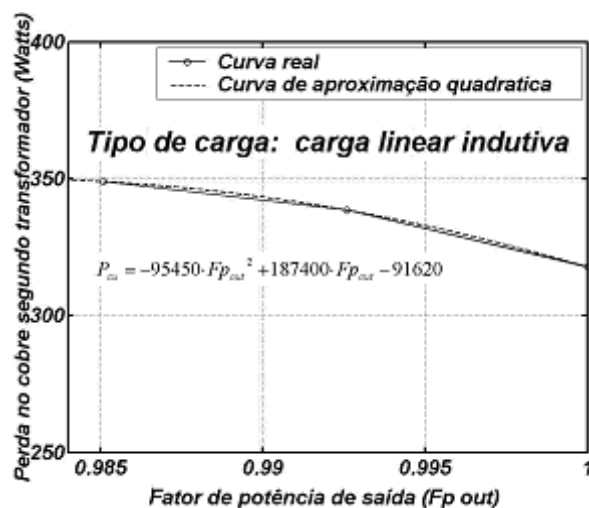


Fig. 7. Perda no cobre para o transformador T₂ em função do fator de potência de saída.

A perda no cobre para o transformador T₂, Fig. 7, cai de forma quadrática com o aumento do fator de potência indutivo. Isto se explica devido ao decréscimo da corrente aparente de carga, para uma mesma potência ativa.

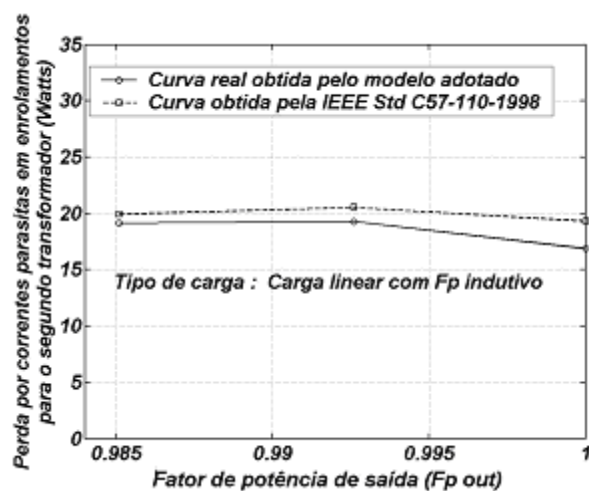


Fig. 8. Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T₂ em função do fator de potência de saída

De forma semelhante, a perda por correntes parasitas em enrolamentos, Fig. 8, cai com o quadrado da redução da corrente de carga. Isto ocorre devido à redução da potência reativa indutiva. A potência ativa da carga foi mantida a mesma durante esta simulação prática.

A perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC-FHL}) calculada pelo IEEE Std C57-110-1998 é mais conservativa do que a adotada neste trabalho, pois esta [4] considera que P_{EC-FHL} varia com o quadrado da componente harmônica de corrente e também com o quadrado da respectiva ordem harmônica. Sabe-se que para altas frequências os fluxos dispersos não atingem totalmente os enrolamentos e núcleo [5], [6] e [16].

A Fig. 9 mostra o rendimento aumentando com o aumento do fator de potência indutivo. Isto ocorre devido ao decréscimo da perda no cobre ser mais acentuada que o aumento da perda no núcleo em relação ao aumento do fator de potência, conforme Figuras 6 e 7.

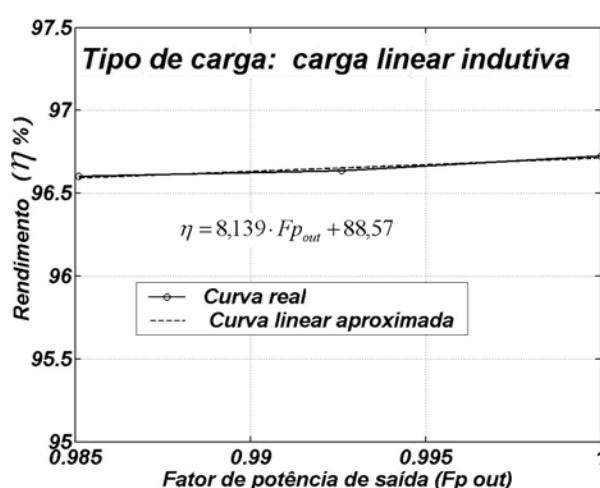


Fig. 9. Rendimento para o transformador T₂ em função do fator de potência de saída

4.3. Terceira Etapa – Carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por seis Diodos

Nesta etapa os transformadores conectados *back-to-back* alimentam cargas não-lineares em ponte *ca/cc* composta por seis diodos com variação da capacitância (C_1 , C_2 , C_3 e C_4) na saída desta ponte, conforme Apêndice F, Fig. 45. A Tabela 3 mostra o comportamento da perda no núcleo (P_{NL}), perda no cobre (P_{cu}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado (P_{EC}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo referenciado (P_{EC-FHL}), potência aparente máxima (S_{MAX}), capacidade de potência de potência ativa (RPC) e rendimento (η) para cada transformador.

Tabela 3. Perdas em transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte *ca/cc* composta por seis diodos

<i>Transformador</i>	T_1				T_2			
<i>Carga</i>	C_1	C_2	C_3	C_4	C_1	C_2	C_3	C_4
<i>FHL</i>	3.6316	4.7188	4.8057	5.2179	3.6296	4.8552	4.983	5.4187
<i>THD_v (%)</i>	2.0333	2.1059	2.1374	2.2611	6.8131	8.1867	8.3552	9.0992
<i>THD_i (%)</i>	26.7928	37.2384	37.8687	40.9459	25.6882	37.6262	38.4047	41.6627
<i>I_{orms} (A)</i>	1.5806	1.5307	1.5959	1.5822	1.5806	1.5307	1.5959	1.5822
<i>F_p</i>	0.9440	0.9023	0.9011	0.894	0.9583	0.9124	0.9098	0.8994
<i>P_{NL} (W)</i>	119.0246	119.1779	119.2652	119.9143	147.2067	147.6752	147.8531	148.1631
<i>S_{in} (VA)</i>	13923.3	14587.74	14630.29	14868.73	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx
<i>S_{out} (VA)</i>	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	12810.72	13407.24	13467.11	13722.42
<i>P_{cu} (W)</i>	317.9634	349.4527	350.0186	358.9513	303.6984	333.8545	335.195	344.336
<i>P_{EC} (W)</i>	18.1856	20.8295	20.4694	20.0557	17.5488	20.1068	19.7943	19.4219
<i>P_{EC-FHL} (W)</i>	19.6295	27.3838	27.6666	29.0933	19.5213	27.2329	27.5142	28.9329
<i>S_{MAX} (pu)</i>	0.9832	0.9802	0.9815	0.9830	0.9694	0.9648	0.9657	0.9668
<i>RPC (%)</i>	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	92.8976	88.02835	87.8594	86.95399
<i>Rendimento (%)</i>	96.6722	96.4388	96.4408	96.3977	96.6201	96.3717	96.3657	96.3151

As Figuras de 10 a 13 representam a perda no núcleo para o transformador T_2 em função do Fator de Perda Harmônica (FHL_2), Distorção Harmônica Total de tensão e corrente (THD_{v2} e THD_{i2}) e Fator de Potência de saída (Fp_{out}). Estas perdas referem-se à Tabela 3. A Fig. 10 mostra a perda no núcleo em relação ao Fator de Perda Harmônica para o transformador T_2 alimentando cargas não-lineares composta por conversor a seis diodos. Observa-se que esta perda cresce aproximadamente de forma linear como o aumento do FHL_2 .

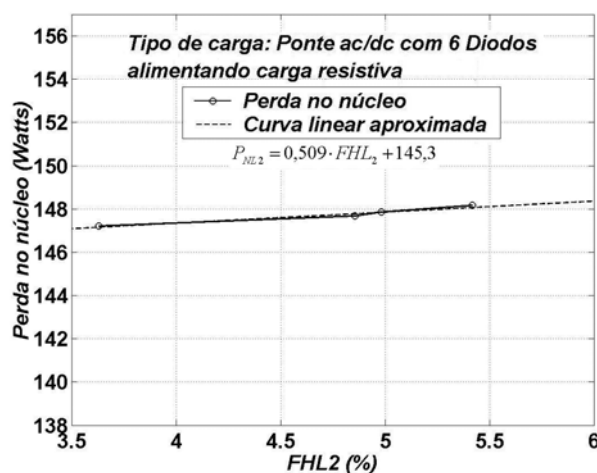


Fig. 10. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação ao Fator de Perda Harmônica (FHL_2), com carga composta por ponte a seis diodos.

O processo é inverso quando a grandeza analisada é o fator de potência da carga (Fp_{out}). A perda no núcleo aumenta com o decréscimo do fator de potência, conforme Fig. 11. Isto se deve ao tipo de carga, que neste caso é capacitiva. Nesta situação de carga, há um avanço angular bem como um aumento na amplitude da tensão de excitação em relação à tensão de alimentação para a condição carga linear nominal. Esta elevação de tensão produz também um aumento na corrente de excitação e, conseqüentemente

um acréscimo no valor médio do produto da tensão de excitação e a corrente de excitação, aumentando a perda no núcleo.

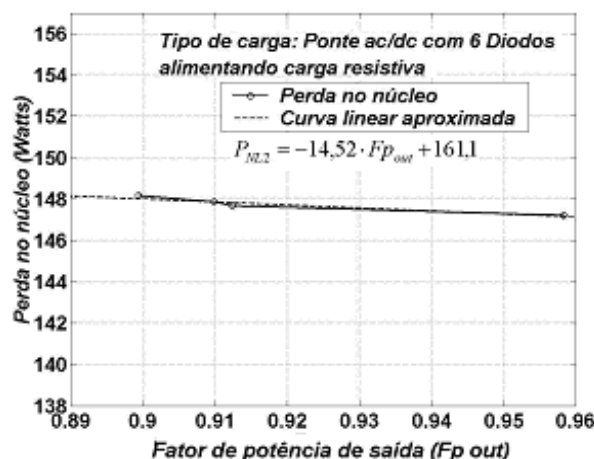


Fig. 11. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação ao Fator de Potência de saída (Fp_{out}), com carga composta por ponte a seis diodos.

As Figuras 12 e 13 representam a mesma perda no núcleo em função da Distorção Harmônica Total de tensão e corrente (THD_{v2} e THD_{i2}). O comportamento desta perda é semelhante nas duas situações, crescem aproximadamente de forma linear com o aumento da THD_{v2} ou THD_{i2} .

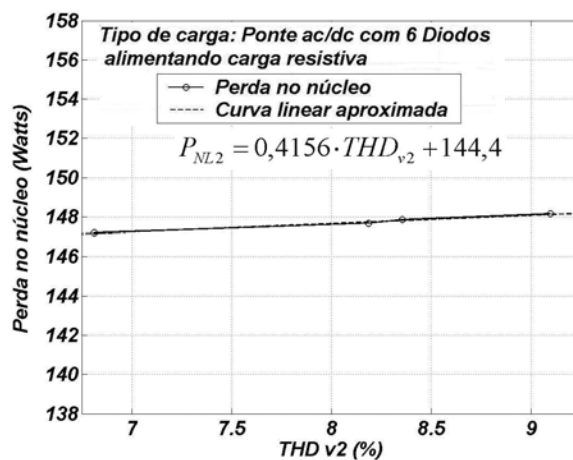


Fig. 12. Perda no núcleo para o transformador T_2 em função da THD_{v2} , relativo a carga composta por ponte a seis diodos.

A perda no núcleo para carga do tipo conversor a seis diodos apresenta basicamente duas situações: uma quando a ponte está conectada a um filtro capacitivo e a outra quando não está. Independentemente destas situações a perda no núcleo, apesar de apresentar variações, não sofre grandes flutuações, conforme Figuras 12 e 13.

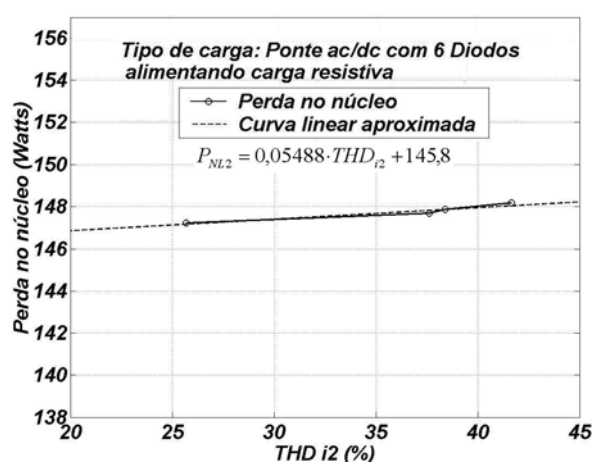


Fig. 13. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação à Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_{i2}), em relação a carga composta por ponte a seis diodos.

As Figuras de 14 a 17 representam a perda no cobre (P_{cu}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado (P_{EC}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo referenciado (P_{EC-FHL}), capacidade de potência ativa (RPC) e rendimento (η) em função da Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i2}) para o transformador T_2 , alimentando carga não-linear a seis diodos. Estes gráficos referem-se à Tabela 3. A Fig. 14 mostra o comportamento da perda no cobre para o transformador T_2 . Esta perda aumenta de forma linear com o aumento da THD_{i2} . O mesmo ocorre com a perda por correntes parasitas em enrolamentos, conforme Fig. 15.

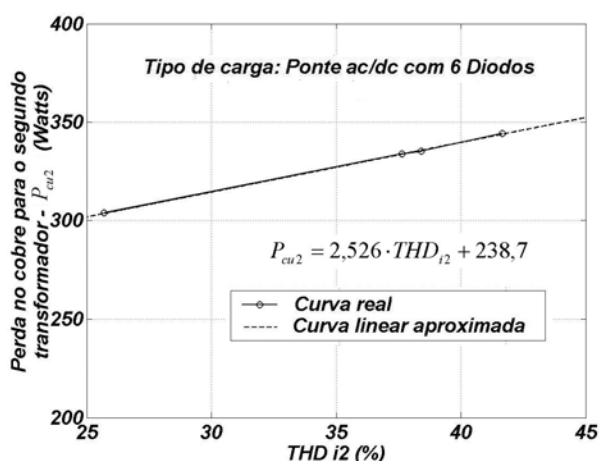


Fig. 14. Perda no cobre para o transformador T_2 em relação a Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i2}), com carga composta por ponte a seis diodos.

A diferença entre as perdas por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado (P_{EC}) e para o modelo referenciado (P_{EC-FHL}), conforme Fig. 15, é devido ao cálculo conservativo realizado pela equação (2.5), do modelo referenciado. Sabe-se que fluxos dispersos gerados por componentes harmônicas em altas frequências não alcançam totalmente os enrolamentos e nem o núcleo. Como isto, o modelo referenciado se torna conservativo, para altas frequências.

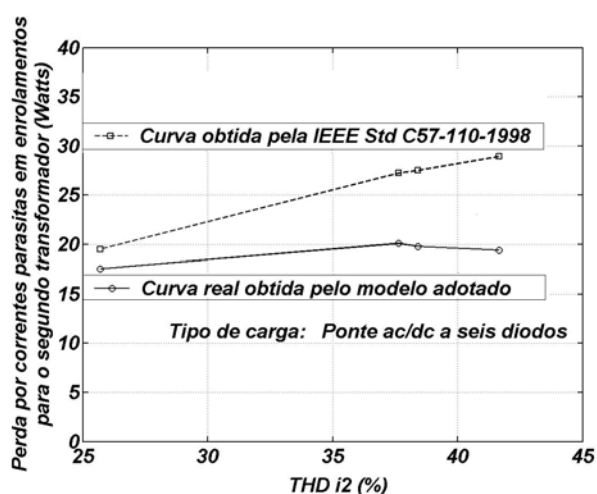


Fig. 15. Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 em relação à Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_{i2}), com ponte a seis diodos.

A Fig. 16 representa a capacidade de potência ativa para o transformador T_2 alimentando cargas não-lineares a seis diodos. Observa-se que, mesmo com uma distorção de corrente não muito acentuada, há uma redução na capacidade de potência ativa do transformador analisado. Esta redução inicia-se com 7,11% (uso da ponte sem capacitores) até o ponto mais crítico, onde apresenta uma redução de 13,05% (uso da ponte com filtro capacitivo), conforme Tabela 3.

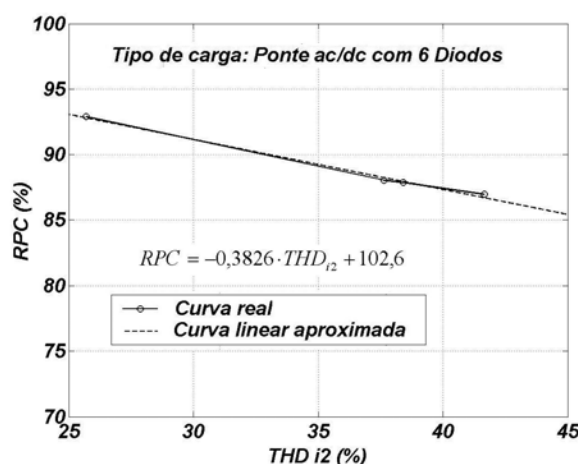


Fig. 16. Capacidade de Potência ativa para o transformador T_2 em relação a Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i_2}), com ponte a seis diodos.

A Fig. 17 registra o rendimento (η) para o transformador T_2 alimentando cargas não-lineares a seis diodos. Devido ao aumento das perdas no núcleo e cobre de forma aproximadamente linear conforme Figs. 13 e 14, é lógico que o rendimento cai também de forma linear com o aumento da distorção harmônica de corrente.

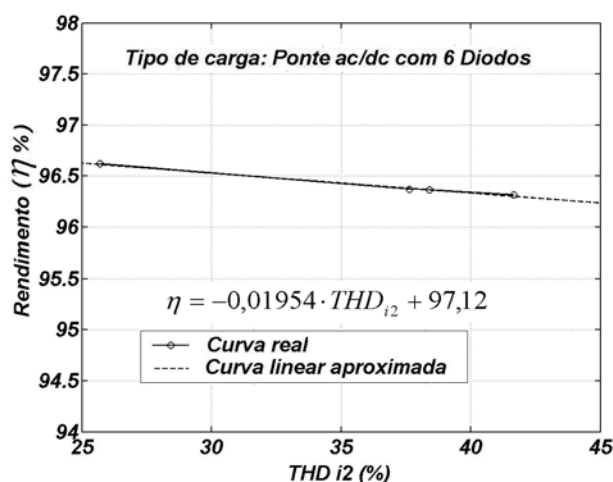


Fig. 17. Rendimento para o transformador T_2 em relação à Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_{i2}), com ponte a seis diodos.

A título de ilustração, são apresentadas nas Figs. de 18 a 22 as formas de onda das correntes de entrada e saída, tensões de entrada e saída e tensão e corrente de excitação, relativas à *fase c*, para a configuração de carga não-linear composta por seis diodos. Para esta situação, o valor de THD_{v2} é 9,3613% e, para THD_{i2} é 40,8102%.

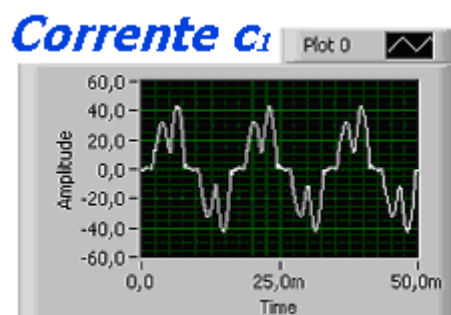


Fig. 18 Corrente na *fase c* do primário do transformador T_1 alimentando carga não-linear composta por ponte *ca/cc* à seis diodos, com THD_{i1} igual a 40,4207 %

As correntes mostradas nas Figuras 18 e 19 apresentam grandes distorções harmônicas. Estas distorções além de aumentar as perdas nos transformadores, provocam também distorções nas tensões em seus terminais.

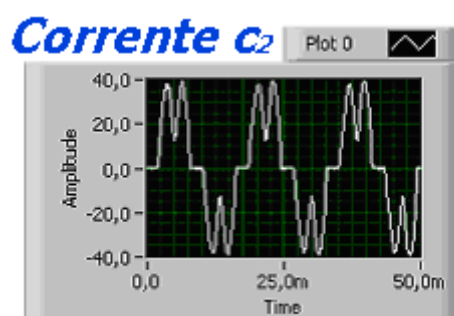


Fig. 19 Corrente na *fase c* do secundário do transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte *ca/cc* a seis diodos, com THD_{i2} igual a 40,8102%

A distorção harmônica na tensão de entrada para a configuração *back-to-back*, ilustrada na Fig. 20, é menos significativa que para a tensão de saída. Isto se deve à conexão *delta* dos transformadores filtrarem as harmônicas de ordem três e múltiplas de três.

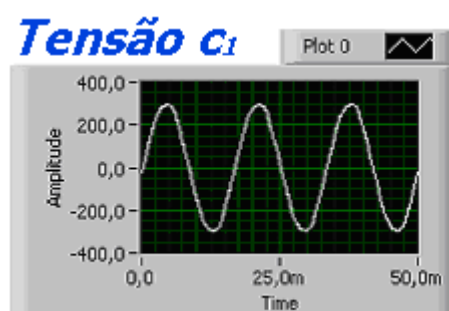


Fig.20. Tensão de entrada na *fase c* para o transformador T_1 alimentando carga não-linear composta por ponte *ca/cc* a três diodos, com THD_{v1} igual a 2,2015 %

Uma das consequências da carga não-linear da Fig. 19 é a distorção da tensão de saída na *fase c* do transformador T_2 , conforme Tabela 4 (THD_{v_2}) e Fig. 21.

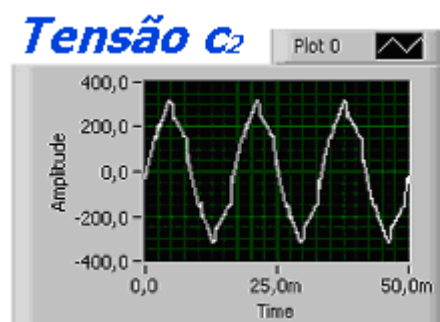


Fig.21. Tensão de saída na *fase c* para o transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte *ca/cc* a três diodos, com THD_{v_2} igual a 9,3613%

A Fig. 22 representa as formas de onda da tensão e corrente de excitações para a *fase c* do transformador T_2 , alimentando carga não-linear composta por conversor a seis diodos com filtro capacitivo. Este tipo de carga não produz grande aumento no valor *rms* da corrente de excitação. Isto por causa da carga apresentar apenas três condutores.

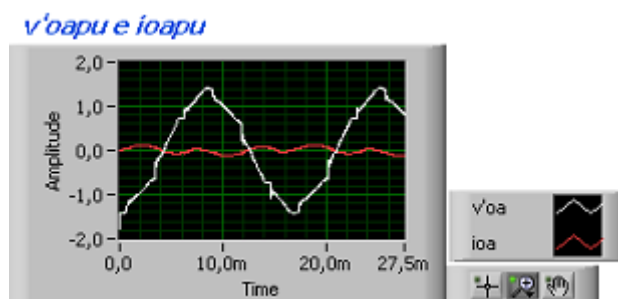


Fig. 22. Tensão e corrente de excitação do transformador T_2 na *fase c*, com THD_{v_2} igual a 12,39%..

A Tabela 4 mostra o comportamento das principais componentes harmônicas de tensão e corrente de carga relativos a baixa tensão em valores *rms*, para os dois transformadores. Este tipo de carga é em ponte *ca/cc* a seis diodos com THD_{i2} igual a 40,8102%.

Tabela 4. Harmônicas de tensões e correntes de carga e corrente de excitação para os dois transformadores, na *fase c*, com THD_{i2} igual a 40,8102%.

Ordem harmônica (h)	Tensão v_{c1} (Volts)	Corrente i_{c1} (Amperes)	Tensão v_{c2} (Volts)	Corrente i_{c2} (Amperes)
0	0.29	0.05	0.20	0.00
1	211.12	20.98	199.66	21.81
2	0.05	0.02	0.08	0.01
3	2.09	2.42	0.49	0.00
4	0.05	0.01	0.07	0.01
5	4.12	8.23	15.39	8.48
6	0.06	0.01	0.13	0.00
7	0.63	2.30	6.85	2.25
8	0.00	0.02	0.09	0.01
9	0.76	0.35	0.25	0.00
10	0.07	0.01	0.07	0.01
11	0.59	1.11	5.70	1.12

Da Tabela 4, verifica-se uma predominância de harmônicas de ordem ímpar. Isto se deve ao tipo de carga simulada neste protótipo da terceiro etapa.

4.4. Quarta Etapa – Carga não-linear composta por ponte *ca/cc* a três diodos

Nesta etapa os transformadores conectados *back-to-back* alimentam cargas não-lineares em ponte *ca/cc* composta por três diodos com variação do filtro capacitivo (C_1 , C_2 e C_3), conforme Apêndice F, Fig. 46.

A Tabela 5 mostra o comportamento da perda no núcleo (P_{NL}), perda no cobre (P_{cu}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado (P_{EC}), perda por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo referenciado (P_{EC-FHL}), potência aparente máxima (S_{MAX}), capacidade de potência ativa (RPC) e rendimento (η) para cada transformador em funções de diversos valores de FHL , THD_v , THD_i e Fator de potência (Fp), nestas condições de cargas não-lineares.

As Figuras 23 e 24 representam a perda no núcleo em função da Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i2}) e Fator de Potência de saída (Fp_{out}) para o transformador T_2 alimentando cargas não-lineares em ponte ca/cc composta por três diodos. Estas perdas se referem à Tabela 5.

Tabela 5. Perdas em transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte ca/cc composta por três diodos

Transformador	T_1			T_2		
Carga	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
FHL	3.0055	3.6275	3.5849	2.6789	4.1942	4.0626
THD_v (%)	2.1864	2.4210	2.3688	6.9963	9.5555	12.3931
THD_i (%)	61.7452	80.186	90.0891	64.7731	91.4272	108.4765
Fp	0.8242	0.7791	0.7341	0.6693	0.6088	0.5648
I_{odc} (A)	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	4.7480	4.8060	5.0639
I_{orms} (A)	6.9942	8.4778	9.3715	6.9942	8.4778	9.3715
S_{in} (kVA)	12.9210	14.3916	16.9400	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx
S_{out} (kVA)	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	14634.897	16698.42	19662.17
P_{NL} (W)	135.8977	139.0467	137.6099	149.0294	163.0237	175.6204
P_{in} (kW)	10.6488	11.2121	12.4353	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx
P_{out} (kW)	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	9.7950	10.1655	11.1044
P_{cu} (W)	261.6324	336.6806	454.8877	324.8927	427.7111	580.5605
P_{EC} (W)	6.5244	10.0070	12.7575	7.7482	12.0977	15.4492
P_{EC-FHL} (W)	8.1056	11.8533	16.1723	7.0024	13.2828	17.3881
S_{MAX} (pu)	0.9908	0.9822	0.9846	0.9953	0.9713	0.9482
RPC (%)	81.6617	76.5232	72.2795	66.6154	59.1327	53.55434
Rendimento(%)	96.2384	95.7558	95.2356	95.5490	94.6834	93.7649

Na Fig. 23 observa-se que a perda no núcleo para o transformador T_2 cresce de forma quase que quadrática em relação à Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i2}). A variação desta perda com o fator de potência aumenta com o decréscimo deste fator de potência, já que este tipo de carga gera fator de potência capacitivo. Este aumento da perda é causado devido a tensão de excitação adiantar-se em ângulo e módulo em relação à tensão de alimentação para a condição de carga linear nominal.

Esta alteração da tensão de excitação provoca também uma variação na corrente de excitação. Estes dois efeitos combinados tem como consequência uma elevação de forma quadrática nesta perda, conforme Figuras 23 e 24.

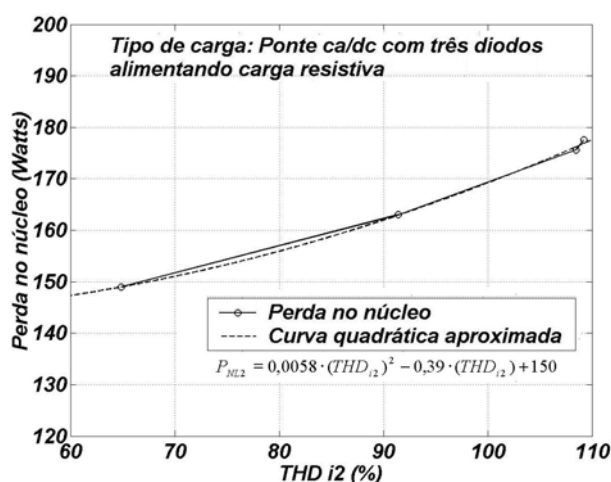


Fig. 23. Perda no núcleo em função da Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i2}).

A Fig. 24 mostra o comportamento inverso da perda no núcleo em relação à Fig. 6. Na situação da Fig. 6 a carga é indutiva, enquanto que na Fig. 24 a carga é capacitiva. Na primeira a tensão de excitação atrasa-se e, na segunda a tensão de excitação adianta-se, produzindo-se efeitos contrários.

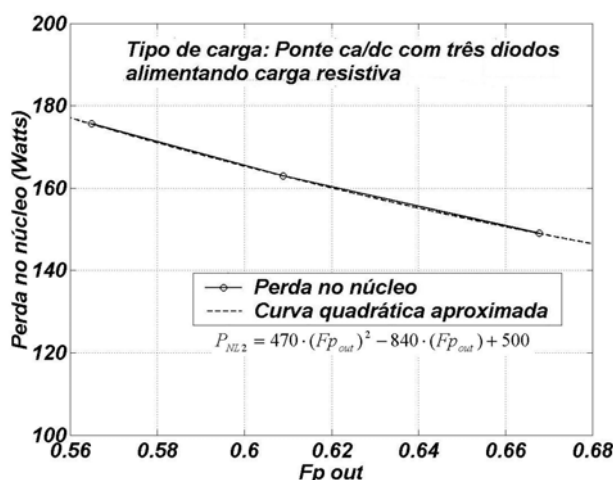


Fig. 24. Perda no núcleo para o transformador T_2 em relação ao Fator de Potência de saída (Fp_{out}).

As Figuras 25 e 26, referentes à Tabela 4, representam as perdas no núcleo em função da componente cc da corrente de excitação (I_{odc}) e também em função da própria corrente de excitação (I_{orms}), para o transformador T_2 alimentando cargas não-lineares em ponte ca/cc composta por três diodos. A corrente de excitação teve um considerável aumento em relação à condição de carga linear nominal. Uma das causas desse aumento é a corrente de carga. Esta carga não-linear apresenta um valor médio em cc bastante apreciável.

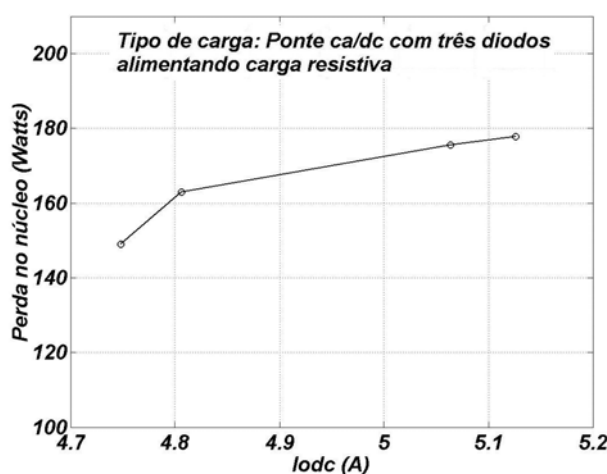


Fig. 25. Perda no núcleo em relação à componente cc da corrente de excitação (I_{occ}), para carga composta por ponte a três diodos.

A Fig. 25, referente às cargas não-lineares composta por ponte a três diodos, mostra a influência da componente *cc* da corrente de carga na excitação do transformador. Esta componente *cc* presente na corrente de excitação, provoca aumento do nível *rms* da própria corrente de excitação, aumento do ruído sonoro, magnetiza o núcleo podendo aumentar definitivamente a perda no mesmo, devido a magnetização assimétrica ali instalada. A Fig. 26 mostra a influência do aumento quadrático da perda no núcleo em função da corrente de excitação. A perda no núcleo do transformador T_2 pode parecer a priori menor que para o transformador T_1 devido seu valor de tensão *rms* ser menor, mas este não é o caso (com exceção dos transformadores a vazio). A perda no núcleo depende de outros fatores além do nível de tensão. Um destes fatores é o defasamento angular entre a tensão de excitação (*modelo T*) que gera a corrente de excitação no núcleo (v_{o1} ou v_{o2}) e a tensão de alimentação. Em outras palavras, a impedância de dispersão e o fator de potência influenciam na perda no núcleo. Outros dois fatores também importantes são o nível da corrente de excitação (que, dependendo da componente *cc*, pode vir a saturar o núcleo) e as correntes parasitas (provenientes dos fluxos dispersos gerados pelas correntes de carga não-linear). Estes efeitos combinados aumentam as perdas no núcleo.

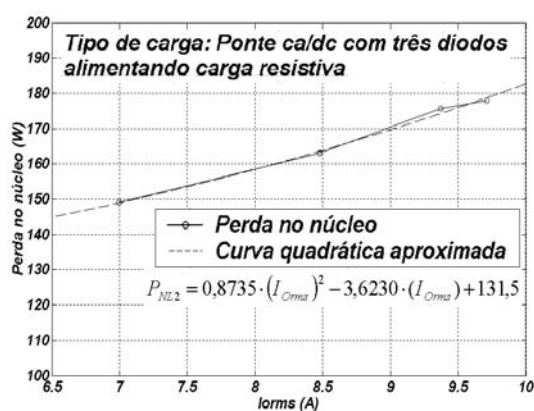


Fig. 26. Perda no núcleo em relação à corrente de excitação (I_{Orms}), para carga composta por ponte a três diodos.

As Figuras 27 a 30 referem-se à pior situação aqui analisada, ou seja, carga composta por ponte ca/cc a três diodos com valor de FHL_2 igual a 4,0626, referente à Tabela 5. A corrente na *fase c* (i_{c1}) do transformador T_1 é mostrada na Fig. 27. A corrente na *fase c* (i_{c2}) do transformador T_2 é mostrada na Fig. 28. Observa-se que o pico desta corrente atinge um valor aproximado de 90 A, sendo que a corrente nominal é 22,79 A.

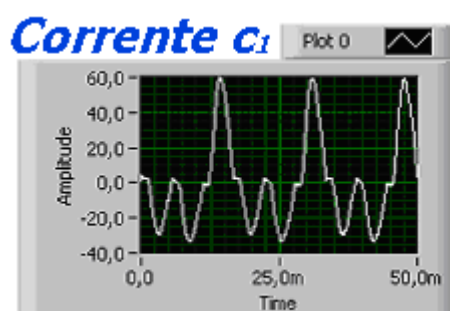


Fig. 27 Corrente na *fase c* do primário do transformador T_1 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc à três diodos, com THD_{i1} igual a 90,0891%.

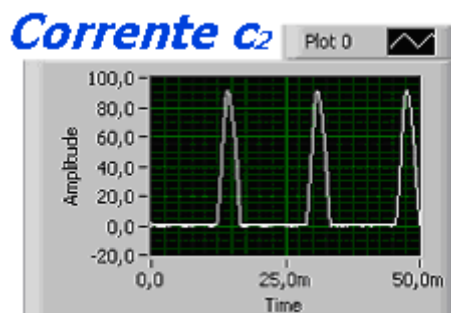


Fig. 28 Corrente na *fase c* do secundário do transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte ca/cc à três diodos, com THD_{i2} igual a 108,47%.

Uma das consequências da carga não-linear da Fig. 28 é a distorção da tensão de saída na *fase c* do transformador T_2 , conforme Tabela 5 (THD_{v2} =12.39%) e Fig. 29.

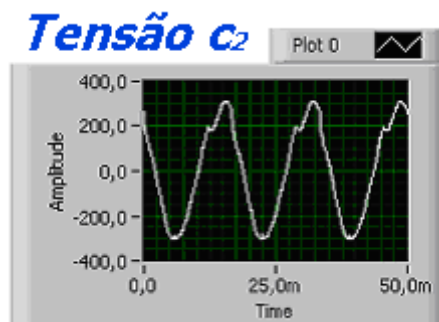


Fig.29. Tensão de saída na *fase c* para o transformador T_2 alimentando carga não-linear composta por ponte *ca/cc* a três diodos, com THD_{v2} igual a 12,39%.

A Fig. 30 representa as formas de onda da tensão e corrente de excitação para a *fase c* do transformador T_2 , alimentando carga não-linear composta por conversor a três diodos com filtro capacitivo. Este tipo de carga produz um valor *rms* na corrente de excitação bastante apreciável, ou seja, da ordem de 44% da corrente nominal do transformador, ou ainda da ordem de 627% da corrente de excitação nominal. A componente *cc* desta corrente de excitação é em torno de 22% da corrente nominal, ou em torno de 340% da corrente de excitação nominal, conforme Tabelas 1 e 5.

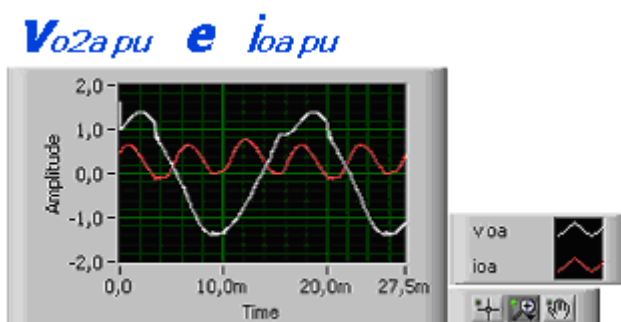


Fig. 30 . Tensão e corrente de excitação do transformador T_2 na *fase c*, com THD_{v2} igual a 12,39%..

Neste trabalho, em simulações práticas de qualquer natureza, pode-se obter até a quinquagésima harmônica. Para a situação analisada nesta quarta etapa, com THD_{i2} igual a 108,47%, mostra-se na Tabela 6 as principais componentes harmônicas de tensão e corrente de carga, bem como a corrente de excitação na *fase c* na saída do transformador T_2 .

Tabela 6. Harmônicas de tensão, corrente de carga e corrente de excitação na *fase c* do transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por três diodos, com THD_{i2} igual a 108,47%.

Ordem harmônica (h)	Tensão v_{c2} (Volts)	Corrente i_{c2} (Amperes)	Corrente i_{o_c} (Amperes)
0	-0.75	10.24	-5.08
1	205.99	19.14	5.91
2	17.84	15.77	0.37
3	8.59	11.12	0.22
4	12.75	6.32	0.18
5	10.25	2.35	0.10
6	0.43	0.20	0.05
7	3.61	1.27	0.03
8	4.89	1.23	0.02
9	1.14	0.65	0.02
10	1.30	0.26	0.02
11	2.38	0.43	0.02

Da Tabela 6, verifica-se uma predominância de harmônicas de ordem par, com exceção da primeira harmônica ou fundamental. Isto se deve ao tipo de carga simulada no protótipo desta quarta etapa.

As Figuras 31 e 32 mostram os comportamentos da perda no cobre e perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por três diodos, referentes à Tabela 5.

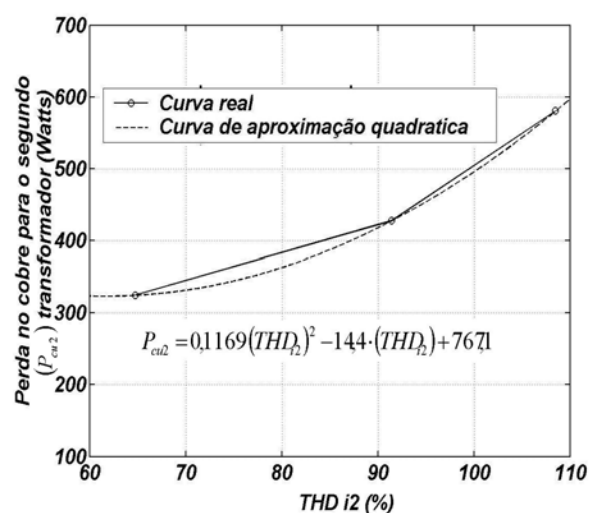


Fig. 31. Perda no cobre para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.

A perda no cobre (P_{cu}) para o transformador T_2 cresce aproximadamente com o quadrado da Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i2}), enquanto que, as perdas por correntes parasitas pelos dois métodos crescem de forma linear.

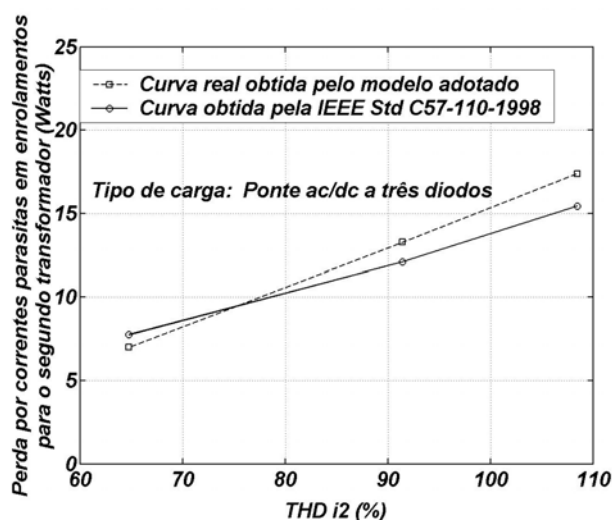


Fig. 32. Perda por correntes parasitas em enrolamentos para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.

São apresentadas na Fig. 32 as perdas por correntes parasitas em enrolamentos para o modelo adotado neste trabalho e também para o modelo referenciado [2], [4] e [10]. Para este tipo de carga, houve uma melhor aproximação dos valores destas perdas para os dois modelos, mas sempre com a mesma tendência em distanciar-se para altas frequências ou alta THD_i .

A Fig. 33 representa a potência aparente máxima (S_{MAX}) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos, referente à Tabela 5.

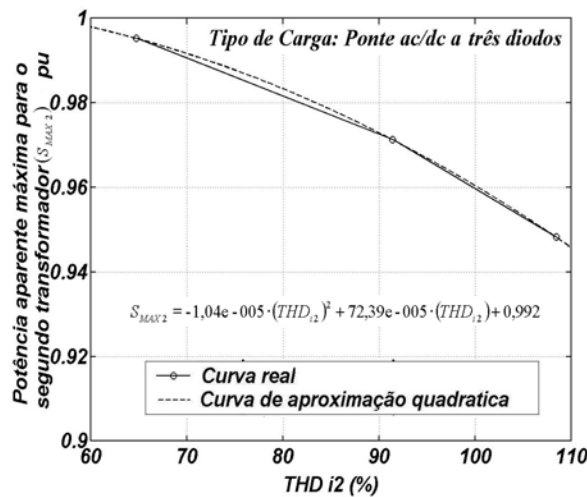


Fig. 33. Potência aparente máxima (S_{Max}) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.

A Fig. 34 mostra a capacidade de potência ativa (RPC) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos, referente à Tabela 5.

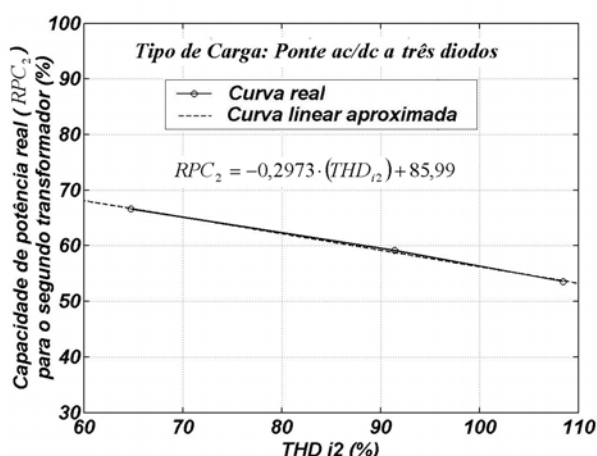


Fig. 34. Capacidade de potência ativa (RPC_2) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por três diodos.

Da Fig. 33, a potência máxima aparente (S_{Max}) decresce de forma quadrática relativo ao aumento da Distorção Harmônica Total de corrente (THD_{i_2}), para o transformador T_2 . Enquanto que, a capacidade de potência ativa decresce praticamente de forma linear com o aumento da THD_{i_2} .

Devido ao fato do uso deste tipo de carga, já se inicia na simulação prática uma redução da potência ativa de 33,3% da potência ativa nominal para as condições de carga linear. Para a situação mais crítica aqui analisada, chega-se a uma redução de 46,5% da potência ativa nominal, referente à carga não-linear a três diodos, conforme Tabela 5 e Fig. 34.

Finalmente, a Fig. 35 mostra o rendimento (η) do transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* a três diodos. Com o aumento quadrático das perdas no cobre e núcleo, conforme Figuras 23 e 31, o rendimento, como se esperava, decresce de forma quadrática em relação ao aumento da THD_{i_2} .

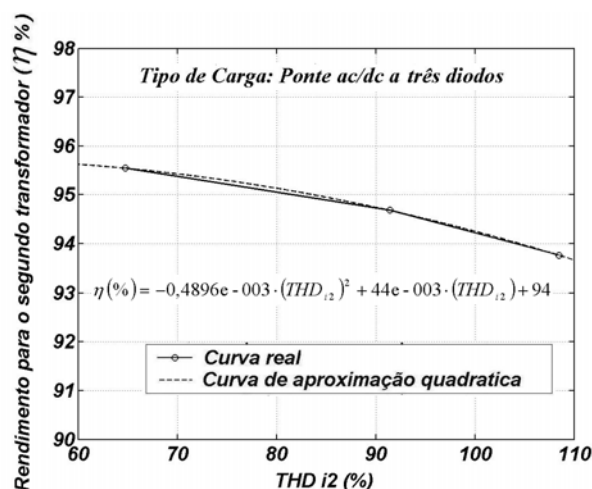


Fig. 35. Rendimento (η) para o transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte ca/cc composta por três diodos.

4.5. Corrente de Neutro

A presença da componente cc e componentes harmônicas múltiplas de três na corrente de carga não-senoidal, introduz correntes de seqüência zero no barramento neutro em transformadores conectados em Y . Neste caso, faz-se necessário consultas a fabricantes de transformadores, no sentido de esclarecer sobre a capacidade de condução da corrente de neutro do transformador, pois tais transformadores, na verdade, são dimensionados para cargas lineares.

Em situações em que transformadores alimentam cargas não-lineares, dependendo da intensidade destas componentes harmônicas, poderá haver um sobre-aquecimento desta barra neutra. Diante disto, recomenda-se a medição da amplitude desta corrente de seqüência zero para, se necessário, redimensionar este condutor.

Em tais circunstâncias, faz-se necessário sobre-dimensionar o neutro. É comum, duplicar a capacidade de corrente da barra neutra em relação à corrente de fase [4]. Neste trabalho, foram simuladas na prática, situações críticas. A Fig. 36 mostra a corrente de neutro de uma destas situações. Esta corrente é referente à medição no transformador T_2 da configuração *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* a três diodos (quarta etapa). Observa-se nesta figura, que o pico de corrente chega a 90 A. O valor *rms* desta corrente atinge 63,63 A. A corrente nominal deste transformador é 22,79 A. Neste caso, justifica-se triplicar a capacidade de corrente do condutor de neutro em relação à capacidade do condutor de fase.

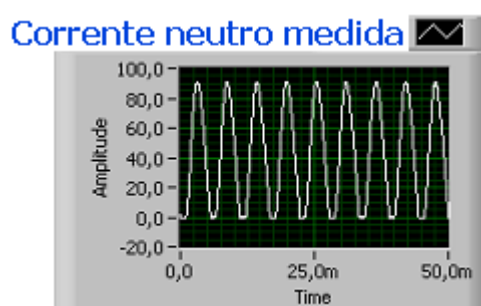


Fig. 36. Corrente de neutro do transformador T_2 alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por três diodos.

Para a simulação prática referente ainda à quarta etapa, houve uma comparação entre o valor calculado da corrente de neutro com o valor medido desta mesma corrente. Observa-se que, as formas de onda bem como os valores *rms* referentes a estas duas correntes foram idênticas (com erro de 0%).

O cálculo da corrente de neutro é tomado como sendo o somatório das correntes instantâneas das três fases.

5. COMPARAÇÃO ENTRE AS PERDAS NO NÚCLEO E NO COBRE OBTIDAS ATRAVÉS DO MODELO ADOTADO E DO MODELO REFERENCIADO

É interessante comparar os resultados da modelagem adotada neste trabalho (modelo T para transformadores) com a usada internacionalmente (modelo L para transformadores), conforme [2], [4] e [10].

Foram realizadas simulações práticas com transformadores alimentando carga linear com fator de potência unitário, bem como, cargas não-lineares em ponte ca/cc a seis e a três diodos.

A Tabela 7 apresenta as perdas totais no núcleo e cobre em função da THD_{i2} para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga linear, considerando-se o modelo adotado neste trabalho e também, o modelo usado nas referências [2], [4] e [10], conforme equações (3.37), (3.38) e (3.39).

Tabela 7 . Comparação dos métodos para os cálculos das perdas no núcleo e cobre com carga linear nominal.

	Modelo Adotado	Modelo Referenciado	Erro(%)
THD_{i2} (%)	2.88	2.88	0
$P_{NLTotal}$ (W)	250.13	252.11	0.79
$P_{cuTotal}$ (W)	713.72	711.75	0.27
Σ (W)	963.85	963.86	0

As perdas no núcleo e no cobre totais para os dois transformadores alimentando carga linear nominal são basicamente as mesmas. Isto se explica pelo fato de que, na simulação prática, a carga apresenta fator de potência unitário. Com isto, a variação no defasamento angular entre a tensão de excitação e a tensão de alimentação é pequena.

O erro calculado para todas as situações de cargas tem como base as perdas nominais no núcleo e cobre para os transformadores alimentando carga linear nominal.

A Tabela 8 apresenta as perdas totais no núcleo e cobre em função da THD_{i2} para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* a seis diodos, considerando-se o modelo adotado neste trabalho e também, o modelo usado nas referências.

Tabela 8 . Comparação dos métodos para os cálculos das perdas no núcleo e cobre com carga não-linear em ponte *ca/cc* a seis diodos.

	Modelo Adotado	Modelo Referenciado	Erro(%)	Modelo Adotado	Modelo Referenciado	Erro(%)
THD_{i2} (%)	37.65	37.65	0	40.81	40.81	0
P_{NLTot} (W)	234.70	236.94	-0.89	238.53	240.71	-0.87
P_{cuTot} (W)	747.32	745.14	0.30	773.40	771.08	0.32
Σ (W)	982.02	982.08	0.01	1011.93	1011.79	0.01

A Fig. 37 representa as perdas totais no núcleo para os dois transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte *ca/cc* a seis diodos, referente à Tabela 8. A pequena diferença observada entre as perdas

relativas dos dois métodos se deve ao fato das utilizações do modelo T (adotado neste trabalho) e o modelo L (adotado nas referências).

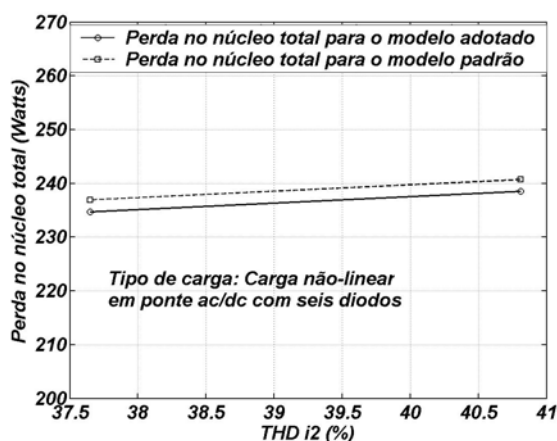


Fig. 37 Perda no núcleo total para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por seis diodos.

A perda no núcleo total para o modelo adotado é menor que a perda no núcleo para o modelo referenciado. Isto se deve ao tipo de carga alimentada pelos transformadores que, neste caso, é capacitiva leve. Nesta situação, a tensão de excitação (modelo T) adianta-se um pouco em relação à tensão de alimentação do transformador, ao passo que, a tensão de excitação para o modelo L , além de adiantar-se mais que a primeira, apresenta um nível de amplitude maior. Desta forma, o valor médio do produto da tensão de excitação pela corrente de excitação para o modelo adotado é um pouco menor que o valor médio do produto da tensão de excitação (modelo L) pelo produto desta mesma corrente de excitação para o modelo referenciado [4].

A Fig. 38 representa as perdas no cobre relativas aos dois métodos para os dois transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte *ca/cc* a seis diodos. Estas perdas crescem com o quadrado da corrente de carga e, pelo gráfico, observa-se também uma tendência de aumento destas perdas em relação à THD_{i2} . O erro também é pequeno, devido ao tipo de carga e fator de potência acima de 0.89 capacitivo.

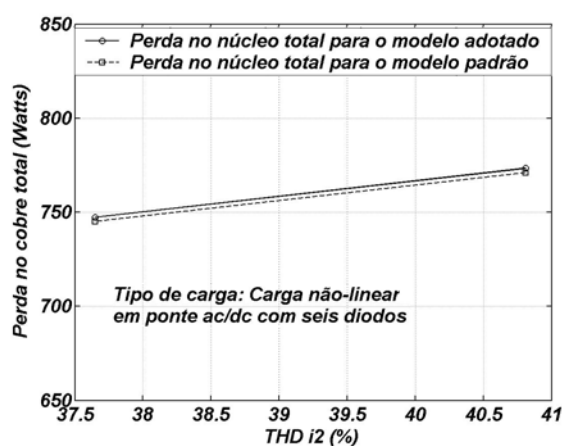


Fig. 38 Perda no cobre total para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por seis diodos.

A Tabela 9 apresenta as perdas totais no núcleo e cobre em função da THD_{i2} para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando cargas não-lineares em ponte *ca/cc* a três diodos, considerando-se o modelo adotado neste trabalho e também, o modelo usado nas referências.

Tabela 9 . Comparação dos métodos para os cálculos das perdas no núcleo e cobre com carga não-linear em ponte *ca/cc* a três diodos.

Método	Adotado	Ref.	Erro(%)	Adotado	Ref.	Erro(%)	Adotado	Ref.	Erro(%)
THD_{i2} (%)	64.71	64.71	0	91.42	91.42	0	108.47	108.47	0
P_{NLTot} (W)	260.32	301.66	-16.53	282.00	341.45	-23.77	295.49	368.51	-29.19
P_{cuTot} (W)	576.53	535.09	5.81	764.39	705.22	8.29	1035.45	962.31	10.25
Σ (W)	836.85	836.75	0.01	1046.39	1046.67	0.02	1330.94	1330.82	0.01

A Fig. 39 representa as perdas totais no núcleo para os dois transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte *ca/cc* a três diodos, referente à Tabela 9. A grande diferença observada entre as perdas relativas dos dois métodos se deve ao fato das utilizações do modelo *T* (adotado neste trabalho) e o modelo *L* (adotado nas referências), para este tipo de carga.

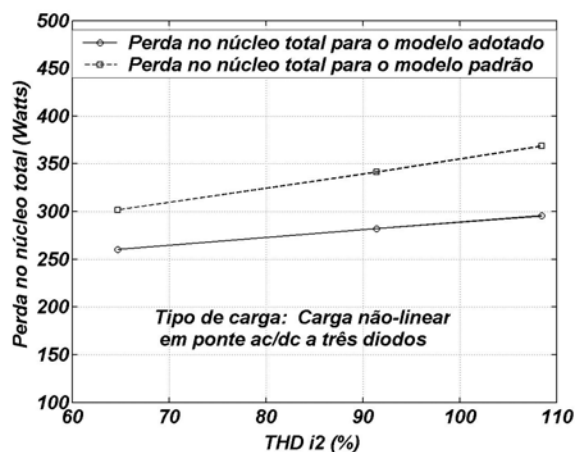


Fig. 39 Perda no núcleo total para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por três diodos.

A perda no núcleo total para o modelo desenvolvido neste trabalho é bem menor que a perda no núcleo para o modelo referenciado. Isto se deve ao tipo de carga alimentada pelos transformadores que, neste caso é capacitiva forte, bem com às respectivas modelagens. Nesta situação, a tensão de excitação para a modelagem T adianta-se em relação à tensão de alimentação do transformador para a condição de carga linear nominal. Com este avanço, o valor médio do produto desta tensão pela corrente de excitação aumenta, mas não o suficiente para superar o valor calculado desta perda pelo modelo L . Isto se explica pelo fato da tensão de excitação para o modelo L apresentar uma amplitude maior do que aquela da tensão de excitação para o modelo T , nesta condição de carga.

Quando se fala em perdas no núcleo, não se pode dizer que estas são constantes e determinadas pela tensão de entrada. O tipo de carga com o seu respectivo fator de potência influenciam de maneira fundamental no valor desta perda.

A Fig. 40 representa as perdas no cobre para os dois transformadores alimentando cargas não-lineares em ponte ca/cc a três diodos. Estas perdas crescem com o quadrado da corrente de carga e pelo gráfico, observa-se também uma tendência de aumento quadrático destas perdas em relação à THD_{i2} . Quando se fala em perdas no cobre, o comportamento destas perdas em relação à THD_{i2} depende fundamentalmente do tipo de carga e de suas variações. Nesta simulação prática para os dois tipos de cargas não-lineares, obteve-se comportamentos diferentes, ou seja, aumento linear para carga em ponte ca/cc a seis diodos (Fig. 14) e aumento quadrático para carga em ponte ca/cc a três diodos (Figuras 31 e 39).

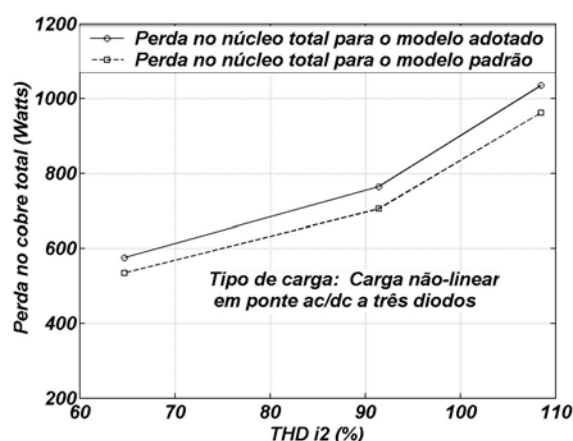


Fig. 40. Perda no cobre total para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* composta por três diodos.

A Figura 41 mostra o comportamento do erro percentual das perdas no núcleo e cobre para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* a três diodos. A parte negativa do erro relativo à perda no núcleo e positiva para a perda no cobre se deve ao fato que as perdas para o modelo adotado é tomado como referência.

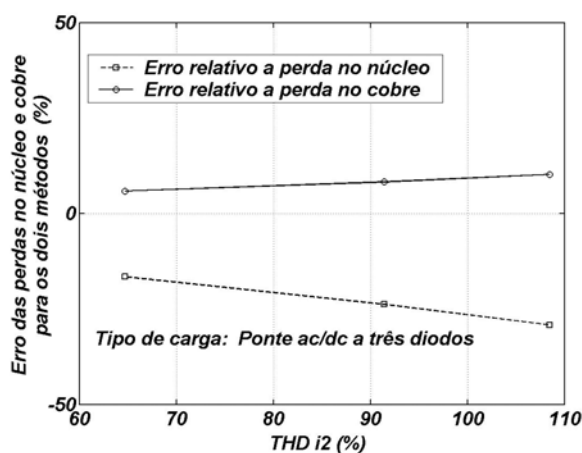


Fig. 41. Erros (%) relativos às Perdas no núcleo e cobre para os dois transformadores alimentando cargas não-lineares a três diodos, utilizando-se os dois métodos.

Verifica-se pela Fig. 41 uma tendência de aumento linear dos erros nos cálculos das perdas no núcleo e cobre com o aumento da THD_{i2} . De um modo geral, dependendo do tipo de carga, cálculos da perda núcleo e cobre para transformadores alimentando cargas não-lineares pelo método referenciado [2], [4] e [10] pode levar a erros grosseiros (30%), conforme exemplos apresentadas nas Figuras de 37 a 39.

Os cálculos das perdas no núcleo e no cobre pelo método referenciado [2], [4] e [10] pode causar sobre-dimensionamento para perda no núcleo e sub-dimensionamento para perda no cobre.

6. CONCLUSÃO

Devido a Distorção Harmônica Total da corrente de excitação (THD_{io}), para os transformadores operando a vazio, há um aumento na resistência efetiva de dispersão. Isto tem como consequência, uma perda de aproximadamente 5% da perda nominal no núcleo nesta resistência de dispersão.

A perda no núcleo depende de outros fatores além do nível de tensão. Um destes fatores é o defasamento angular entre a tensão de excitação e a corrente de excitação. Em outras palavras, a impedância de dispersão, o tipo de carga e o fator de potência influenciam na perda no núcleo. Outros dois fatores também importantes são o nível da corrente de excitação (que, dependendo da componente cc , pode vir a saturar o núcleo) e as correntes parasitas (provenientes dos fluxos dispersos gerados pelas correntes de carga não-linear). Estes efeitos combinados aumentam a perda no núcleo.

A perda no núcleo para transformadores alimentando cargas do tipo conversor a seis diodos apresenta basicamente duas situações. Uma quando a ponte esta conectada a um filtro capacitivo e a outra quando não está. Independentemente destas duas situações, a perda no núcleo não sofre grandes flutuações de valores para este tipo de carga. A perda no cobre apresenta aumento linear com a variação da THD_{i2} . A perda máxima no cobre teve um aumento de 13,3%. E, a capacidade de potência ativa teve uma redução final de 13,05%.

As perdas do núcleo e no cobre aumentaram de forma quadrática com a variação da THD_{i2} , para transformadores alimentando cargas não-lineares composta por conversor a três diodos. Para este tipo de carga houve um aumento acentuado na corrente de excitação. O patamar máximo atingido foi de 44% da corrente nominal. A capacidade da potência ativa teve uma redução final de 46%.

A perda por correntes parasitas em enrolamentos (P_{EC-FHL}) calculada pelo modelo referenciado (*IEEE Std C57-110-1998*) é mais conservativa do que a adotada neste trabalho. O modelo referenciado considera que estas perdas variam com o quadrado da componente harmônica de corrente e também com o quadrado da respectiva ordem harmônica. Sabe-se que para altas frequências os fluxos dispersos não atingem totalmente os enrolamentos e nem o núcleo.

A presença da componente *cc* e componentes harmônicas múltiplas de três na corrente de carga não-senoidal, introduz correntes de seqüência zero no barramento neutro em transformadores conectados em Y. Para a pior situação simulada, a corrente de neutro atingiu aproximadamente 280 % da corrente nominal. Neste caso, justifica-se triplicar a capacidade de corrente do condutor neutro em relação à capacidade do condutor fase.

O erro percentual entre os dois modelos no que se refere aos cálculos das perdas no núcleo e cobre para os dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando carga não-linear em ponte *ca/cc* a três diodos é bastante acentuada. Na verdade, o modelo referenciado sobre-dimensiona a perda no núcleo e sub-dimensiona a perda no cobre. De um modo geral, dependendo do tipo de carga, cálculos da perda núcleo e cobre para transformadores

alimentando cargas não-lineares pelo método referenciado, pode levar a erros grosseiros. Para a situação mais crítica aqui analisada, o erro é de aproximadamente 30%.

Durante todas as simulações práticas para as etapas um, dois e três foi instalado também um outro sistema de medição paralelo referente aos cálculos das potências aparentes e ativas de entrada e saída para a configuração dos dois transformadores conectados *back-to-back*. Este equipamento é o *DRANETZ-BMI*. O erro entre o sistema de medição desenvolvido neste trabalho e o *DRANETZ-BMI* no que se refere aos cálculos destas potências foi de 0,5 %. Com relação as variáveis tensões e correntes medidas, o erro é menor que 0,05%.

Deste trabalho sugere-se que sejam elaborados procedimentos normalizados que impeçam o uso de equipamentos danosos e poluidores ao sistema de energia elétrica, principalmente esta ponte *ca/cc* à três diodos, bastante difundida, devido seu custo inicial ser reduzido. Como projeto futuro pretendemos analisar outros tipos de cargas, tais como outros conversores, computadores, cargas residenciais, comerciais, etc.

7. APÊNDICES

A. Dados dos transformadores

A.1. Dados de placa

Transformadores Trifásicos imersos em óleo mineral cujos números de séries são: 6266 e 6267, cujos dados de placa são :13,8/0,38 kV, 60 Hz, 15 kVA, temperatura de operação igual a 50 °C e conexão Delta-Y.

A.2. Indutância de dispersão (L_{ac})

O ensaio em curto-circuito [5] foi realizado com equipamento analisador de energia elétrica de alta precisão (**DRANETZ-BMI**). Deste ensaio obteve-se como valor médio das indutâncias de dispersões por fase para cada transformador (L_{ac}) e, referido à baixa tensão o valor de:

$$L_{ac1médio} = L_{ac2médio} = L_{ac} = 0,5087 \text{ mH}$$

A.3. Resistência em corrente contínua (R_{dc})

Do Ensaio de Resistência dos Enrolamentos em corrente contínua obteve-se o valor de $R_{dcmédio}$ por fase para cada transformador. O procedimento

adotado está de acordo com a conexão do mesmo e, obedece a seguinte seqüência de cálculos:

a) Conexão Delta

O valor médio da resistência cc para a conexão delta é dado pela equação (6.1).

$$R_{dc\Delta\text{médio}} = \frac{3}{2} \cdot \sum \frac{(R_{dc-AB} + R_{dc-BC} + R_{dc-CA})}{3} \quad (6.1)$$

Onde,

R_{dc-AB} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais AB.

R_{dc-BC} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais BC.

R_{dc-CA} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais CA.

O valor de $R_{dc\Delta\text{médio}}$ deverá ser modificado para conexão Y pela transformação de impedâncias Δ - Y , uma vez que, o modelo adotado para todo sistema de medição é o Y . O valor desta transformação ($R_{dc\Delta-y}$) é o resultado da divisão da equação (6.1) por três, conforme equação (6.2).

$$R_{dc\Delta-y} = \frac{1}{3} \cdot R_{dc\Delta\text{médio}} \quad (6.2)$$

b) Conexão Y

O valor médio da resistência cc para a conexão Y é dado pela equação (6.3).

$$R_{dcymédio} = \frac{1}{2} \cdot \sum \frac{(R_{dc-ab} + R_{dc-bc} + R_{dc-ca})}{3} \quad (6.3)$$

onde,

R_{dc-ab} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais ab.

R_{dc-bc} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais bc.

R_{dc-ca} - Resistência equivalente em cc vista dos terminais ca.

O valor da resistência em cc equivalente referida à baixa tensão (*conexão Y*) será determinado pela soma de $R_{dcYmédio}$ mais o valor de $R_{dc\Delta-Y}$ referido à baixa tensão. As tabelas 10 e 11 mostram os valores encontrados pelos ensaios de resistências dos enrolamentos em cc na temperatura de 25 °C para as resistências em cc nas conexões Δ (alta tensão) e Y (baixa tensão). Foi utilizada um medidor de resistência em cc de alta precisão (FLUKE 8508A REFERENCE MULTIMETER).

Tabela 10. Resistência dos enrolamentos em cc para o transformador T₁

R_{dc-AB}	292,2000	R_{dc-ab}	0,1780
R_{dc-BC}	290,1000	R_{dc-bc}	0,1780
R_{dc-CA}	289,8000	R_{dc-ca}	0,1790
\sum	872,1000	\sum	0,5350
Conexão Δ		Conexão Y	

Tabela 11. Resistência dos enrolamentos em cc para o transformador T_2

R_{dc-AB}	289,1000	R_{dc-ab}	0,1850
R_{dc-BC}	289,5000	R_{dc-bc}	0,1860
R_{dc-CA}	289,2000	R_{dc-ca}	0,1860
\sum	867,8000	\sum	0,5570
Conexão Δ		Conexão Y	

O valor da resistência equivalente em cc referida à baixa tensão (conexão Y) será determinado pela soma de $R_{dcY\text{médio}}$ mais o valor de R_{dcA-Y} .

O valor adotado nas simulações práticas será o valor médio entre os dois transformadores, já que estes valores são quase idênticos. Para o transformador T_1 o valor de $R_{dc\text{médio}}$ é 0,2025 Ohms. Para o transformador T_2 o valor de $R_{dc\text{médio}}$ é 0,1993 Ohms. Quando se adota o valor médio entre os dois transformadores, o erro cometido é de aproximadamente de 0,75%.

Finalmente, o valor médio da resistência equivalente em cc (R_{dc}) referido à baixa tensão por fase na temperatura de ensaio (T_{ensaio}) é:

$$R_{dc} = 0,2009 \Omega$$

A.4. Correção da resistência cc em função da perda e temperatura

A correção da resistência em cc em função da temperatura, depende do comportamento da temperatura do transformador em função da perda total.

A equação (6.4) determina a elevação de temperatura do nível do óleo (ΔT_{op}) em relação à temperatura ambiente (T_{amb}) para transformadores alimentando cargas não-lineares [3] e, as equações (6.5) e (6.6) calculam a temperatura de operação (T_{op}) e o valor da resistência em *cc* (R_{dcTop}) nesta temperatura [9] e [10].

$$\Delta T_{op} = \Delta T_{op-R} \cdot \left(\frac{P_{NL} + P_{cu}}{P_{NL-R} + P_{cu-R}} \right)^{0,8} \quad (6.4)$$

$$T_{op} = \Delta T_{op} + T_{amb} \quad (6.5)$$

$$R_{dcTop} = R_{dc} \cdot \frac{(50 + \beta)}{(T_{op} + \beta)} \quad (6.6)$$

Onde,

ΔT_{op-R} é a elevação de temperatura do nível do óleo em relação à temperatura ambiente (T_{amb}) para transformadores operando em condições de carga linear e nominal e, β é uma constante de temperatura e depende do tipo de condutor. Para o cobre $\beta = 234,5$ °C.

A.5. Modelo T

Para o Modelo T , considera-se que a indutância dispersão da baixa tensão é igual a indutância de dispersão da alta tensão e vale a metade do valor da indutância de dispersão do modelo L , conforme Fig.2 . A resistência *ca* da

baixa tensão ($R_{acbaixa}$) é composta pela resistência em *cc* da baixa tensão ($R_{dcYmedio}$) mais a metade do valor da resistência por correntes parasitas em enrolamentos (R_{ECef}) referente ao modelo *L*. De forma semelhante, a resistência *ac* da alta tensão é determinada pela resistência em *cc* da alta tensão mais a metade do valor da resistência por correntes parasitas em enrolamentos (R_{ECef}) referente ao modelo *L*. As equações (6.7) e (6.8) mostram estas duas resistências para a composição do modelo *T*.

$$R_{acbaixa} = R_{dcYmedio} + \frac{1}{2} \cdot R_{ECefi} \quad (6.7)$$

$$R_{acalta} = R_{dc\Delta-Y} + \frac{1}{2} \cdot R_{ECefi} \quad (6.8)$$

B. Transdutores utilizados e Placa de Aquisição de Dados (DAQ)

Com a utilização de dois transformadores trifásicos conectados *back-to-back*, Fig. 1, realiza-se as medições pelos lados de baixas tensões, com utilizações de transdutores de tensão e corrente do tipo compensado em malha fechada de alta precisão, conforme tabela 5. Com este procedimento elimina-se medições através de transformadores de potencial e de corrente, bem como de divisores de tensão e corrente na aquisição de dados. A consequência disso é a diminuição dos erros nas medições das próprias correntes e tensões.

B.1. Precisão dos sensores

A precisão dos sensores de tensão e corrente e seus respectivos fundos de escala são mostrados na tabela 12.

Tabela 12. Precisão dos sensores

<i>Sensor</i>	<i>Escala (V)</i>	<i>Erro%</i>	<i>Sensor</i>	<i>Escala (A)</i>	<i>Erro%</i>
v_{11}	0-500	0,2	i_{11}	0-75	0,1
v_{12}	0-500	0,2	i_{12}	0-75	0,1
v_{13}	0-500	0,2	i_{13}	0-75	0,1
v_{21}	0-500	0,2	i_{21}	0-75	0,1
v_{22}	0-500	0,2	i_{22}	0-75	0,1
v_{23}	0-500	0,2	i_{23}	0-75	0,1
xxx	xxx	xxx	i_N	0-75	0,1

B.2. Amostragem dos dados

As medidas são feitas através do Conversor Analógico-Digital (ADC) em uma Placa de Aquisição de Dados (DAQ) de 12 bits. Esta placa apresenta 68 pinos com 16 canais disponíveis. Para as medições deste trabalho utilizam-se 13 canais com frequência de amostragem de 20kS/s (Samples per second). A cada 2s adquire-se 40000 amostras. Isto equivale a dizer que, para cada período do sinal amostrado tem-se 333,3 pontos amostrados. Um período do sinal medido de 60 Hz corresponde a 16,7ms e o tempo entre duas medidas

consecutivas é: $(0,0167s)/333,3 = 50\mu s$. De acordo com critério de Nyquist o período da máxima harmônica amostrada corretamente é $T_h = 50 \times 3 = 150\mu s$. Nesta situação a máxima frequência harmônica é calculada por:

$$f_h = 6666 \text{ Hz}, \quad \frac{6666 \text{ Hz}}{60} = 111th$$

A tabela 13 apresenta as larguras de faixa dos Transdutores e Placa de Aquisição de Dados (DAQ).

Tabela 13. Largura de Faixa dos transdutores e Placa de Aquisição de Dados

Largura de Faixa (Bandwidth)		
Transdutores		Placa de Aquisição de Dados PCI-MIO-16E-1
Corrente	Tensão	
cc – 500 kHz	cc – 300 kHz	cc – 1MHz

C. Perdas em dois transformadores trifásicos conectados *back-to-back* e potências aparentes máximas (S_{1MAX} e S_{2MAX})

A Perda total por fase de dois transformadores conectados *back-to-back* de acordo com o circuito equivalente e por fase relativo à Fig. 3, é dado pela diferença entre as potências de entrada e saída também por fase, conforme equação (6.9).

$$P_{Totali} = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{1i} \cdot i_{1i} - v_{2i} \cdot i_{2i}) \cdot dt \quad (6.9)$$

A equação (6.9) pode ser modificada e expressa pela equação (6.10), conforme [1], [3] e [12].

$$P_{Totali} = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{1i} \cdot (i_{1i} - i_{2i}) + i_{2i} \cdot (v_{1i} - v_{2i})) \cdot dt \quad (6.10)$$

Sabe-se que, pelo circuito equivalente da Fig. 3 as tensões v_{1i} e v_{2i} são dadas pelas equações (6.11) e (6.12).

$$v_{1i} = v_{o1i} + R_{acbaoxa} \cdot i_{1i} + \frac{L_{acef}}{2} \cdot \frac{di_{1i}}{dt} \quad (6.11)$$

$$v_{2i} = v_{o2i} - R_{acbaoxa} \cdot i_{2i} - \frac{L_{acef}}{2} \cdot \frac{di_{2i}}{dt} \quad (6.12)$$

Substituindo-se as equações (6.11) e (6.12) na equação (6.10), obtém-se uma expressão geral das perdas no núcleo e cobre para os dois transformadores conectados em *back-to-back*. A equação (6.13) representa estas perdas individualizadas.

$$P_{Total} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{v_{o1i} \cdot (i_{1i} - i_{2i})}{2} + \frac{v_{o2i} \cdot (i_{1i} - i_{2i})}{2} + \right) \cdot dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left(R_{acbaoxa} \cdot i_{1i}^2 + R_{acbaoxa} \cdot i_{2i}^2 + \frac{1}{2} \cdot (v_{o1i} - v_{o2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \right) dt \quad (6.13)$$

A perda no núcleo para o primeiro transformador é dado pelo primeiro termo do segundo membro da equação (6.13), conforme equação (3.8). A perda no núcleo para o segundo transformador é dado pelo segundo termo do segundo membro da equação (3.10). A perda no cobre para o primeiro transformador é dado pelo terceiro termo mais pela metade do quinto termo do segundo membro da equação (6.13), conforme equação (6.14). A perda no cobre para o segundo transformador é dado pelo quarto termo mais pela metade do quinto termo do segundo membro da equação (6.13), conforme equação (6.16).

A expressão matemática do quinto termo do segundo membro representa a perda no cobre por fase da alta tensão para os dois transformadores conectados *back-to-back*, pois a queda de tensão na alta tensão é dado pela diferença entre as tensões v_{o1i} e v_{o2i} e, a corrente na alta tensão é dada pela média entre as correntes i_{1i} e i_{2i} .

As potências aparentes máximas (S_{1MAX} e S_{2MAX}) para os dois transformadores configurados *back-to-back* alimentando cargas não-lineares é o Derating_s multiplicado pela potência aparente nominal. As potências máximas são dadas pelas equações (6.14) e (6.15).

$$S_{1MA} = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_{1MAX} \quad (6.14)$$

$$S_{2MA} = \sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_{2MAX} \quad (6.15)$$

Toma-se como base para os dois transformadores, as suas respectivas potências aparentes nominais (S_{1R} e S_{2R}), dadas pelas equações (6.16) e (6.17),

onde I_{1R} e I_{2R} são as correntes nominais para os dois transformadores. Estas potências e correntes são iguais, e valem S_R e I_R respectivamente.

$$S_{1R} = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_{1R} \quad (6.16)$$

$$S_{2R} = \sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_{2R} \quad (6.17)$$

Dividindo-se as equações (6.14) e (6.15) pela potência aparente nominal relativo a cada transformador, obtém-se as equações (6.35) e (6.36).

D. Fotografias do Protótipo

A Foto 1, é a representação física dos dois transformadores conectados *back-to-back*. A Foto 2, mostra os transdutores de tensões, correntes, bloco conector e fonte simétrica *cc*. Esta fonte simétrica alimenta os transdutores com uma tensão de ± 15 V. A Foto 3, refere-se ao computador digital que está conectado aos transdutores via placa de aquisição de dados e bloco conector. A Foto 4, exibe o protótipo em operação. A Foto 5, apresenta a carga resistiva trifásica. A Foto 6, representa os transdutores, varivolt, carga resistiva e sala de teste dos transformadores. A Foto 7 refere-se ao analisador de energia *DRANETZ-BMI*. E, a Foto 8 mostra o medidor de precisão de tensão, corrente, potência temperatura e resistência *FLUKE 8508A REFERENCE MULTIMETER*.



Foto 1. Configuração *back-to-back* de dois transformadores trifásicos Δ -Y.

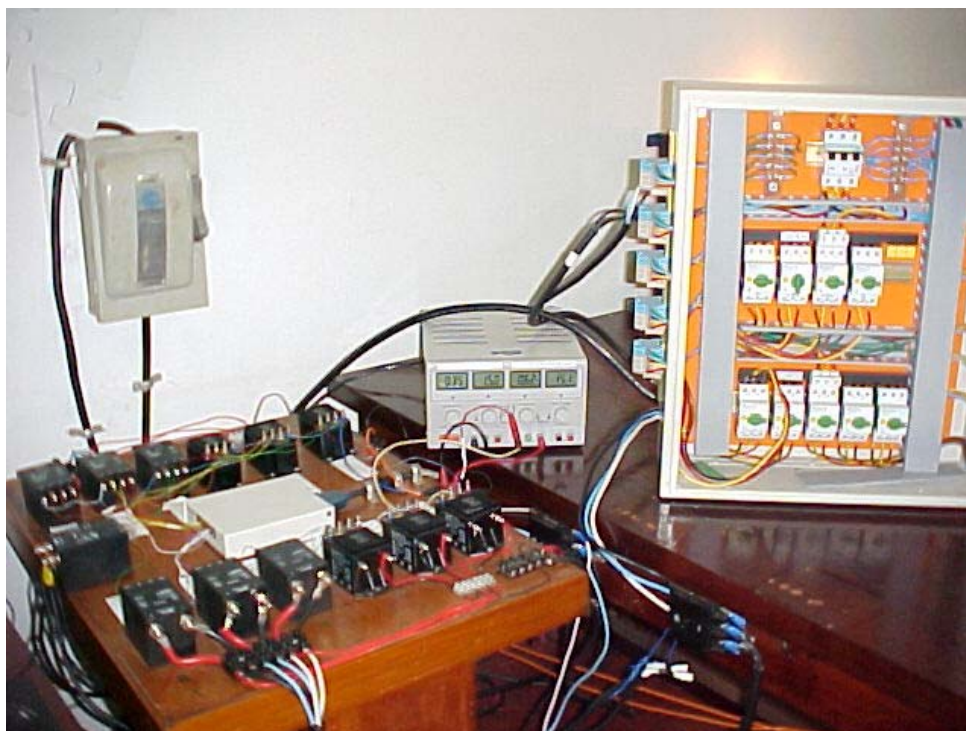


Foto 2. Transdutores de tensões e correntes, bloco conector, Caixa de distribuição, Chave blindada e fonte simétrica cc.

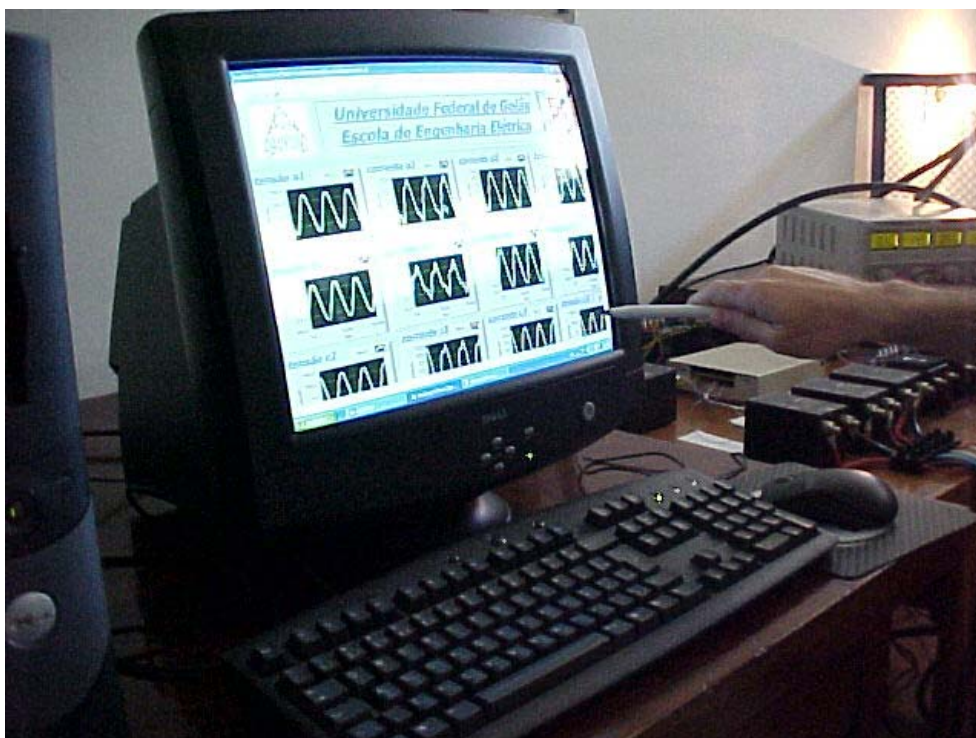


Foto 3. Computador digital conectado aos transdutores via placa de aquisição de dados e bloco conector.

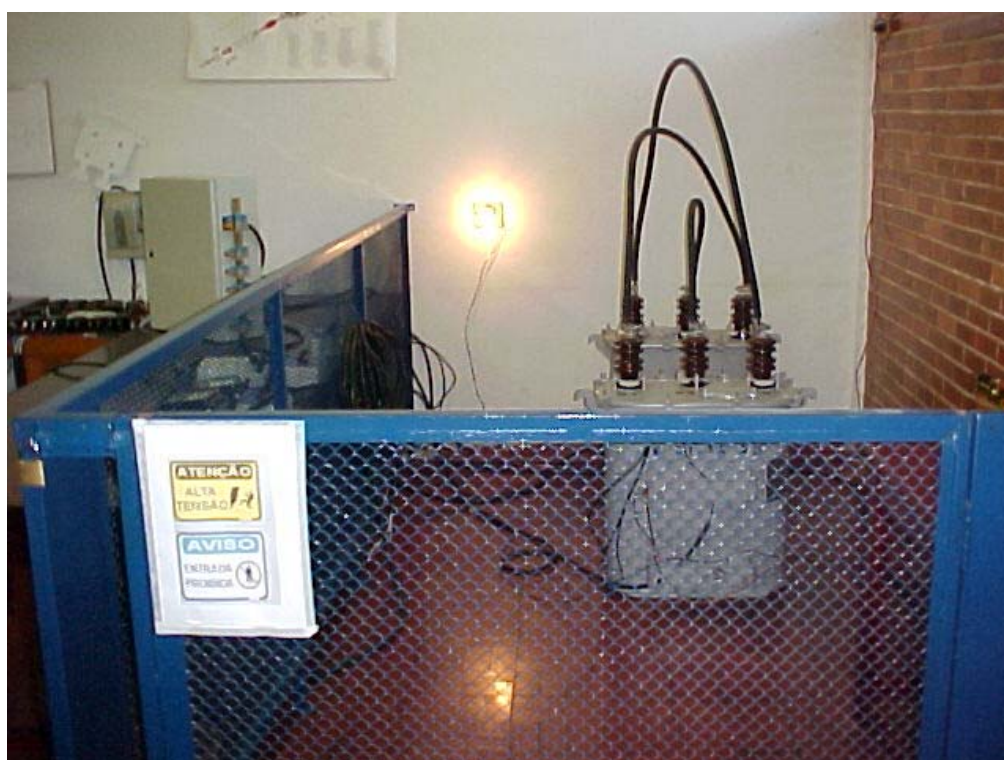


Foto 4. Protótipo de simulação em operação.



Foto 5. Carga resistiva trifásica.



Foto 6. Vista dos transdutores, varivolt, carga resistiva e sala de teste de transformadores.



Foto 7. Analisador de energia elétrica de alta precisão (DRANETZ-BMI).



Foto 8. Medidor de resistência em Ω de precisão (FLUKE 8508A REFERENCE MULTIMETER).

E. Painel frontal e diagrama de blocos do programa em LabVIEW

A Fig. 41 representa o Painel Frontal de Controle, Medição e Representação do Tratamento de Sinais e a Fig. 42 mostra o Programa Principal em forma de Diagrama de Blocos. Os sub-programas não serão apresentados neste trabalho.

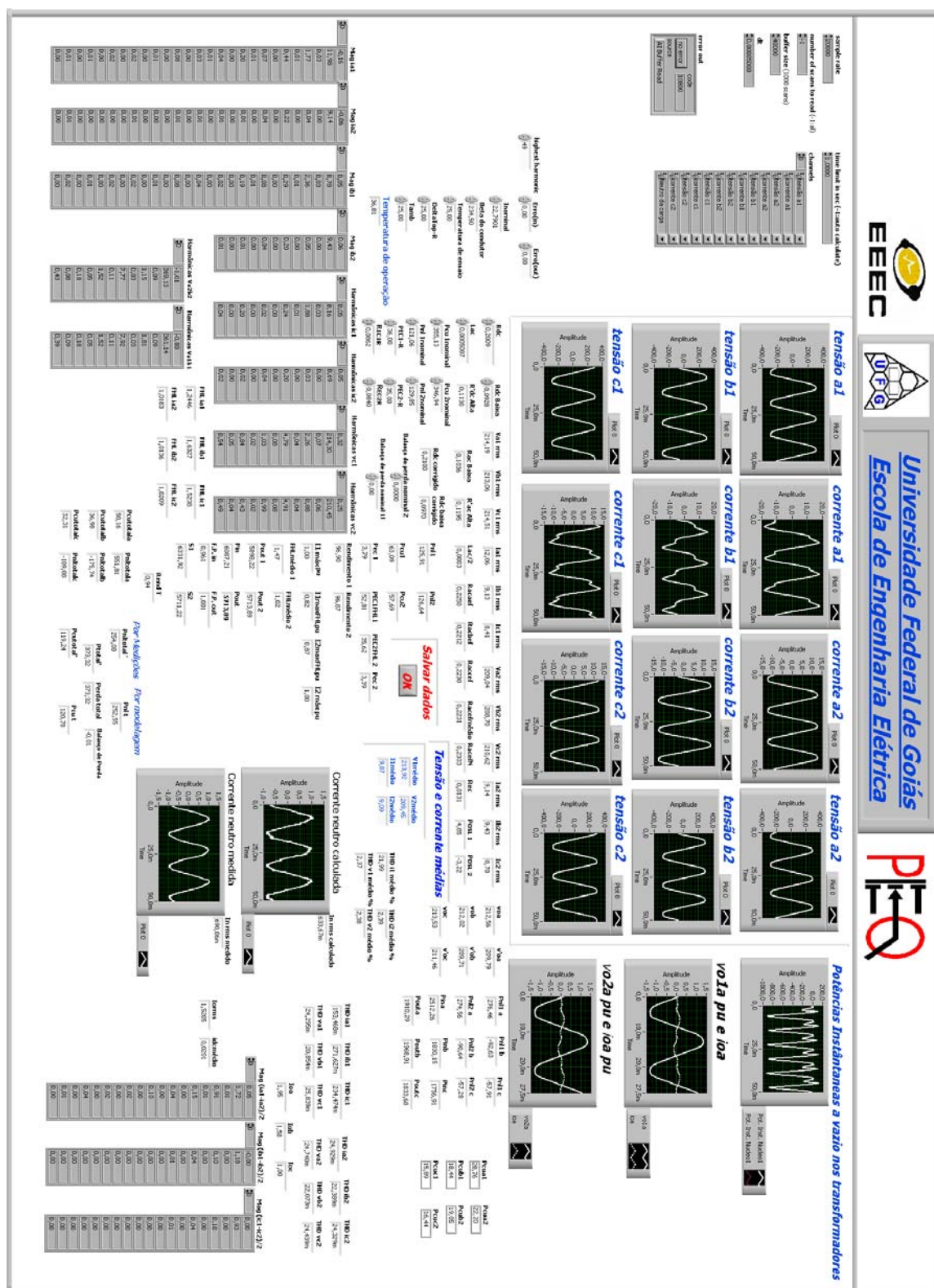


Fig. 42. Painel Frontal de Controle, Medição e Tratamento de Sinais relativos às Perdas em Transformadores alimentando cargas (não)-lineares.

F. Configuração das cargas

As Figs. de 43 a 46 mostram respectivamente os seguintes tipos de cargas: carga linear com fator de potência unitário, carga linear indutiva, carga não-linear composta por ponte a seis diodos e carga não linear composta por ponte a três diodos.

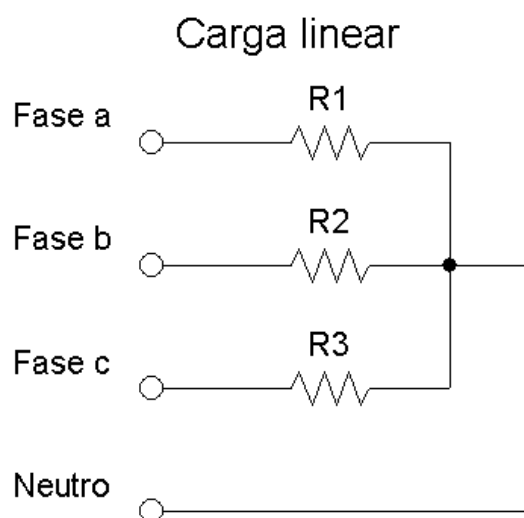


Fig. 43. Carga linear com fator de potência unitário.

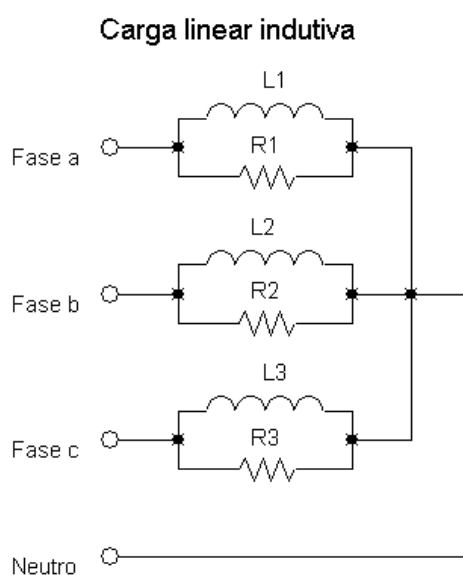


Fig. 44. Carga linear indutiva.

Faixa de C1 (0-1300 μF)

Carga a seis diodos

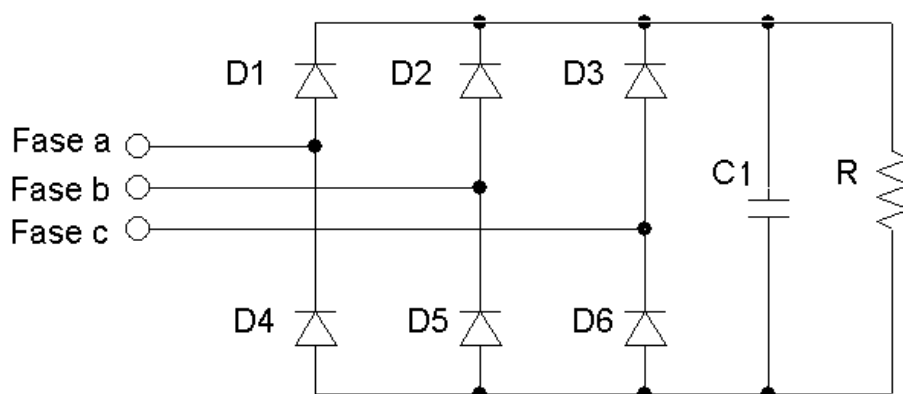


Fig. 45. Carga não-linear composta por ponte a seis diodos.

Carga a três diodos

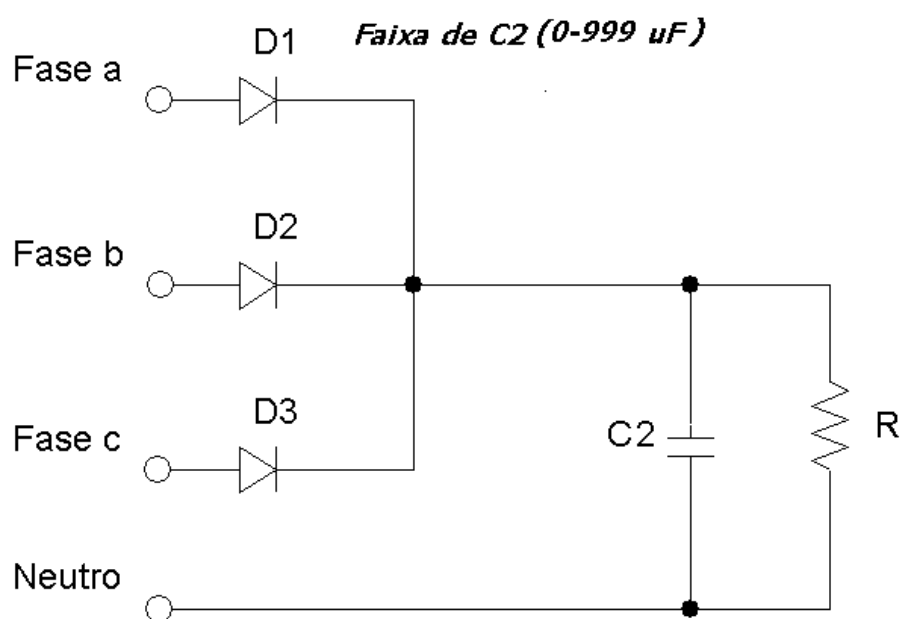


Fig. 46. Carga não-linear composta por ponte a três diodos.

8. ARTIGOS SUBMETIDOS

[1] L. R. Lisita, J. W. L. Nerys, A. J. Batista, A. M. de Oliveira e A. C. Moreira, “Perda Adicional no Núcleo em Transformadores Trifásicos Alimentando Cargas Não-Lineares”, IEEE Latino Americana, Dezembro de 2003.

9. REFERÊNCIAS

- [1] A. D. Kline, "Transformer in ser converter circuits, " in Conf. Rec. IEEE Ind. Applicat. Soc., 1981 Annu. Meeting, pp. 456-458.
- [2] P. k. Sheldon, C. L. Ivey, "Application, design and rating of transformer containing harmonic currents," in Conf. Rec. 1990 IEEE Pulp, Paper Ind. Tech. Conf., pp. 19-31.
- [3] IEEE, Std C57-110-1998, IEEE Recomendad Prattice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
- [4] L. W. Pierce, Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents, IEEE Transactions on industry applications, vol 32, nº 3, May/June 1996, pp. 633-645.
- [5] E. F. Fuchs, et. al., Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient P_{EC-R} , *Derating of Single-Phase Transformers*, and Comparison with *K-Factor* Approach, IEEE Transactions on Power Delivety, Vol. 5, No.1, January 2000, pp. 148-154.
- [6] E. F. Fuchs, D. Yildirim and T. Batan, Innovative procedure for measurement of losses of transformer supplying nonsinusoidal loads, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. , Vol 146, Nº 6, November 1999, pp. 617-625.
- [7] E. F. FUCHS, and Fei, R: ' A new computer-aided method for the efficiency measurement of low-loss transformer and inductors under nonsinusoidal operation', IEEE Trans. Power Deliv., PWRD11,(1), pp. 292-304.
- [8] J. C. Oliveira, et al., A Frequency Domain Model for Transformer Loss of Life Estimation Under Non-Sinusoidal Operation. Revista do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. ,1997.
- [9] G. T. S. Fernandes, Análise de Desempenho Térmico e Econômico de Transformadores Suprindo Cargas Lineares e Não Lineares. Dissertação de Mestrado, UFU, Abril de 2003.
- [10] D. A. Koppicar et al., Circulating-current loss in transformer windings, IEE Proc.-Sci Meas. Technol. Vol. 145, Nº 4, July 1998, pp. 136-140.
- [11] IEEE Standard Dictionary of Eletrical and Eletronics Terms, 2nd ed..Wiley-Interscience, IEEE Std 100-1977
- [12] DAQ, PCI E Series User Manual, Multifunction I/O Devices for PCI Bus Computers, National Instruments, Part Number 370509B-01, July 2002 Editon.

- [13] Measurements Manual, National Instruments, Part Number 322661A-01, July 2000.
- [14] A. W. Kelly, et al., Transformer Derating for Harmonic Currents. A wide-Band Measurement Approach for Energized Transformers, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 35, N° 6, November 1999, pp. 1450-1457.
- [15] NBR 5380-1993, Transformador de Potência, Método de ensaio.
- [16] J. C. Oliveira, et al., Transformadores Teoria e Ensaio, Ed. Edgard Blücher LTDA, 1984.
- [17] IEEE Std C57.12.90.-1993, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.