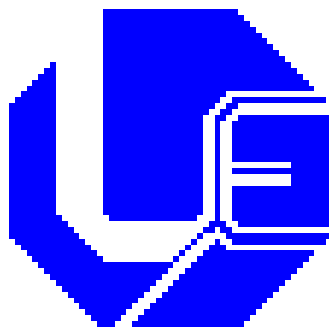




Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

Modelagem Dinâmica do Transformador Regulador

Utilizando o Programa ATP

José de Melo Camargo

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. – UFU (Orientador)

Prof. José Wilson Resende – UFU

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães – UFU

Prof. Alexandre Rocco – UNISANTA

Uberlândia

2008

Modelagem Dinâmica do Transformador Regulador

Utilizando o Programa ATP

JOSÉ DE MELO CAMARGO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. – UFU (Orientador)

Uberlândia, 5 Dezembro de 2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C172m Camargo, José de Melo, 1959-
Modelagem dinâmica do transformador regulador utilizando o Programa ATP / José de Melo Camargo. - 2008.
133 f. : il.

Orientador: Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Transformadores elétricos - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica - Controle de qualidade - Teses. I. Chaves, Marcelo Lynce Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.314

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa a minha esposa Rosana de Arruda Camargo, a meus filhos Rodrigo de Arruda Camargo e Ricardo de Arruda Camargo, a meu sobrinho Rafael de Arruda, pelo incentivo, paciência e compreensão a mim para a realização do mesmo e que isto reflita em incentivo para os meus filhos e sobrinhos.

AGRADECIMENTO

A minha esposa e meus filhos pelo apoio na realização desta pesquisa e na concretização desta dissertação, que com suas compreensões possibilitou a minha dedicação.

A meus pais que com o pouco nível educacional que possuem, souberam com dedicação e compreensão ensinar e mostrar o caminho para que pudesse realizar a minha vida profissional e familiar.

Aos professores da Universidade Federal de Uberlândia e a Universidade Santa Cecília pela sua dedicação e pela paciência em transmitir seus conhecimentos e suas experiências dentro do setor elétrico.

Ao Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves pelo apoio, paciência e incentivo durante esta convivência profissional e pela amizade criada que com certeza esta além da conclusão do curso de mestrado.

Aos meus colegas Elise Saraiva, Alexandre Shozo e João Marcos pelo incentivo e apoio necessário para a realização dos trabalhos desta pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho da Eletropaulo pelo incentivo e apoio para a realização dos trabalhos desta pesquisa.

Lembro também de uma pessoa que infelizmente não está mais entre nós, mais sei que está me acompanhando e apoiando em todos os momentos. Que ele esteja ao lado de Deus e Jesus Cristo. Meu pai, que Deus o acompanhe.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta um modelo matemático para um transformador regulador de tensão com comutação, a fim de permitir a realização de estudos de estabilidade dinâmica de um sistema elétrico, verificando o comportamento da tensão, corrente, frequência, potências ativa e reativa, em função das perturbações que este sistema está exposto. O modelo pode simular e avaliar o comportamento dos transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos decorrente da operação deste equipamento que afetam a qualidade de energia no sistema elétrico.

O modelo do transformador é dividido em três partes distintas, que em conjunto estarão representando o transformador regulador de potência de uma subestação, a saber: a modelagem do sistema de transformação, modelagem do sistema mecânico de comutação e modelagem do sistema de comando eletromecânico do comutador.

O modelo matemático implementado no programa ATP é constituído por indutores lineares e não lineares que representam os fluxos através do ar e os fluxos através do núcleo, respectivamente. Os indutores não lineares são representados pela curva de magnetização do transformador. Na implementação do comutador de derivação em carga é utilizada a rotina TACS do programa ATP.

A modelagem apresentou bons resultados em relação às simulações dos modos operativos a que o transformador está exposto em uma subestação.

ABSTRACT

This research presents a mathematical model for a voltage regulator transformer with on load tap change, in order to perform dynamic stability studies in an electrical system. It permits verifying the behavior of the voltage, current, frequency, active and reactive powers, after disturbances in this system. It can simulate and evaluate electromagnetic and electro-mechanical transients caused by its operation which can affect the quality power of the electric system.

The model of the transformer is divided into three different parts, which represent the voltage regulator transformer of a substation. Those parts are: the modeling of the transformation system, the modeling of the commutation mechanical system and the modeling of the electro-mechanical system of the on load tap change.

The mathematical model implemented in the ATP program consists of linear and non-linear inductors that represent the magnetic flux through the air and through the core, respectively. The non-linear inductors are represented by the transformer's magnetization curve. The TACS routine in the ATP program was used to simulate the on load tap change.

The implemented model presented a good performance regarding the simulations of the transformer operative modes in a substation.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xvii
Simbologia e Unidades.....	xx
Legenda.....	xxv
 Capítulo I – Introdução aos Estudos Dinâmicos.....	 1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Estado da Arte.....	3
1.4 Modelagem do Transformador Regulador.....	4
1.5 Programa ATP (EMTP).....	5
1.6 Contribuições desta Dissertação.....	6
1.7 A Estrutura da Dissertação.....	6
 Capítulo II – Características Elétricas e Construtivas do Transformador Regulador.....	 9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Características Elétricas do Transformador Regulador.....	9
2.3 Características Construtivas do Transformador Regulador.....	11
2.3.1 Núcleo do Transformador.....	11
2.3.2 Enrolamentos do Transformador.....	13
2.4 Curva de Inrush de Magnetização.....	15
2.5 Ensaio de Rotina.....	16
2.5.1 Ensaio de Perdas a Vazio.....	16
2.5.2 Ensaio de Curto Circuito.....	17

2.5.3	Ensaio de Medição de Resistência dos Enrolamentos.....	19
2.5.4	Ensaio de Medição da Relação de Transformação.....	20
2.5.5	Ensaio de Impedância de Sequência Zero.....	22
2.6	Considerações Finais.....	24
Capítulo III – Modelagem do Sistema de Transformação do Transformador Regulador.....		25
3.1	Introdução.....	25
3.2	Transformador Regulador.....	25
3.3	Circuito Magnético do Transformador.....	26
3.4	Representação do Circuito Magnético.....	27
3.5	Modelo do Circuito Magnético.....	35
3.6	Perdas no Ferro e Cobre.....	39
3.7	Capacitância do Enrolamento.....	40
3.8	Considerações Finais.....	41
Capítulo IV – Modelagem do Sistema Eletromecânico de Comutação do Transformador Regulador.....		42
4.1	Introdução.....	42
4.2	Componentes Básicos do Comutador Sobcarga.....	43
4.3	Princípio de Funcionamento do Mecanismo de Comutação.....	45
4.3.1	Seletor de Derivação.....	45
4.3.2	Chave de Comutação.....	46
4.4	Modelagem do Sistema de Comutação.....	47
4.5	Simulação Computacional.....	51
4.5.1	Sem Operação de Comutação.....	51
4.5.2	Com Operação de Comutação.....	52

4.6 Considerações Finais.....	55
Capítulo V – Parâmetros do Modelo do Transformador Regulador.....	56
5.1 Introdução.....	56
5.2 Modelo do Transformador.....	56
5.2.1 Modelo do Transformador para Operação em 131,6 kV.....	57
5.2.2 Modelo do Transformador para Operação em 84 kV.....	58
5.3 Curva de Magnetização.....	59
5.4 Cálculo da Permeabilidade Magnética.....	60
5.5 Cálculo das Relutâncias.....	60
5.6 Cálculo das Forças Magnetomotrizes nas Culatras e Colunas e suas Respectivas Correntes.....	61
5.7 Cálculo das Resistências dos Enrolamentos.....	61
5.7.1 Cálculo da Resistência do Enrolamento de Alta Tensão (AT).....	62
5.7.2 Cálculo da Resistência do Enrolamento Complementar (S).....	64
5.7.3 Cálculo da Resistência do Enrolamento de Regulação (RF).....	64
5.7.4 Cálculo da Resistência do Enrolamento de Baixa Tensão (BT).....	65
5.7.5 Cálculo da Resistência do enrolamento Terciário (TER).....	66
5.8 Cálculo da Indutância Devido ao Fluxo de Dispersão.....	66
5.8.1 Enrolamento de Alta Tensão em Estrela.....	67
5.8.2 Enrolamento de Alta Tensão em Delta.....	70
5.9 Cálculo da Indutância Devido ao Fluxo Mútuo através do Ar.....	72
5.10 Indutância de Dispersão entre Fases.....	73
5.10.1 Enrolamento de Alta Tensão em Estrela.....	73
5.10.2 Enrolamento de Alta Tensão em Delta.....	74
5.11 Representação das Perdas no Ferro.....	74
5.12 Ajuste dos Parâmetros Magnéticos e Elétricos do Transformador.....	75

5.12.1 Ajuste dos Parâmetros Magnéticos.....	75
5.12.2 Ajuste dos Parâmetros Elétricos.....	77
5.13 Considerações Finais.....	78
 Capítulo VI – Simulações Computacionais para Validação do Modelo do Transformador Regulador.....	 80
6.1 Introdução.....	80
6.2 Transformador Regulador na Ligação Estrela.....	80
6.2.1 Simulação do Ensaio de Relação de Transformação.....	81
6.2.2 Simulação do Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação.....	82
6.2.3 Simulação do Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito...83	
6.2.4 Simulação do Ensaio da Medição da Impedância de Seqüência Zero.....	84
6.3 Transformador Regulador na Ligação Delta.....	85
6.3.1 Simulação do Ensaio de Relação de Transformação.....	85
6.3.2 Simulação do Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação.....	86
6.3.3 Simulação do Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito...87	
6.3.4 Simulação do Ensaio da Medição da Impedância de Seqüência Zero.....	88
6.4 Análise dos Resultados das Simulações com os Ensaios de Fábrica.....	89
6.4.1 Diferença Percentual na Relação de Transformação.....	89
6.4.2 Diferença Percentual nas Perdas em Vazio e Corrente de Magnetização.....	91
6.4.3 Diferença Percentual nas Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito.....	92
6.4.4 Diferença Percentual na Medição da Impedância de Seqüência Zero.....	93
6.5 Considerações Finais.....	94

Capítulo VII – Simulações Computacionais para Análise de Desempenho do Modelo do Transformador Regulador.....	95
7.1 Introdução.....	95
7.2 Operação da Subestação no Sistema Elétrico de Potência.....	95
7.3 Operação a Vazio do Transformador.....	97
7.3.1 Processo de Comutação de Tap.....	97
7.3.2 Comportamento da Tensão nos Terminais do Transformador.....	101
7.3.3 Comportamento das Correntes no Transformador.....	105
7.3.3.1 Corrente de Magnetização.....	108
7.3.3.2 Corrente no Enrolamento Terciário.....	114
7.4 Operação em Carga do Transformador.....	116
7.4.1 Processo de Comutação de Tap.....	117
7.4.2 Comportamento da Tensão nos Terminais do Transformador.....	121
7.4.3 Comportamento das Correntes no Transformador.....	125
7.4.3.1 Corrente de Carga.....	125
7.4.3.2 Corrente no Enrolamento Terciário.....	128
7.5 Considerações Finais.....	130
Capítulo VIII – Conclusões.....	132
Referências Bibliográficas.....	134
Anexo A – Princípio da Dualidade.....	136
Anexo B – Equipamentos para Mudança de Tap em carga.....	139

Lista de Figuras

Fig.	Descrição	Pág
2.1	Diagrama fasorial do transformador.	11
2.2	Dimensões do núcleo do transformador.	12
2.3	Curva de magnetização sem carga – lado alta tensão.	12
2.4	Dimensões dos enrolamentos.	14
2.5	Capacitâncias internas.	15
2.6	Curva de inrush do transformador.	15
2.7	Diagrama de ligação ensaio de impedância seqüência zero, alta tensão ligada em estrela.	22
2.8	Diagrama de ligação ensaio de impedância seqüência zero, alta tensão ligada em delta.	23
3.1	Diagrama unifilar do transformador regulador.	26
3.2	Distribuição de fluxos magnéticos em um transformador regulador de núcleo envolvido, representação da coluna A.	28
3.3	Distribuição de fluxos magnéticos em um transformador regulador de núcleo envolvido, representação da coluna B.	28
3.4	Distribuição de fluxos magnéticos em um transformador regulador de núcleo envolvido, representação da coluna C.	29
3.5	Circuito magnético equivalente do transformador da coluna A.	29
3.6	Circuito magnético equivalente do transformador da coluna B.	30
3.7	Circuito magnético equivalente do transformador da coluna C.	30
3.8	Circuito magnético equivalente do enrolamento de regulação RF da fase A.	32
3.9	Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, referente à fase A.	36

3.10	Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, referente à fase B.	36
3.11	Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, referente à fase C.	37
3.12	Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, no enrolamento de regulação na fase A.	37
3.13	Circuito elétrico equivalente do transformador obtido pela aplicação do princípio da dualidade.	38
3.14	Circuito elétrico equivalente do transformador simplificado.	40
4.1	Comutador derivação em carga.	44
4.2	Seqüência de chaveamento do seletor derivação.	46
4.3	Seqüência de chaveamento do seletor derivação e chave de comutação.	47
4.4	Diagrama de blocos do modelo do comutador.	49
4.5	Chaves controladoras conectadas ao enrolamento do transformador.	50
4.6	Estado da chave controladora do tap 4 e CHDI.	52
4.7	Comportamento da tensão no tap 4 e CHDI.	52
4.8	Estado das chaves controladoras na comutação do tap 4 para tap 5.	53
4.9	Comportamento da tensão na comutação do tap 4 para tap 5.	53
4.10	Estado das chaves controladoras na comutação do tap 8 para tap 9.	54
4.11	Comportamento da tensão na comutação do tap 8 para tap 9.	55
5.1	Modelo do transformador para operação em 131,6 kV.	57
5.2	Modelo do transformador para operação em 84 kV.	58
5.3	Curva B-H do transformador.	59
6.1	Formas de onda das correntes de excitação.	83
6.2	Forma de onda corrente de seqüência zero no enrolamento de baixa tensão.	85
6.3	Forma de onda corrente de seqüência zero no enrolamento de baixa tensão.	88

6.4	Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação.	89
6.5	Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação entre simulado e ensaiado para a ligação estrela do transformador.	90
6.6	Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação entre simulado e ensaiado para a ligação delta do transformador.	90
6.7	Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação.	91
6.8	Gráfico comparativo da diferença percentual da impedância curto-circuito do transformador.	92
6.9	Gráfico comparativo da diferença percentual das perdas em carga do transformador.	93
6.10	Gráfico comparativo da diferença percentual nas medições da impedância de sequência zero.	94
7.1	Diagrama unifilar da subestação a ser simulada.	96
7.2	Comportamento dos contatos do comutador de tap.	98
7.3	Comportamento da tensão no contato principal do tap 05.	98
7.4	Comportamento da tensão no fechamento do contato principal do tap 06.	98
7.5	Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 05.	99
7.6	Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 06.	99
7.7	Comportamento da corrente no contato resistor de transição do tap 05.	100
7.8	Comportamento da corrente no contato resistor transição do tap 06.	100
7.9	Comportamento da corrente no contato principal do tap 5	101
7.10	Comportamento da corrente no contato principal do tap 6	101
7.11	Comportamento da tensão na baixa tensão sem comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	102
7.12	Comportamento da tensão na baixa tensão na comutação de elevar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	102

7.13	Comportamento da tensão na baixa tensão na comutação de baixar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	103
7.14	Perturbação na tensão de baixa tensão, comutação de baixar tap, instante $t=35\text{ms}$.	103
7.15	Perturbação na tensão de baixa tensão, comutação de baixar tap, instante $t=40\text{ms}$.	103
7.16	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t= 24\text{ ms}$ na comutação da chave seletora.	104
7.17	Perturbação na tensão de alta tensão com comutação de tap no instante $t=40\text{ms}$, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.	104
7.18	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t= 24\text{ ms}$ na comutação da chave seletora.	105
7.19	Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	106
7.20	Comportamento da corrente de magnetização com comutação de baixar tap.	106
7.21	Comportamento da corrente de magnetização com comutação do tap 09 para tap 10.	107
7.22	Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap.	108
7.23	Comportamento das harmônicas da corrente de magnetização sem comutação de tap.	109
7.24	Comportamento da THD corrente de magnetização sem comutação de tap.	109
7.25	Comportamento da corrente de magnetização sem e com comutação de tap.	110
7.26	Comportamento das ordens harmônicas da corrente de magnetização em comutação de baixar tap.	111
7.27	Comportamento das ordens harmônicas da corrente de magnetização em comutação de elevar tap.	111
7.28	Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap.	113
7.29	Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap.	113

7.30	Comportamento da corrente harmônica de ordem 5 sem comutação de tap.	114
7.31	Comportamento corrente no enrolamento terciário com comutação de tap.	114
7.32	Detalhe da primeira perturbação na corrente no enrolamento terciário com a comutação de tap referente à figura 7.31.	115
7.33	Detalhe da segunda perturbação na corrente no enrolamento terciário com a comutação de tap referente à figura 7.31.	115
7.34	Comportamento das correntes de ordem harmônica no enrolamento terciário sem a comutação de tap.	116
7.35	Comportamento das ordens harmônicas da corrente de magnetização em comutação de elevar ou baixar tap.	116
7.36	Comportamento da tensão no contato principal do tap 05.	118
7.37	Comportamento da tensão no contato principal do tap 06.	118
7.38	Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 05.	119
7.39	Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 06.	119
7.40	Comportamento da corrente no contato principal do tap 05.	119
7.41	Comportamento da corrente no contato principal do tap 06.	120
7.42	Comportamento da corrente no contato com resistor de transição do tap 05.	120
7.43	Comportamento da corrente no contato com resistor de transição do tap 06.	121
7.44	Comportamento da tensão na baixa tensão sem comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	121
7.45	Comportamento da tensão na comutação de elevar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	122
7.46	Comportamento da tensão na comutação de baixar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.	122

7.47	Perturbação na tensão de baixa tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.	123
7.48	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t = 24$ ms na comutação da chave seletora.	123
7.49	Perturbação na tensão de alta tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.	124
7.50	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t = 24$ ms na comutação da chave seletora.	124
7.51	Comportamento da corrente nos terminais de alta tensão.	125
7.52	Perturbação na corrente de alta tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.	126
7.53	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t = 24$ ms na comutação da chave seletora.	126
7.54	Comportamento da corrente nos terminais de baixa tensão.	127
7.55	Perturbação na corrente de baixa tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.	127
7.56	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t = 24$ ms na comutação da chave seletora.	128
7.57	Comportamento da corrente no enrolamento terciário.	128
7.58	Perturbação na corrente do enrolamento terciário com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.	129
7.59	Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t = 24$ ms na comutação da chave seletora.	129
7.60	Comportamento das ordens harmônicas na corrente do enrolamento terciário.	130

B.1	Caixa do sistema eletro-mecânico.	142
B.2	Componentes elétrico e mecânico do mecanismo motorizado.	143
B.3	Comando do sistema eletro-mecânico.	144
B.4	Temporização dos contatos auxiliares mecânico.	145

Lista de Tabelas

Tabela	Descrição	Pág
2.1	Características elétricas do transformador.	10
2.2	Níveis de tensão e corrente conforme a posição do tap do comutador.	10
2.3	Valores obtidos do ensaio a vazio.	16
2.4	Valores corrigidos do ensaio a vazio.	17
2.5	Valores obtidos do ensaio de curto-circuito com alta tensão ligada em estrela.	17
2.6	Valores obtidos do ensaio de curto-circuito com alta tensão ligada em delta.	18
2.7	Valores corrigidos do ensaio a curto-circuito.	18
2.8	Valores obtidos no ensaio de resistência do enrolamento de baixa tensão.	19
2.9	Valores obtidos no ensaio de resistência do enrolamento terciário.	19
2.10	Valores obtidos no ensaio de resistência do enrolamento de alta tensão.	20
2.11	Valores obtidos no ensaio de relação de transformação, alta tensão ligada em estrela.	21
2.12	Valores obtidos no ensaio de relação de transformação, alta tensão ligada em delta.	21
2.13	Valores obtidos ensaio de impedância seqüência zero, base de 40 MVA.	22
2.14	Resultados obtidos ensaio de impedância seqüência zero, base de 40 MVA.	23
4.1	Condição inicial do seletor de derivação.	51
5.1	Medição da resistência do enrolamento de alta tensão.	62
5.2	Valor da resistência do enrolamento de alta tensão, ligação em delta.	63
5.3	Valor da resistência do enrolamento de alta tensão, ligação em estrela.	63
5.4	Valor da resistência do enrolamento de alta tensão (S).	64
5.5	Medição da resistência dos taps no enrolamento de alta tensão.	65

5.6	Valor da resistência de cada bobina de regulação.	65
5.7	Valor da resistência do enrolamento de baixa tensão.	65
5.8	Valor médio da resistência do enrolamento de baixa tensão a 75°C.	66
5.9	Medição da resistência do enrolamento terciário.	66
5.10	Valor da resistência do enrolamento terciário.	66
5.11	Valor da indutância de dispersão $L_{ad_{AT-RF}}$	68
5.12	Valor da indutância de dispersão $L_{ad_{S-RF}}$	71
5.13	Fluxo magnético e corrente para variações indutâncias.	77
5.14	Parâmetros do modelo do circuito magnético na base de 10 kV, transformador ligado em estrela e delta.	78
6.1	Resultados da simulação do ensaio de relação de transformação.	81
6.2	Relação de transformação e diferença percentual.	82
6.3	Resultado da simulação do ensaio de perdas em vazio.	82
6.4	Resultado da simulação do ensaio de perdas em carga.	84
6.5	Resultado da simulação do ensaio de medição da impedância sequência zero.	84
6.6	Resultados da simulação do ensaio de relação de transformação.	85
6.7	Relação de transformação e diferença percentual.	86
6.8	Comparação dos resultados da simulação do ensaio vazio na ligação delta e estrela.	86
6.9	Resultado da simulação do ensaio de perdas em carga.	87
6.10	Resultado da simulação do ensaio de perdas em carga no tap 09 na potência de 40 MVA do transformador.	87
6.11	Resultado da simulação do ensaio medição da impedância sequência zero.	88
6.12	Resultado da diferença percentual entre ensaio e simulação.	91

Simbologia e Unidades

Símbolo	Descrição	Unidade
A_{nu}	Área da seção transversal do núcleo ferromagnético	m^2
A_{col}	Área da seção transversal da coluna do núcleo ferromagnético	m^2
A_{cul}	Área da seção transversal da culatra do núcleo ferromagnético	m^2
B	Indução magnética.	Wb/m^2 ou T
B_{col}	Indução magnética na coluna do núcleo ferromagnético.	Wb/m^2 ou T
B_{cul}	Indução magnética na culatra do núcleo ferromagnético.	Wb/m^2 ou T
b_0	Distância radial entre enrolamento de alta e baixa tensão.	mm
b_1	Espessura do enrolamento.	mm
b_2	Espessura do enrolamento.	mm
C	Capacitância.	pF
f	Frequência	Hz
F_{TER}	f.m.m. produzida pelo enrolamento terciário.	Aesp
F_{BT}	f.m.m. produzida pelo enrolamento baixa tensão.	Aesp
F_{AT}	f.m.m. produzida pelo enrolamento alta tensão.	Aesp
F_S	f.m.m. produzida pelo enrolamento complementar de alta tensão.	Aesp
F_{RF}	f.m.m. produzida pelo enrolamento regulação.	Aesp
F_{tap}	f.m.m. produzida pelo enrolamento do respectivo tap	Aesp
h_{col}	Altura da coluna do núcleo	m
h_e	Altura de enrolamento	m

h_x	Média da altura dos enrolamentos.	mm
H	Campo magnético	A/ m
I	Corrente elétrica.	A
i_{col}	Corrente na coluna para caracterização do indutor não linear.	A
i_{cul}	Corrente na culatra para caracterização do indutor não linear.	A
I_0	Corrente a vazio.	A
I_{0g}	Corrente a vazio garantida	A
I_A	Corrente na fase A.	A
I_B	Corrente na fase B.	A
I_C	Corrente na fase C.	A
I_{med}	Corrente medida no ensaio	A
I_n	Corrente nominal	A
I_T	Correntes totais, somatórias das correntes de cada fase.	A
l	Comprimento	m
L	Indutância.	H
L_{am}	Indutância associada ao espaço de ar entre enrolamento e a coluna do núcleo ferromagnético.	H
L_{ad}	Indutância de dispersão associada ao espaço de ar entre os enrolamentos.	H
L_{col}	Indutância saturável da coluna.	H
L_{cul}	Indutância saturável da culatra.	H
L_{ef}	Indutância associada ao fluxo de dispersão entre fases.	H
L_i	Indutância não linear associada ao material ferromagnético da culatra inferior.	H

L_{nu}	Indutância não linear associada ao material ferromagnético da coluna.	H
L_s	Indutância não linear associada ao material ferromagnético da culatra superior.	H
L_{seq}	Indutância de seqüência zero	H
P	Potência aparente	VA
P_{base}	Potência aparente de base.	VA
P_{fe}	Perdas no ferro	W
$\Re_{ad}$	Relutância do ar ao fluxo de dispersão entre os enrolamentos.	H^{-1}
$\Re_{am}$	Relutância do ar a uma parcela do fluxo mútuo entre a coluna e o enrolamento interno.	H^{-1}
$\Re_{col}$	Relutância do material ferromagnético da coluna.	H^{-1}
$\Re_{cul}$	Relutância do material ferromagnético da culatra.	H^{-1}
$\Re_{ef}$	Relutância do fluxo de dispersão entre fases.	H^{-1}
$\Re_i$	Relutância do núcleo ferromagnético associado à culatra inferior.	H^{-1}
$\Re_{nu}$	Relutância do núcleo ferromagnético associado à coluna.	H^{-1}
$\Re_s$	Relutância do núcleo ferromagnético associado à culatra superior.	H^{-1}
R_{fase}	Resistência medida ou calculada na fase.	Ω
R_{fcol}	Resistência associada às perdas no ferro nas colunas.	Ω
R_{fcul}	Resistência associada às perdas no ferro nas culatras.	Ω
R_{AT}	Resistência associada às perdas no cobre do enrolamento de alta tensão.	Ω
R_s	Resistência associada às perdas no cobre do enrolamento de alta	Ω

	tensão complementar.	
R_{RF}	Resistência associada às perdas no cobre do enrolamento de regulação.	Ω
R_{BT}	Resistência associada às perdas no cobre do enrolamento de baixa tensão.	Ω
R_{TER}	Resistência associada às perdas no cobre do enrolamento terciário.	Ω
R_{θ_1}	Resistência medida a temperatura θ_1 .	Ω
R_{θ_2}	Resistência calculada a temperatura θ_2 .	Ω
R_{med}	Resistência medida em ensaio.	Ω
R_T	Resistor de transição.	Ω
V_{coluna}	Volume da coluna do núcleo.	m^3
$V_{culatra}$	Volume da culatra do núcleo.	m^3
V	Tensão eficaz.	V
V_0	Tensão em vazio.	V
V_{med}	Tensão eficaz medido.	V
V_n	Tensão nominal.	V
V_{AT}	Tensão no enrolamento de alta tensão.	V
V_S	Tensão no enrolamento de alta tensão complementar.	V
V_{RF}	Tensão no enrolamento de regulação.	V
V_{BT}	Tensão no enrolamento de baixa tensão.	V
V_{TER}	Tensão no enrolamento terciário.	V
V_{base}	Tensão de base.	V
s_0	Comprimento médio da distancia entre enrolamento de alta e baixa tensão.	mm

s_1	Comprimento médio do enrolamento.	mm
s_2	Comprimento médio do enrolamento.	mm
X_{ad}	Impedância da reatância de dispersão.	Ω
X_d	Reatância total.	Ω
X_0	Reatância de seqüência zero.	Ω
$\%X$	Reatância percentual	pu
W_0	Potência a vazio	W
W_{0g}	Potência a vazio garantida	W
W_A	Potência ativa na fase A.	W
W_B	Potência ativa na fase B.	W
W_C	Potência ativa na fase C.	W
W_T	Potência ativa total, somatória das potência de cada fase.	W
Z	Impedância.	Ω
Z_{base}	Impedância de base.	Ω
Z_0	Impedância de seqüência zero.	Ω
φ	Fluxo magnético.	Wb
μ	Permeabilidade magnética.	H/m
μ_{col}	Permeabilidade magnética da coluna do núcleo ferromagnético.	H/m
μ_{cul}	Permeabilidade magnética da culatra do núcleo ferromagnético.	H/m
λ	Fluxo total concatenado.	Wb

Legenda

Símbolo	Descrição
A	Representa a fase A, coluna da esquerda do núcleo, correspondendo ao terminal H3 do transformador.
AT	Enrolamento de alta tensão do transformador.
B	Representa a fase B, coluna central do núcleo, correspondendo ao terminal H2 do transformador.
BT	Enrolamento de baixa tensão do transformador.
C	Representa a fase C, coluna da direita do núcleo, correspondendo ao terminal H1 do transformador.
f.m.m	Força magneto motriz
G	Gerador
H1	Terminal de alta tensão H1 do transformador.
H2	Terminal de alta tensão H2 do transformador.
H3	Terminal de alta tensão H3 do transformador.
K	Fator de correção para calculo de resistência a temperatura θ .
N	Número de espiras do enrolamento
ONAF	Óleo normal, ar forçado.
ONAN	Óleo normal, ar normal.
pu	Valor por unidade.
RF	Enrolamento de regulação do transformador.
S	Enrolamento complementar de alta tensão do transformador.

TER	Enrolamento terciário do transformador.
X0	Terminal de baixa tensão X0 do transformador.
X1	Terminal de baixa tensão X1 do transformador.
X2	Terminal de baixa tensão X2 do transformador.
X3	Terminal de baixa tensão X3 do transformador.
Y1	Terminal do terciário Y1 do transformador.
Y2	Terminal do terciário Y2 do transformador.
φ_{am}	Fluxo magnético que concatena os enrolamentos de uma mesma fase, caminho dado pelo ar entre a coluna e o enrolamento.
φ_{ad}	Fluxo de dispersão entre os enrolamentos da mesma fase, caminho dado pelo ar entre os enrolamentos de cada fase.
φ_{ef}	Fluxo de dispersão entre fases, caminho magnético corresponde ao tanque do transformador e ao espaço de ar externo entre as culatras superior e inferior.
φ_i	Fluxo magnético cujo caminho dado pelo material ferromagnético através da culatra inferior.
φ_{nu}	Fluxo magnético que concatena os enrolamentos de uma mesma fase, caminho dado pelo material ferromagnético através das colunas.
φ_s	Fluxo magnético cujo caminho dado pelo material ferromagnético através da culatra superior.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO AOS ESTUDOS DINÂMICOS

1.1 Introdução

O surgimento dos primeiros sistemas de energia elétrica no Brasil, a partir do final do século XIX, contribuiu para o desenvolvimento socioeconômico e cultural do país. Esse desenvolvimento fez com que as empresas concessionárias de energia elétrica investissem na ampliação de suas instalações e na construção de novos sistemas de geração, transmissão e distribuição para atender a demanda crescente de energia elétrica.

A partir de 1997, com a implantação de um novo modelo do setor elétrico brasileiro, houve privatizações das empresas concessionárias de energia elétrica, principalmente de geração e distribuição, e a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelecendo metas de desempenho para as concessionárias, exigindo das mesmas o fornecimento de uma energia de boa qualidade e confiabilidade aos seus clientes cativos e clientes livres. A regulamentação de indicadores de qualidade de energia, fez com que as empresas investissem na busca de novos métodos de trabalho das equipes de atendimento e estudassem a implantação de novas metodologias, para obter melhor desempenho de suas instalações elétricas. Assim, o conhecimento dos limites de um sistema através da realização de estudos utilizando modelagens reais, traz maior confiabilidade ao mesmo.

A questão da qualidade de energia desperta interesse para as empresas concessionárias e para os consumidores, em razão da mudança da natureza e o crescente uso das cargas elétricas que, no passado, eram predominantemente eletromecânicas e hoje são, na maioria das vezes, eletroeletrônicas.

As evoluções das características destas cargas, baseadas na eletrônica de potência, permitiram melhorias na produção e na qualidade de vida moderna. No entanto, perturbações existentes no sistema elétricas, que antes não causavam grandes anomalias, passaram a ter importância fundamental, principalmente nos desligamentos momentâneos destas cargas.

Estas perturbações geram, hoje, prejuízos tanto para as empresas concessionárias como para os consumidores. Para aquelas têm-se as perdas da energia faturada, indenização a seus clientes, aumento de seus indicadores (que pode se transformar em multas), enquanto que para estes, isso significa perda de produção e conseqüentemente, perda de faturamento.

1.2 Objetivo

A qualidade de energia é um indicador do desempenho de um sistema elétrico. Assim obter novas metodologias e novas filosofias, traz resultados mais eficientes a esse sistema.

Saber como esse sistema elétrico responde às perturbações a que está exposto, é um passo importante da análise e, um ponto de partida para definir novas metodologias de trabalho e filosofias operativas.

O objetivo desta dissertação consiste em desenvolver um modelo que represente um transformador regulador de potência com comutação, a fim de permitir a realização de estudos de estabilidade dinâmica de um sistema elétrico, verificando o comportamento da tensão, corrente, frequência, potência ativa e potência reativa, em função das perturbações a que este sistema está exposto, nas faixas de tempo denominadas de transitório eletromagnético e transitório eletromecânico.

No sistema de distribuição de energia elétrica não é usual a realização deste tipo de estudo, pois as literaturas nacionais e internacionais disponíveis, embora muito abrangentes, são superficiais nesta área, o que não permite obter dados suficientes para análises individuais de desempenho dos equipamentos, dentro do sistema elétrico de distribuição.

1.3 Estado da Arte

Este trabalho de pesquisa iniciou-se através de um levantamento bibliográfico sobre os mais diversos assuntos relacionados com a modelagem que será aplicada, através do qual obteve-se um conjunto de informações para o desenvolvimento da proposta. A seguir apresenta-se uma síntese dos trabalhos considerados mais significativos, e que conduzem a uma melhor compreensão dos conceitos, terminologias e progressos da área.

No que tange à modelação de comutadores de tap, a referência [1] apresenta um modelo sequencial discreto de transformadores, com mudança de tap, em ambiente do MATLAB/SIMULINK® e do Power System Blockset. O artigo mostra o funcionamento do comutador sobcarga de forma a representar suas características dinâmicas, bem como o equacionamento para estimação do valor secundário da tensão do equipamento. O resultado obtido com a simulação demonstraram que a modelagem realizada foi satisfatória e que as características dos tempos de retardo e mecanismo são plenamente respeitadas para todos os casos estudados.

A referência [2] propõe um modelo matemático para representar os transformadores trifásicos de distribuição em estudos de fluxo de potência utilizando coordenadas de fase. O transformador é representado por uma matriz de admitância, obtida através de análise de seu circuito magnético equivalente. O modelo permite a representação de transformadores trifásicos de três enrolamentos, sendo incorporado ao fluxo de potência trifásico pelo método de injeção de corrente (MICT) implementado em MATLAB.

O artigo apresentado na referência [3] auxilia na investigação das forças eletromagnéticas causadas por forças externas no interior do transformador. O método baseia-se na modelagem de elementos finitos e em cálculos através de equações mecânicas e elétricas. Os resultados fornecidos são a distribuição de fluxos, perdas e informações relativas à operação do equipamento.

A dissertação de mestrado da referência [4] apresenta um modelo de circuito equivalente para representar um transformador trifásico de três colunas no programa ATP (EMTP), aplicando o

princípio da dualidade para transformar um circuito magnético do transformador em um circuito elétrico equivalente. O modelo é baseado nas características de indutores lineares, representando os fluxos através do ar, e de indutores não lineares representando os fluxos através do núcleo de ferro.

O trabalho desenvolvido para implementação do ciclo de histerese no modelo de transformadores trifásicos [5], apresenta uma modelagem onde se transforma um circuito magnético em um circuito elétrico equivalente, aplicando o princípio de dualidade para ser implementado no programa ATP (EMTP). Utiliza-se também um modelo de indutor não-linear que permite a implementação da curva de magnetização e uma sub-rotina chamada “HYSTERESIS”, que gera a curva de um material de aço silício de grãos orientados típico, obtendo-se uma modelagem baseada na distribuição de fluxo magnético, propiciando um melhor detalhamento do acoplamento magnético.

No decorrer desta dissertação serão apresentadas outras referências bibliográficas, que são importantes no detalhamento do estudo.

1.4 Modelagem do Transformador Regulador

O objetivo desta dissertação é criar um modelo completo de um transformador regulador, realizando comutação. Para isto, esta modelagem será dividida em três partes distintas, que em conjunto estarão representando o transformador regulador de potência de uma subestação, as quais são:

- Modelagem do sistema de transformação;
- Modelagem do sistema mecânico de comutação;
- Modelagem do sistema de comando eletromecânico.

Esta proposta tem em vista permitir a realização de estudos dinâmicos do sistema elétrico, observando o comportamento da tensão, corrente e potência em diversas condições operativas e de ocorrências, as quais o transformador regulador está sujeito.

Este estudo estará abrangendo os transformadores reguladores aplicados nas subestações transformadoras dos sistemas de subtransmissão e de distribuição de energia. Para as subestações que utilizam autotransformadores, parte deste estudo poderá ser aplicado, contudo, deve ser realizado um estudo detalhado para sua modelagem.

1.5 Programa ATP (EMTP)

O programa ATP [6] é uma ferramenta de grande flexibilidade e importância na realização de estudos de transitórios em sistema de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente, onde a topologia da rede ou o problema a ser estudado não permite uma simples representação monofásica. Os estudos destes fenômenos podem ser realizados através de modelos em escala reduzida utilizando ferramentas de simulação analógica, digital ou híbridas.

A formulação matemática baseia-se no método das características para elementos distribuídos, método de Bergeron, e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O ATP contém diversas rotinas auxiliares de suporte completos, tais como a subrotina de cálculo de parâmetros de linhas e cabos subterrâneos, a subrotina de análise transitória de sistema de controle (TACS) e a subrotina MODELS (General Purpose Algorithm Simulation Tool).

A rotina TACS foi desenvolvida para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle de um determinado equipamento. Nela são permitidas a representação de funções de transferência, somadores, limitadores estáticos e dinâmicos, funções algébricas, etc.

A rotina MODELS é uma versão moderna da TACS, a mesma apresenta vantagens na representação de sistemas de controle complexos, e se constitui em ferramenta muito poderosa para a simulação de algoritmos de sistema de controle.

De um modo geral, as informações necessárias para o processamento de casos no ATP envolvem o fornecimento de um arquivo de dados contendo informações gerais tais como: passo de

integração, tempo máximo de simulação e informações específicas que descrevem a rede elétrica, chaves, fontes de tensão ou corrente e ainda uma especificação de saída de resultados.

1.6 Contribuições Desta Dissertação

As principais contribuições deste trabalho de pesquisa é o desenvolvimento e a implementação de um modelo para transformador de potência com comutador de derivação em carga, que seja adequado para estudos dinâmicos, devido a perturbações da ordem de microsegundos até regime permanente, que possam afetar a qualidade de energia do sistema elétrico.

Desta forma, o modelo desenvolvido contribui com informações para obter-se uma melhor especificação dos equipamentos principais e auxiliares do transformador, além de se ter melhor representação do comportamento do sistema elétrico a ser estudado em face das suas condições operativas e perturbações, aperfeiçoando as instruções operativas e de proteção da subestação.

Os estudos deste modelo permitirão definir uma metodologia de parametrização da regulação de tensão, que o transformador de potência deve executar dentro de um sistema elétrico em face de sua condição de carregamento.

1.7 A Estrutura da Dissertação

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo introdutório, designado por Capítulo I, este trabalho de pesquisa encontra-se assim estruturado:

Capítulo II - Características Elétricas e Construtivas do Transformador Regulador

Este capítulo identifica as características elétricas e construtivas do transformador regulador a ser modelado. Mostra também os resultados dos ensaios de fábrica que são referência para os testes de consistência do modelo desenvolvido.

Capítulo III - Modelagem do Sistema de Transformação do Transformador Regulador

Neste capítulo define-se a modelagem do sistema de transformação do transformador regulador, mostrando a metodologia aplicada para determinar o modelo elétrico do transformador a partir de um circuito magnético, utilizando o princípio da dualidade.

Capítulo IV - Modelagem do Sistema Eletro-mecânico de Comutação do Transformador Regulador

Este capítulo mostra o princípio de funcionamento do comutador de derivação em carga e as diretrizes adotadas no desenvolvimento da modelagem.

Capítulo V - Parâmetros do Modelo do Transformador Regulador

Neste capítulo é apresentada a metodologia de cálculo dos parâmetros do modelo do transformador e a conversão destes parâmetros elétricos em uma base única de tensão.

Capítulo VI - Simulações Computacionais para Validação do Modelo do Transformador Regulador

Este capítulo apresenta a análise do desempenho do modelo do transformador implementado no Programa ATP, comparando os resultados obtidos nas simulações computacionais com os resultados de ensaio de comissionamento do fabricante.

Capítulo VII - Simulações Computacionais para Análise de Desempenho do Modelo do Transformador Regulador

Neste capítulo são analisados os fenômenos que ocorrem quando da atuação do sistema de comutação e o desempenho do modelo do transformador nos modos operativos de um sistema elétrico de potência.

Capítulo VIII - Conclusões

Este capítulo apresenta as discussões e conclusões finais que formam essa dissertação, ressaltando as principais contribuições desta pesquisa.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E CONSTRUTIVAS DO TRANSFORMADOR REGULADOR

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é identificar as características elétricas e construtivas do transformador regulador, que será modelado nos capítulos subseqüentes.

Os fornecedores especializados somente fabricam sob encomenda este tipo de equipamento, sendo sua construção específica para a aplicação a que se destina. Deve-se recorrer ao fabricante, para obterem-se os dados técnicos e construtivos do equipamento.

Este capítulo apresenta o transformador regulador, relacionando seus dados técnicos, dados construtivos e os resultados de ensaios obtidos quando de sua fabricação, ensaios realizados conforme norma NBR 5380.

O transformador regulador a ser estudado é um equipamento trifásico de potência 32/40 MVA, frequência 60 Hz, com comutador de derivação em carga no enrolamento de alta tensão, e preparado para operar na tensão nominal de 84 kV ou 131,6 kV [7].

2.2 Características Elétricas do Transformador Regulador

O transformador regulador a ser modelado possui as características técnicas apresentadas na tabela 2.1 e 2.2, obtidas através dos dados de placa de identificação.

A figura 2.1 mostra o diagrama fasorial do transformador. O enrolamento de alta tensão do transformador é ligado em delta, quando o mesmo for operar na tensão nominal de 84 kV, ou ligado em estrela, quando o mesmo for operar na tensão nominal de 131,6 kV.

Tabela 2.1 – Características elétricas do transformador.

Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão Nominal (V)	Corrente (A)	
	ONAN	ONAF		ONAN	ONAF
Alta Tensão	32.000	40.000	131.636	140,4	175,4
			84.000	219,9	274,9
Baixa Tensão	32.000	40.000	13.800	1.338,8	1.673,8
Terciário	10.667	13.333	7.967	446,3	557,9

Tabela 2.2 – Níveis de tensão e corrente conforme a posição do tap do comutador.

Posição do comutador	Alta Tensão - Ligação estrela			Alta Tensão - Ligação delta		
	Tensão (V)	Corrente (A)		Tensão (V)	Corrente (A)	
		ONAN	ONAF		ONAN	ONAF
1	146.116	126,4	158,1	92.400	199,9	249,9
2	144.306	128,0	160,0	91.350	202,2	252,8
3	142.496	129,7	162,1	90.300	204,6	255,7
4	140.686	131,3	164,2	89.250	207,0	258,8
5	138.876	133,0	166,3	88.200	209,5	261,8
6	137.066	134,8	168,5	87.150	212,0	265,0
7	135.256	136,6	170,7	86.100	214,6	268,2
8	133.446	138,4	173,1	85.050	217,2	271,5
9A	131.636	140,4	175,4	84.000	219,9	274,9
9B						
9						
9C						
9D						
9E						
10	129.826	142,3	177,9	82.950	222,7	278,4
11	128.016	144,3	180,4	81.900	225,6	282,0
12	126.206	146,4	183,0	80.850	228,5	285,6
13	124.396	148,5	185,6	79.800	231,5	289,4
14	122.586	150,7	188,4	78.750	234,6	293,3
15	120.776	153,0	191,2	77.700	237,8	297,2
16	118.996	155,3	194,1	76.650	241,0	301,3
17	117.156	157,7	197,1	75.600	244,4	305,5

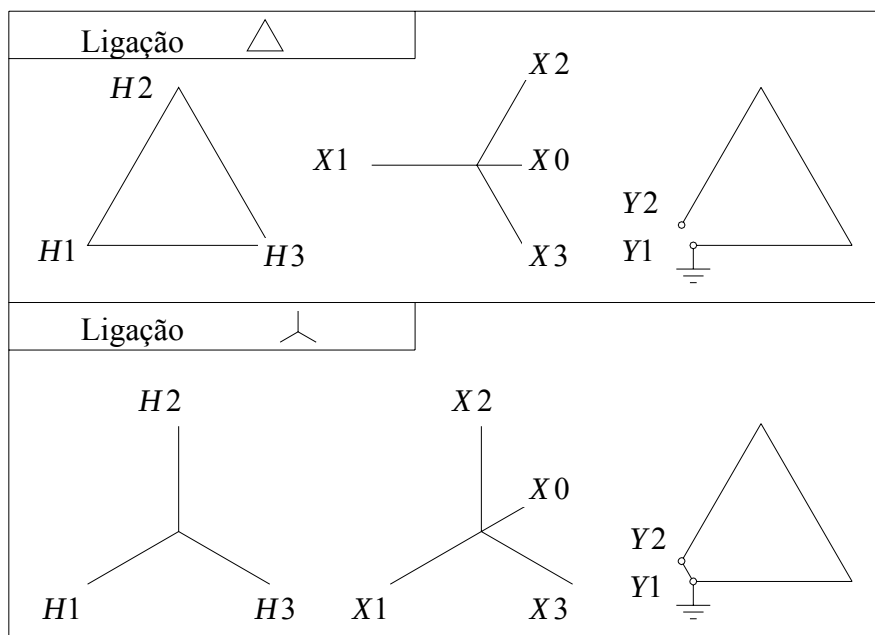


Figura 2.1 – Diagrama fasorial do transformador.

2.3 Características Construtivas do Transformador Regulador

2.3.1 Núcleo do Transformador

O núcleo do transformador é constituído de chapas de aço silício para fins elétricos, de grãos orientados, com envelhecimento máximo admissível de 5% conforme NBR 9119. As chapas são adequadamente posicionadas por uma estrutura apropriada, que serve como meio de centrar e firmar, no tanque, o conjunto núcleo e enrolamento, de tal modo que o mesmo não tenha movimento em qualquer direção.

O núcleo é aterrado na culatra através de um único ponto, por meio de uma fita de cobre conectando a estrutura metálica que faz a fixação do núcleo. A estrutura metálica tem ligação elétrica para o tanque de modo que o aterramento do núcleo seja eficaz.

O núcleo do transformador é do tipo núcleo envolvido, que utiliza chapas de espessura de 0,27 mm com material isolante do tipo carlite, fabricação Acesita, com as seguintes características técnicas:

- Perdas de 1,17 W/kg;

- Sob uma frequência de 60 Hz;
- Para um fluxo de 17.000 G.

O núcleo possui a dimensão construtiva apresentada na figura 2.2. O núcleo possui a mesma área de seção na culatra inferior e superior e nas colunas. A área da seção é 1.304 cm². A curva de magnetização deste núcleo é apresentada na figura 2.3.

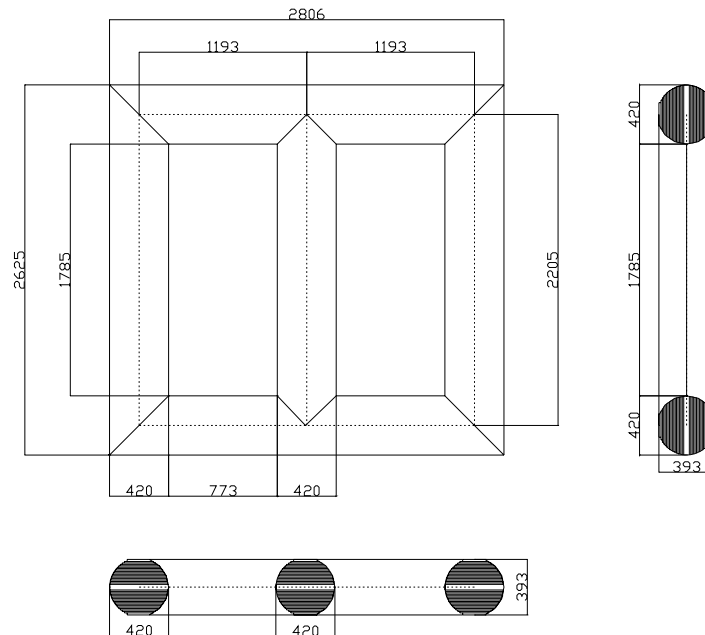


Figura 2.2 – Dimensões do núcleo do transformador.

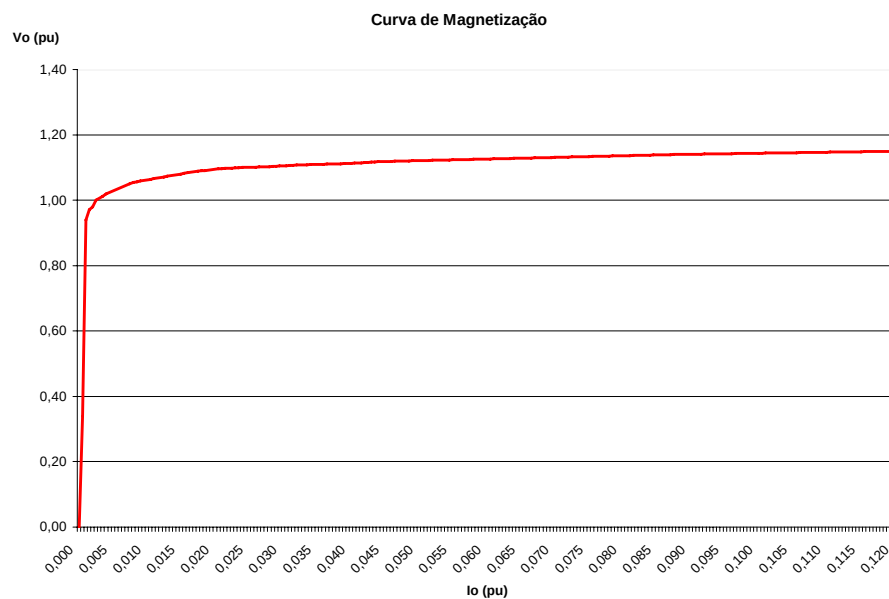


Figura 2.3 – Curva de magnetização sem carga – lado alta tensão.

2.3.2 Enrolamentos do Transformador

O transformador possui cinco enrolamentos por fase, com a seguinte funcionalidade:

- a. Enrolamento terciário (TER): Enrolamento com 130 espiras, localizado em volta do núcleo. Este enrolamento tem o objetivo de permitir a circulação de correntes de sequência zero quando o transformador for ligado em estrela – estrela/aterrado. Observar-se no diagrama unifilar do transformador, que o enrolamento localizado na fase central é montado invertido em relação às outras fases, para permitir a ligação série dos enrolamentos;
- b. Enrolamento secundário (BT): Enrolamento com 130 espiras, localizado logo acima do enrolamento terciário. Sua funcionalidade é alimentar as cargas deste transformador;
- c. Enrolamento primário: O enrolamento primário é dividido em três enrolamentos: enrolamento alta tensão (AT), enrolamento complementar (S) e enrolamento de regulação (RF);
 - c.1 Enrolamento de alta tensão (AT): Enrolamento com 1240 espiras, localizado logo após o enrolamento secundário. Este enrolamento é dividido em duas partes iguais de 620 espiras. Com a finalidade de permitir a conexão do enrolamento complementar (S) e enrolamento de regulação (RF) no centro do enrolamento de alta tensão. Com isso, tem-se um amortecimento dos transitórios de tensão no comutador;
 - c.2 Enrolamento complementar (S): Enrolamento com 131 espiras, localizado logo após o enrolamento de alta tensão (AT). Sua funcionalidade é complementar as espiras necessárias para a operação do transformador na tensão de 84 kV, mantendo os mesmo volts/espira na tensão de 131,6 kV. Quando o transformador opera na tensão 131,6 kV, este enrolamento não é percorrido pela corrente primária;

- c.3 Enrolamento de regulação (RF): Enrolamento composto por oito bobinas independentes conectadas no comutador, com 136 espiras por bobina. Este enrolamento está localizado após o enrolamento complementar (S).

A figura 2.4 mostra a disposição dos enrolamentos no transformador e as dimensões dos respectivos enrolamentos.

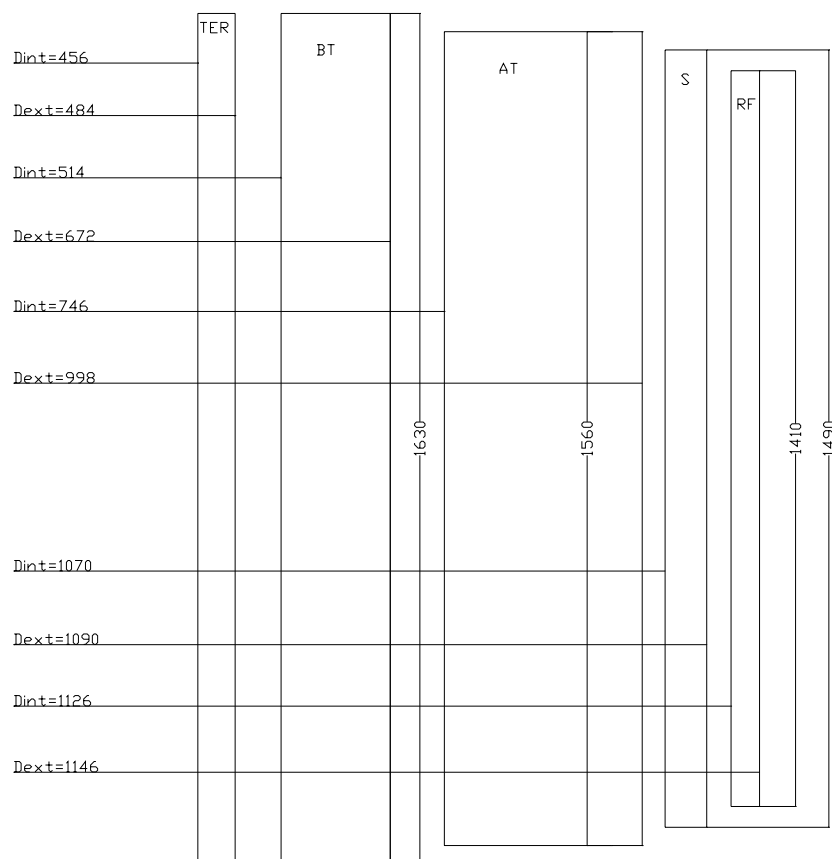


Figura 2.4 – Dimensões dos enrolamentos.

A figura 2.5 mostra os valores referentes ao efeito capacitivo existente entre os enrolamentos, núcleo e tanque. Dado fornecido pelo fabricante, os valores são:

$$\begin{array}{ll} C_1 = 4.086\text{pF} & C_2 = 3.835\text{pF} \\ C_3 = 2.207\text{pF} & C_4 = 3.182\text{pF} \\ C_5 = 6.269\text{pF} & C_6 = 780\text{pF} \end{array}$$

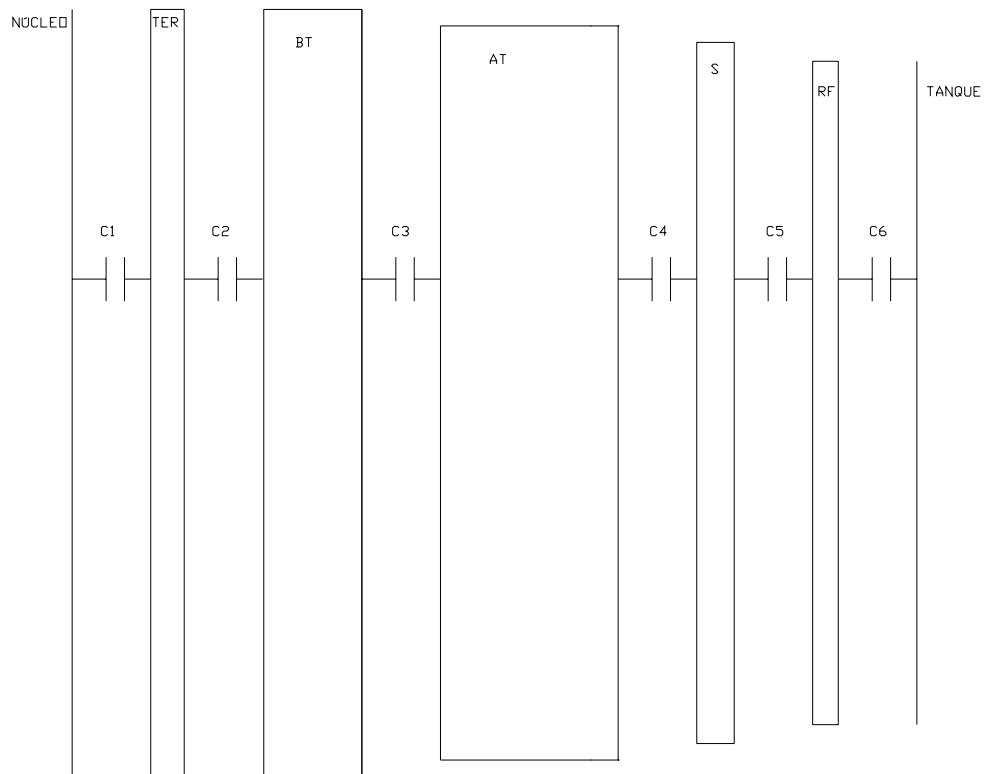


Figura 2.5 – Capacitâncias internas.

2.4 Curva de Inrush de Magnetização

A figura 2.6 mostra a curva de inrush de magnetização do transformador, energizando pelo lado da alta tensão e para ligação em delta.

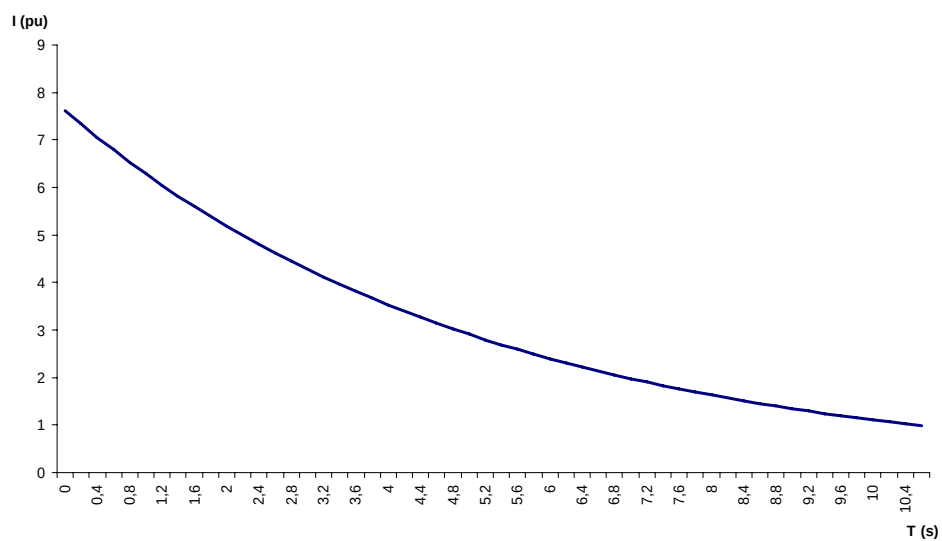


Figura 2.6 – Curva de Inrush do transformador.

2.5 Ensaios de Rotina

Quando da fabricação deste equipamento, são realizados os ensaios de rotina e de tipo pelo fornecedor. Através dos resultados destes ensaios podem-se calcular alguns dos parâmetros do transformador. Os ensaios realizados possuem os seguintes objetivos:

- Ensaio de perdas a vazio: Este ensaio tem o objetivo de obter o valor eficaz das correntes de magnetização do transformador em regime permanente e as perdas no núcleo, energizando o transformador na tensão nominal;
- Ensaio de perdas em carga: Este ensaio tem o objetivo de obter as perdas joule e as reatâncias de dispersão, energizando o transformador na corrente nominal;
- Medição das resistências dos enrolamentos: Este ensaio tem o objetivo de obter as resistências dos enrolamentos de cada fase;
- Medição da relação de transformação: Este ensaio tem o objetivo de obter o erro da relação de transformação para cada posição do comutador.
- Medição da impedância de sequência zero: Este ensaio tem o objetivo de determinar a reatância representativa do fluxo de dispersão ou sequência zero.

2.5.1 Ensaio de Perdas a Vazio

A tabela 2.3 mostra os resultados obtidos do ensaio de perdas a vazio do transformador e a tabela 2.4 mostra os valores corrigidos. O ensaio foi realizado energizando o enrolamento de baixa tensão com o neutro isolado, evitando maiores distorções na forma de onda de corrente uma vez que não se permite a circulação de 3ª harmônica, e com o enrolamento de alta tensão em vazio.

Tabela 2.3 – Valores obtidos do ensaio a vazio.

%	V (V)	V _{med.} (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _T (A)	I _o (%)	W _A (W)	W _B (W)	W _C (W)	W _T (W)
95	13116	13141	1,017	0,703	1,143	0,954	0,057	5260	4180	7650	17090
100	13786	13839	1,675	1,178	1,763	1,539	0,092	5500	5030	9690	20230
105	14421	14539	3,312	2,452	3,466	3,017	0,184	5060	6150	12830	24050

Tabela 2.4 – Valores corrigidos do ensaio a vazio.

Valores Corrigidos						Valores Garantidos		
V (V)	I _o (A)	I _o (%)	W _o (W)	I _o / I _{og}	W _o / W _{og}	Base (MVA)	I _{og} (A)	W _{og} (W)
13110	0,954	0,057	17120			40		
13800	1,539	0,092	20310	0,307	0,846	40	0,3	24000
14490	3,077	0,164	24250			40		

2.5.2 Ensaio de Curto Circuito

As tabelas 2.5 e 2.6 mostram os resultados obtidos no ensaio de perdas em carga do transformador, nas ligações 131,6kV e 84 kV do enrolamento de alta tensão, respectivamente.

A tabela 2.7 mostra os valores do ensaio de perdas em carga, corrigidos para a temperatura de referência de 75° C , com o cálculo da impedância percentual do transformador.

Tabela 2.5 – Valores obtidos do ensaio de curto-circuito com alta tensão ligada em estrela.

Tap	Potência (MVA)	Temp. (°C)	I (A)	I _a (A)	Z (V)	W _A (W)	W _B (W)	W _C (W)	W _T (W)
1	32	22,8	1338,8	1341	2805	39600	42180	51640	133420
2	32	22,8	1338,8	1342	2793	40670	42370	51660	134700
3	32	22,8	1338,8	1340	2772	40510	42810	51630	134950
4	32	22,8	1338,8	1343	2758	40690	43310	51750	135750
5	32	22,8	1338,8	1341	2731	40680	43430	51350	135460
6	32	22,8	1338,8	1342	2710	41050	43600	51080	135730
7	32	22,8	1338,8	1337	2680	40975	49953	50216	135144
8	32	22,8	1338,8	1345	2670	41917	44401	50476	136794
9	32	22,8	1338,8	1343	2648	41510	42330	49420	133260
10	32	22,8	1338,8	1340	2637	42604	45094	50940	138638
11	32	22,8	1338,8	1338	2625	43220	46390	51859	141469
12	32	22,8	1338,8	1334	2611	43889	47529	52735	144153
13	32	22,8	1338,8	1341	2613	45418	49417	54328	149163
14	32	22,8	1338,8	1331	2584	46013	49905	54425	150343
15	32	22,8	1338,8	1341	2590	48223	51884	56040	156147
16	32	22,8	1338,8	1341	2580	49799	52969	57062	159830
17	32	22,8	1338,8	1332	2551	49860	51350	56010	157220

Tabela 2.6 – Valores obtidos do ensaio de curto-circuito com alta tensão ligada em delta.

Tap	Potência (MVA)	Temp. (°C)	I (A)	I _a (A)	Z (V)	W _A (W)	W _B (W)	W _C (W)	W _T (W)
1	32	22,5	199,9	198,6	19578	31490	50860	45160	127510
2	32	22,5	202,2	202,4	19409	32520	51970	45664	130154
3	32	22,5	204,6	180,4	16798	25490	40390	35366	101246
4	32	22,5	207	207,2	18702	32950	51940	45420	130310
5	32	22,5	209,5	191,3	16735	27800	43080	37700	108580
6	32	22,5	212	194,7	16464	28270	43360	38180	109810
7	32	22,5	214,6	214,2	16698	30530	46020	40790	117340
8	32	22,5	217,2	217,3	17230	33760	50770	45440	129970
9	32	22,5	219,9	217,7	16704	32730	49190	44300	126220
10	32	22,5	222,7	223,3	16632	34650	51550	46020	132230
11	32	22,5	225,6	225,8	16307	35600	52210	46620	134430
12	32	22,5	228,6	228,6	16012	36690	53140	47290	137120
13	32	22,5	231,5	232,1	15751	38050	54130	48200	140380
14	32	22,5	234,6	235,2	15429	39160	54810	49120	143090
15	32	22,5	237,8	238,9	15156	40570	55560	50200	146330
16	32	22,5	241	249,3	14738	41150	55290	50340	146780
17	32	22,5	244,4	233,1	13823	38550	51170	47000	136720

Tabela 2.7 – Valores corrigidos do ensaio a curto-circuito.

Valores Corrigidos a 75 C						
Tap	Alta Tensão ligada em estrela			Alta Tensão ligada em delta		
	Base (MVA)	Perdas (W)	Impedância (%)	Base (MVA)	Perdas (W)	Impedância (%)
1	32	148723	20,29	32	144221	21,34
2	32	149747	20,19	32	144880	21,23
3	32	150459	20,07	32	145223	21,1
4	32	150749	19,92	32	145300	20,94
5	32	151024	19,76	32	145507	20,78
6	32	151271	19,6	32	145576	20,57
7	32	151896	19,45	32	145247	20,38
8	32	152071	19,26	32	145177	20,21
9	32	149420	19,13	32	144825	20,09
				40	226289	25,11
10	32	155648	19,09	32	148046	20
11	32	159250	19,03	32	151100	19,89
12	32	163373	18,99	32	154389	19,79
13	32	167493	18,9	32	157612	19,69
14	32	171633	18,83	32	160888	19,54
15	32	175922	18,74	32	164108	19,41
16	32	180389	18,66	32	167564	19,29
17	32	181563	18,57	32	170987	19,17

Este ensaio de perdas em carga permite determinar a reatância de dispersão. Os fluxos no enrolamento interno são neutralizados pelo enrolamento externo. Então restam apenas os fluxos entre os enrolamentos e os fluxos de dispersão.

2.5.3 Ensaio de Medição de Resistência dos Enrolamentos

As tabelas 2.8, 2.9 e 2.10 apresentam os resultados obtidos do ensaio de medição de resistência ôhmica, medições estas realizadas através de um medidor de corrente contínua à temperatura ambiente. Mede-se nos terminais das buchas do transformador, isto é, após as ligações de fechamento dos enrolamentos, que são realizados internamente.

Tabela 2.8 – Valores obtidos no ensaio de resistência do enrolamento de baixa tensão.

Unidade em mΩ		
Temperatura		23,8 °C
X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0
9,055	8,997	9,050

Tabela 2.9 – Valores obtidos no ensaio de resistência do enrolamento terciário.

Unidade em mΩ	
Temperatura	23,8 °C
Y1 - Y2	
78,273	

Tabela 2.10 – Valores obtidos no ensaio de resistência do enrolamento de alta tensão.

Temperatura		23,8 °C	Unidade em mΩ			
Tap	Alta Tensão ligada em estrela			Alta Tensão ligada em delta		
	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1
1	2275	2280	2280	842,138	841,940	843,057
2	2234	2239	2239	828,471	828,335	829,259
3	2194	2199	2199	814,896	814,678	815,720
4	2154	2158	2158	801,440	801,126	802,162
5	2112	2117	2117	787,796	787,703	788,585
6	2172	2076	2076	774,248	774,174	774,964
7	2032	2036	2036	760,683	760,590	761,423
8	1992	1996	1996	747,111	746,915	747,811
9	1947	1951	1950	732,455	732,204	732,980
10	1992	1998	1995	747,185	747,003	747,985
11	2032	2036	2036	760,821	760,711	761,558
12	2073	2077	2077	774,467	774,257	775,218
13	2114	2118	2118	787,981	787,816	788,780
14	2154	2159	2159	801,580	801,416	802,263
15	2195	2200	2199	815,161	815,052	816,040
16	2236	2241	2240	828,733	828,603	829,693
17	2278	2284	2281	842,702	843,118	843,606

2.5.4 Ensaio de Medição da Relação de Transformação

As tabelas 2.11 e 2.12 apresentam os resultados obtidos do ensaio de medição de relação de transformação.

Tabela 2.11 – Valores obtidos no ensaio de relação de transformação, alta tensão ligada em estrela.

Tap	Tensões (kV)		Relação calculada	Relação Medida			
	AT	BT		Fase A	Fase B	Fase C	Erro (%)
1	146,116	13,8	10,59	10,59	10,59	10,59	0,02
2	144,306	13,8	10,46	10,46	10,46	10,46	0,03
3	142,496	13,8	10,33	10,33	10,33	10,33	0,04
4	140,686	13,8	10,19	10,20	10,20	10,20	0,05
5	138,876	13,8	10,06	10,07	10,07	10,07	0,06
6	137,066	13,8	9,932	9,939	9,940	9,940	0,08
7	135,256	13,8	9,801	9,809	9,808	9,810	0,09
8	133,446	13,8	9,670	9,678	9,678	9,679	0,09
9	131,636	13,8	9,539	9,547	9,547	9,548	0,10
10	129,826	13,8	9,408	9,416	9,416	9,416	0,09
11	128,016	13,8	9,277	9,285	9,286	9,286	0,10
12	126,206	13,8	9,145	9,156	9,156	9,156	0,12
13	124,396	13,8	9,014	9,023	9,023	9,025	0,12
14	122,586	13,8	8,883	8,892	8,892	8,893	0,11
15	120,776	13,8	8,752	8,761	8,761	8,761	0,10
16	118,996	13,8	8,621	8,631	8,631	8,631	0,12
17	117,156	13,8	8,490	8,499	8,500	8,500	0,12

Tabela 2.12 – Valores obtidos no ensaio relação de transformação, alta tensão ligada em delta.

Tap	Tensões (kV)		Relação calculada	Relação Medida			
	AT	BT		Fase A	Fase B	Fase C	Erro (%)
1	92,400	13,8	11,60	11,60	11,60	11,60	0,02
2	91,350	13,8	11,47	11,47	11,47	11,47	0,04
3	90,300	13,8	11,33	11,34	11,34	11,34	0,06
4	89,250	13,8	11,20	11,20	11,20	11,21	0,07
5	88,200	13,8	11,07	11,07	11,07	11,08	0,09
6	87,150	13,8	10,94	10,94	10,94	10,94	0,02
7	86,100	13,8	10,81	10,81	10,81	10,81	0,03
8	85,050	13,8	10,67	10,68	10,68	10,68	0,05
9	84,000	13,8	10,54	10,55	10,55	10,55	0,07
10	82,950	13,8	10,41	10,42	10,42	10,42	0,09
11	81,900	13,8	10,28	10,29	10,29	10,29	0,10
12	80,850	13,8	10,15	10,16	10,16	10,16	0,12
13	79,800	13,8	10,02	10,03	10,03	10,03	0,14
14	78,750	13,8	9,884	9,900	9,900	9,902	0,18
15	77,700	13,8	9,752	9,769	9,769	9,771	0,19
16	76,650	13,8	9,620	9,638	9,639	9,641	0,21
17	75,600	13,8	9,489	9,508	9,508	9,510	0,23

2.5.5 Ensaio de Impedância de Seqüência Zero

Neste ensaio mede-se a indutância devido ao fluxo que se fecha pelo ar e pelo tanque do transformador, em cada coluna. São realizados dois ensaios, sendo obtidos os valores mostrados na tabela 2.13. Os esquemas de ligação estão mostrados na figura 2.7 e 2.8, para ligação da alta tensão em estrela e delta, respectivamente.

Tabela 2.13 – Valores obtidos no ensaio de impedância seqüência zero, base de 40 MVA.

Ligação da Alta Tensão	Alimentação	Comutador Posição	Demais Enrolamento	Medições	
				Vmed. (V)	Imed. (A)
Estrela	Enrolamento BT	1	AT - Aberto	22,10	181,30
			TER - Fechado		
		9B	AT - Aberto	22,27	182,04
			TER - Fechado		
		17	AT - Aberto	22,30	182,90
			TER - Fechado		
Delta	Enrolamento BT	1	AT - Aberto	77,10	180,64
			TER - Aberto		
		9B	AT - Aberto	72,90	181,18
			TER - Aberto		
		17	AT - Aberto	69,30	180,68
			TER - Aberto		

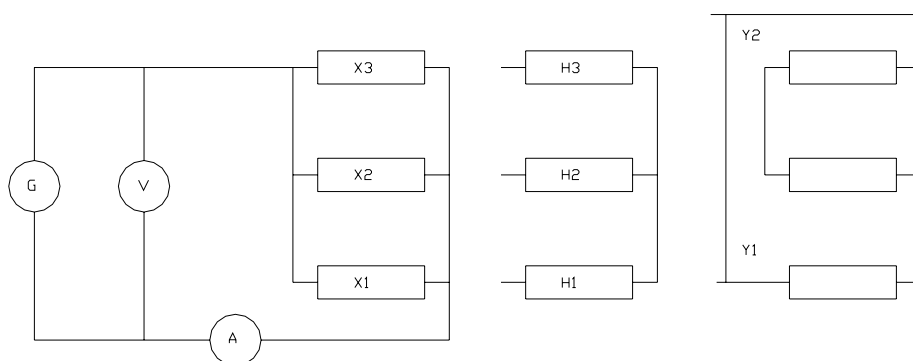


Figura 2.7 – Diagrama de ligação ensaio de impedância seqüência zero, alta tensão ligada em estrela.

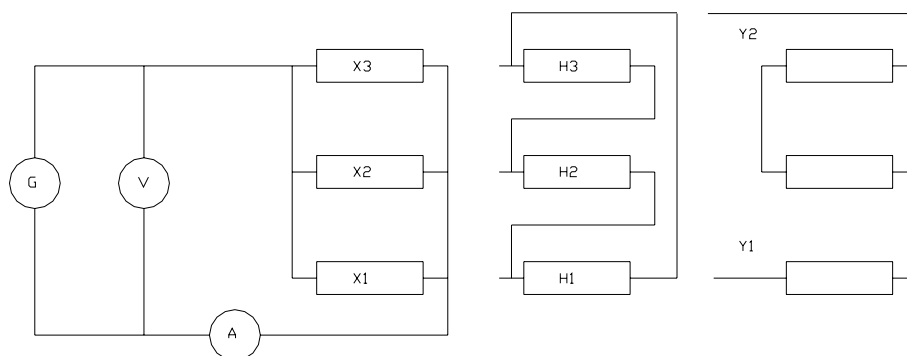


Figura 2.8 – Diagrama de ligação ensaio de impedância seqüência zero, alta tensão ligada em delta.

O cálculo da impedância de seqüência zero e seu valor percentual em relação à base de 40 MVA são determinados através das equações 2.1 e 2.2, respectivamente.

$$Z_0 = \frac{3 \times V_{med}}{I_{med}} \quad (\Omega/fase) \quad (2.1)$$

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3} \times 3 \times I_n \times V_{med}}{I_{med} \times V_n} \times 100 \quad (\%) \quad (2.2)$$

A tabela 2.14 mostra os resultados obtidos de impedância de seqüência zero em função dos ensaios realizados.

Tabela 2.14 – Resultados obtidos ensaio de impedância seqüência zero, base de 40 MVA.

Ligação do Enrolamento de AT	Comutador Posição	Imed / fase (A)	Zo (Ω/fase)	Zo (%)
Estrela	1	60,43	0,3657	7,68
	9B	60,68	0,3670	7,71
	17	60,97	0,3658	7,69
Delta	1	60,21	1,2804	26,89
	9B	60,39	1,2071	25,35
	17	60,23	1,1510	24,17

2.6 Considerações Finais

Com os dados construtivos do transformador regulador e os ensaios de fabricação, segundo a norma ABNT, poderão ser determinados os parâmetros elétricos e magnéticos para a implementação da modelagem do mesmo.

Os ensaios de fabricação também serão utilizados como referência para validar a modelagem a ser implementada, pois seus resultados são utilizados para comparação com aqueles oriundos de um experimento do modelo, seguindo os procedimentos da norma ABNT.

Um ponto importante e primordial para modelagem adequada do transformador é à disposição dos enrolamentos no núcleo e a quantidade de espiras que cada enrolamento tem.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSFORMAÇÃO DO TRANSFORMADOR REGULADOR

3.1 Introdução

As modelagens de transformadores reguladores usualmente encontradas nas literaturas nacionais e internacionais contemplam a regulação de tensão utilizando tap fixo. Na simulação escolhe-se o tap que o mesmo deverá operar e desenvolve-se a modelagem para este tap. Este método é aplicado tanto para estudos de transitórios como para estudos de fluxo de carga e curto-circuito.

O objetivo deste capítulo é criar uma modelagem do sistema de transformação do transformador regulador, realizando a comutação. O modelo proposto tem o objetivo de permitir a realização de estudos dinâmicos do sistema elétrico, para levantamento do comportamento da tensão, corrente e potência em diversas condições operativas e de ocorrências do sistema elétrico, o qual este transformador regulador está exposto, bem como a variação de carga que o mesmo está alimentando.

3.2 Transformador Regulador

Usualmente os transformadores são equipados com dispositivos para mudança de tap, para permitir o controle da tensão do sistema. A comutação de tap é realizada através de um dispositivo que permite selecionar um número de espiras do enrolamento primário, mantendo-se constante a tensão nos terminais secundários.

Qualquer que seja o tipo de construção do transformador trifásico, os enrolamentos primário e secundário da mesma fase são colocados sobre a mesma coluna do núcleo, diminuindo assim a dispersão magnética. Dessa forma, podem ser utilizados dois tipos de enrolamentos, o do tipo concêntrico ou tubular e o do tipo bobinas alternadas ou de discos [8] e [9].

A figura 3.1 mostra o diagrama unifilar do transformador regulador do qual será desenvolvido o modelo.

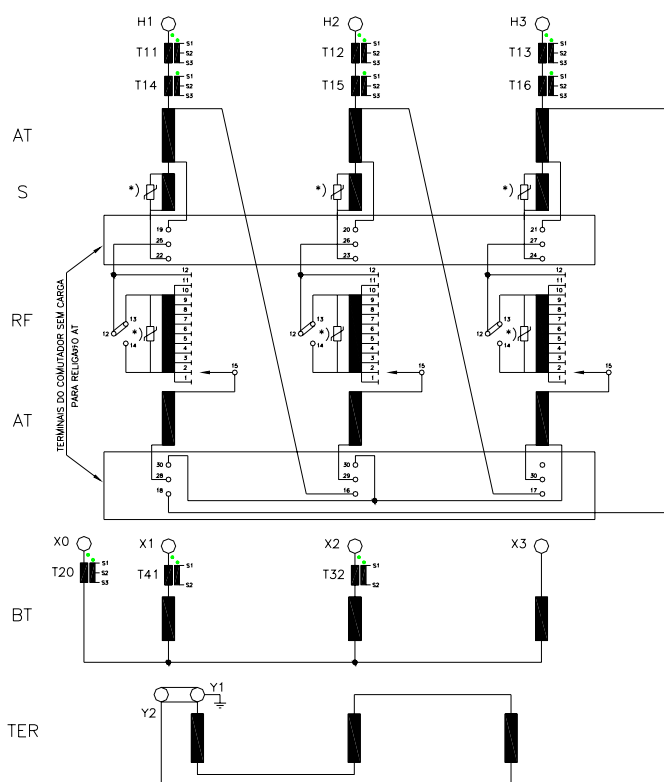


Figura 3.1 – Diagrama unifilar do transformador regulador.

Onde: AT – Enrolamento de alta tensão;
S – Enrolamento complementar;
RF – Enrolamento de regulação;
BT – Enrolamento de baixa tensão;
TER – Enrolamento terciário.

3.3 Circuito Magnético do Transformador

Os transformadores trifásicos do sistema de subtransmissão são do tipo núcleo envolvido com três colunas. Estes transformadores são projetados para a utilização em sistemas equilibrados e, por consequência, a somatória dos fluxos magnéticos produzidos pelos enrolamentos das três fases é

nula. Entretanto, em casos de carregamento desequilibrado, devido a falhas do sistema elétrico, ou distorções na forma de onda da tensão ou em situações transitórias de manobras, pode ocorrer o surgimento de fluxos que, quando somados nas três fases, não se anulam. Se tal fato ocorrer deverá haver uma parcela de fluxo se fechando através do ar e tanque do transformador.

Este fluxo, chamado fluxo de sequência zero, não possui um caminho magnético através do núcleo. O fluxo circulará através de circuito magnético formado pelo ar e o tanque do transformador. Este circuito é de alta relutância, o que implica em baixa impedância de magnetização.

3.4 Representação do Circuito Magnético

As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostram a distribuição de fluxo magnético nos enrolamentos e colunas das três fases do transformador regulador, utilizando as referências [4] e [5]. Nessas figuras, os fluxos magnéticos são divididos, de acordo com os seus caminhos, em:

- Fluxo magnético que concatena todos os enrolamentos de uma mesma fase. Este é o fluxo que se estabelece no caminho dado pelo material ferromagnético do núcleo através das colunas φ_{nuA} , φ_{nuB} e φ_{nuC} ;
- Fluxo magnético cujo caminho é o material ferromagnético do núcleo através das culatras φ_{sAB} , φ_{sBC} , φ_{iAB} e φ_{iBC} ;
- Fluxo magnético que concatena todos os enrolamentos de uma mesma fase, cujo caminho é pelo ar entre a coluna e o enrolamento terciário φ_{amA} , φ_{amB} e φ_{amC} ;
- Fluxo de dispersão entre os enrolamentos de uma mesma fase, caminho dado através do espaço de ar entre os enrolamentos primário e secundário de cada fase $\varphi_{ad_{BT-TER}}$, $\varphi_{ad_{AT-BT}}$, $\varphi_{ad_{AT-S}}$ e $\varphi_{ad_{S-RF}}$;
- Fluxo de dispersão entre fases, caminho magnético correspondente ao tanque do transformador e ao espaço de ar externo entre as culatras superior e inferior do núcleo de ferro φ_{efA} , φ_{efB} e φ_{efC} .

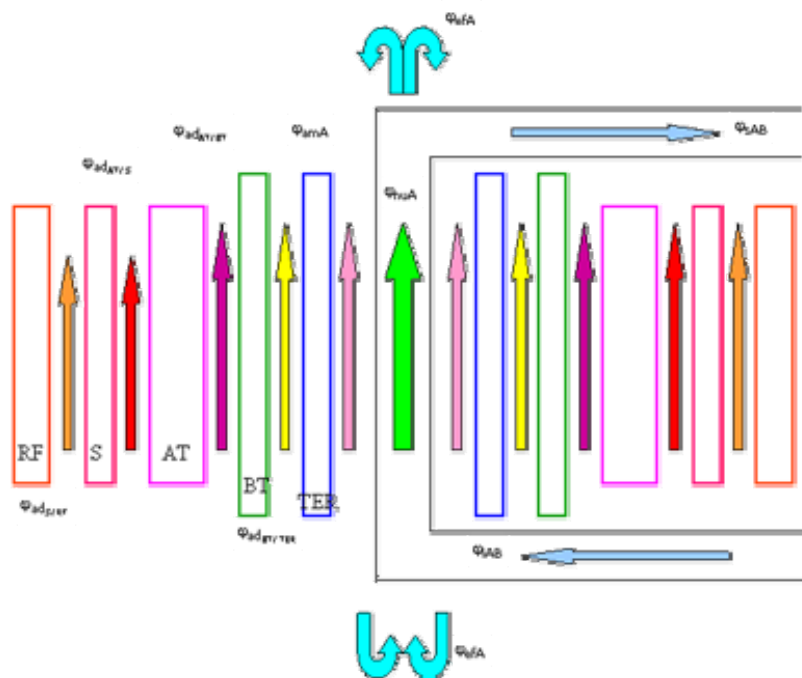


Figura 3.2 – Distribuição de fluxos magnéticos em um transformador regulador de núcleo envolvido, representação da coluna A.

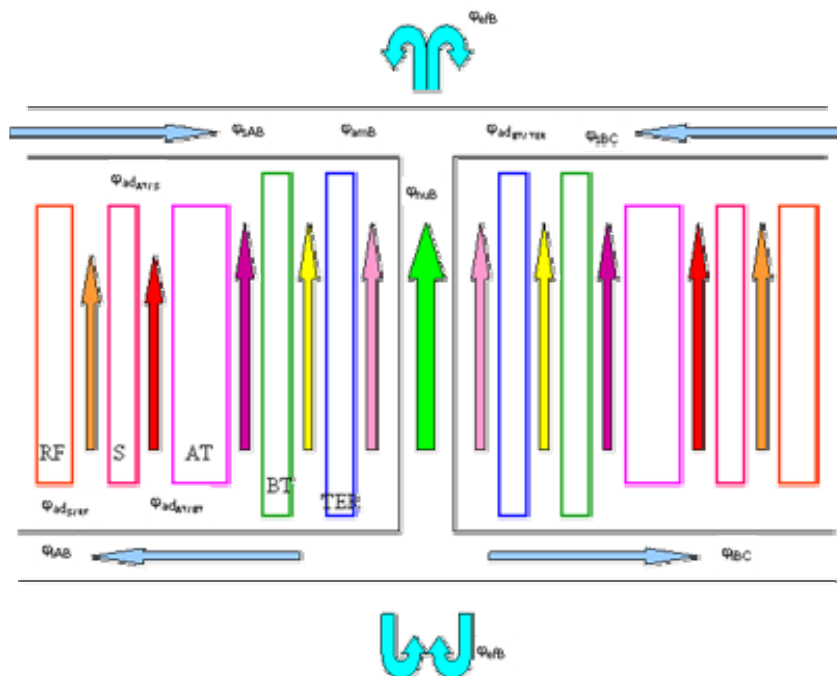


Figura 3.3 – Distribuição de fluxos magnéticos em um transformador regulador de núcleo envolvido, representação da coluna B.

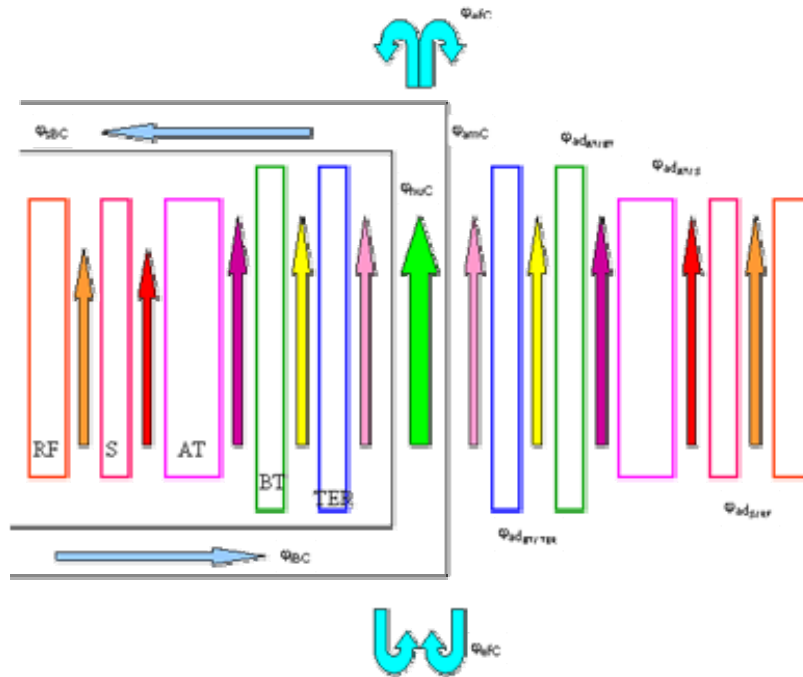


Figura 3.4 – Distribuição de fluxos magnéticos em um transformador regulador de núcleo envolvido, representação da coluna C.

O circuito magnético equivalente com a representação das forças magnetomotrizes e relutâncias em correspondência com as vias de fluxo magnético mostradas nas figuras 3.2, 3.3 e 3.4 estão ilustradas nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

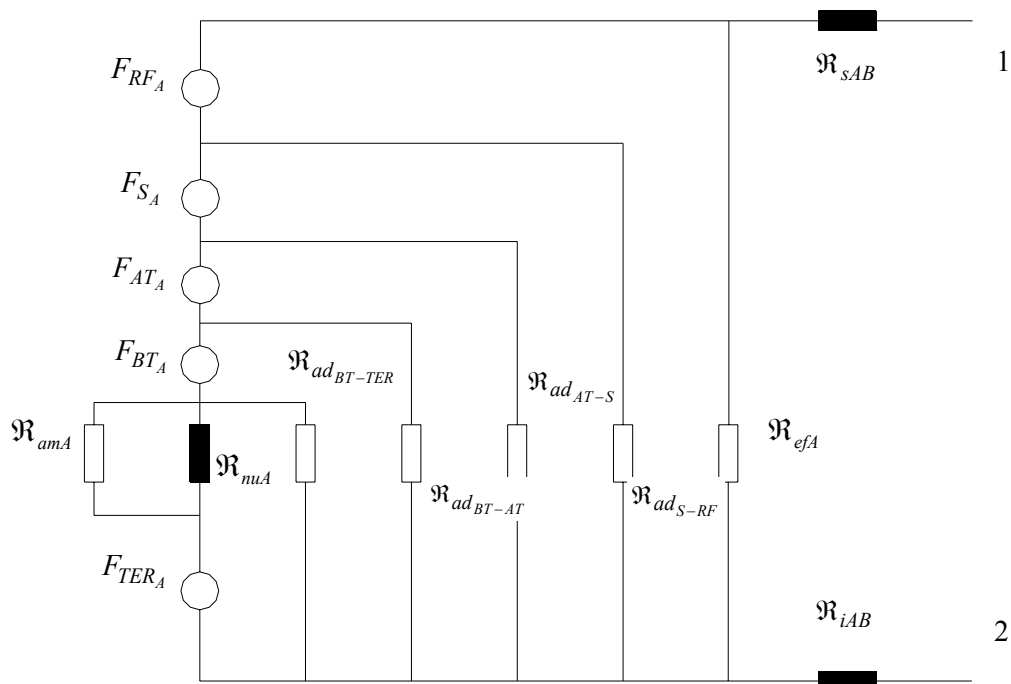


Figura 3.5 – Circuito magnético equivalente do transformador da coluna A.

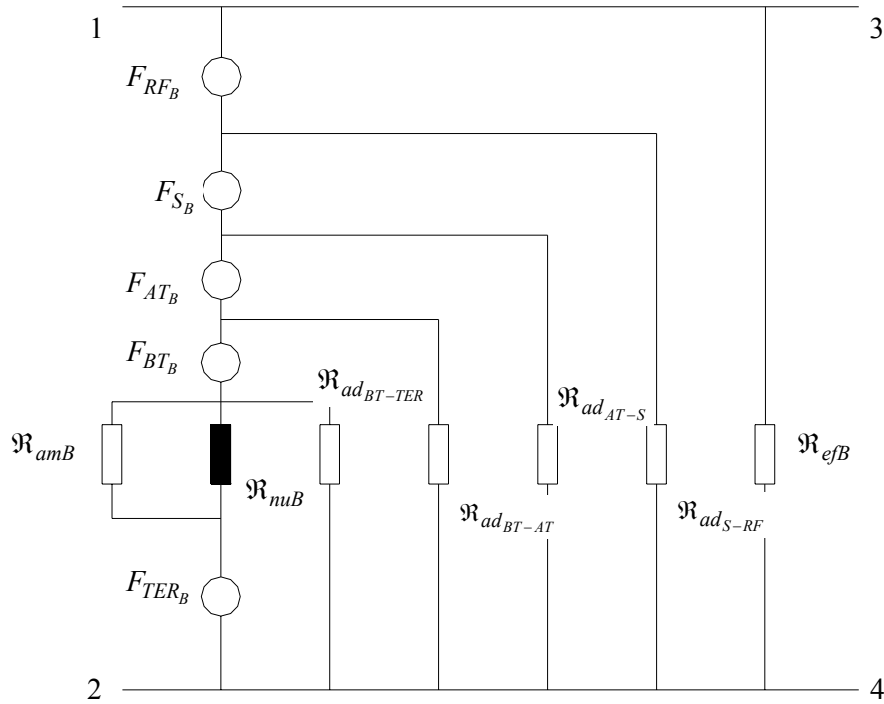


Figura 3.6 – Circuito magnético equivalente do transformador da coluna B.

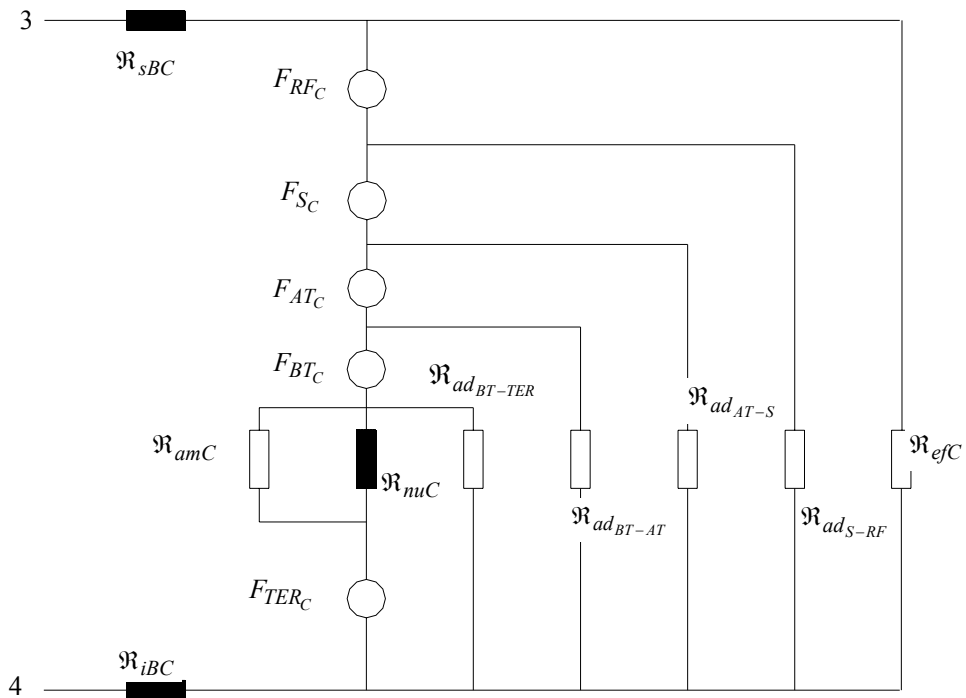


Figura 3.7 – Circuito magnético equivalente do transformador da coluna C.

As relutâncias não lineares do material ferromagnético são representadas nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7 pelos retângulos em negrito e correspondem às:

- Relutâncias das colunas de material ferromagnético envolvidas pelos enrolamentos das fases A, B e C ($\mathfrak{R}_{nuA}$, $\mathfrak{R}_{nuB}$ e $\mathfrak{R}_{nuC}$);
- Relutâncias das culatras de material ferromagnético que interligam as três colunas do núcleo trifásico ($\mathfrak{R}_{sAB}$, $\mathfrak{R}_{sBC}$, $\mathfrak{R}_{iAB}$ e $\mathfrak{R}_{iBC}$);

As relutâncias lineares são representadas pelos retângulos vazios e correspondem às:

- Relutâncias do espaço de ar entre as colunas de material ferromagnético e o enrolamento em cada fase ($\mathfrak{R}_{amA}$, $\mathfrak{R}_{amB}$ e $\mathfrak{R}_{amC}$);
- Relutâncias de dispersão entre os enrolamentos de uma mesma fase ($\mathfrak{R}_{ad_{BT-TER}}$, $\mathfrak{R}_{ad_{AT-BT}}$, $\mathfrak{R}_{ad_{AT-S}}$ e $\mathfrak{R}_{ad_{S-RF}}$);
- Relutâncias de dispersão entre fases ($\mathfrak{R}_{efA}$, $\mathfrak{R}_{efB}$ e $\mathfrak{R}_{efC}$).

Esta abordagem para a representação magnética de transformadores trifásicos permite que as interações dos fluxos entre as três fases sejam prontamente estabelecidas.

Nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7 observar-se que o fluxo magnético produzido pela força magnetomotriz do enrolamento externo da fase A pode estabelecer o caminho para sua circulação como segue:

- Uma parcela deverá circular através do caminho de ar e tanque para se fechar através da coluna (φ_{efA});
- Outra parte deverá circular através das relutâncias não lineares das culatras superiores e inferiores se adicionando aos fluxos das outras duas fases e se fechando através da coluna (φ_{iAB} e φ_{sAB}).

Estas duas parcelas se distribuirão na coluna da seguinte forma:

- Uma parte circulará através do espaço de ar entre as duas bobinas, não enlaçando os enrolamentos da bobina interna. Portanto, esta parcela é considerada como fluxo de dispersão (φ_{adA});
- A segunda parte, que enlaça a bobina interna, é subdividida em duas outras:

- Uma que circula pelo material ferromagnético do núcleo (φ_{nuA});
- Outra que circula pelo espaço de ar entre a bobina interna e o núcleo magnético (φ_{amA}).

Observa-se que a grande parte do fluxo magnético da coluna da fase A, deverá se adicionar aos fluxos magnéticos das outras fases através das culatras superiores e inferiores. Quando a mesma análise é feita para as fases B e C, conclui-se que em termos de força magnetomotriz as culatras estão em série com as colunas externas.

Observa-se também nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7 que as forças magnetomotrizes, F_{RF_A} , F_{RF_B} e F_{RF_C} e a relutância de dispersão $\mathfrak{R}_{ad_{S-RF}}$, correspondente do enrolamento de regulação, estão representadas na forma concentrada. Conforme o diagrama unifilar do transformador, figura 3.1, as forças magnetomotrizes deste enrolamento podem ser representas na forma distribuída, conforme a figura 3.8.

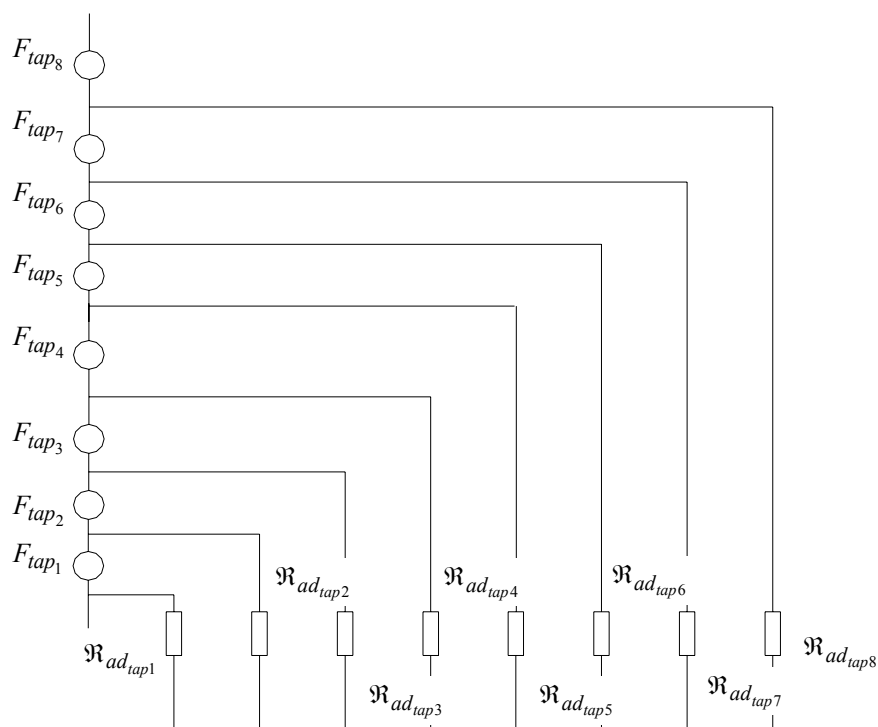


Figura 3.8 – Circuito magnético equivalente do enrolamento de regulação RF da fase A.

Observando a figura 3.8 verifica-se que este enrolamento é formado por 8 bobinas independentes que formarão os taps do transformador. Cada bobina será ligada em série conforme o nível de tensão que o sistema elétrico estiver necessitando. Como cada bobina é constituída por um número de espiras, assim cada bobina se concatenada com o enrolamento AT gerando um fluxo de dispersão. A figura mostra em detalhe a forma distribuída do circuito magnético equivalente do transformador para a coluna A, para as demais colunas aplica-se o mesmo princípio.

As relutâncias não lineares caracterizam o caminho por onde passa o fluxo magnético no núcleo de ferro, como se observa no circuito magnético apresentado nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7, nas junções das chapas que compõem o núcleo normalmente existe pequenos espaços de ar entre as partes, que chamamos de entreferro. As relutâncias associadas aos entreferros dependem das particularidades de projeto e da construção de cada transformador.

No circuito magnético do transformador considera-se que as três colunas são magneticamente iguais assim como as quatro culatras, e os circuitos magnéticos percorridos pelos fluxos do núcleo são iguais entre si nas três fases. Onde as relutâncias consideradas iguais podem ser renomeadas:

- As relutâncias não lineares das colunas $\mathcal{R}_{nuA}$, $\mathcal{R}_{nuB}$ e $\mathcal{R}_{nuC}$ serão representados por $\mathcal{R}_{col}$;
- As relutâncias não lineares das culatras $\mathcal{R}_{sAB}$, $\mathcal{R}_{sBC}$, $\mathcal{R}_{iAB}$ e $\mathcal{R}_{iBC}$ serão representadas por $\mathcal{R}_{cul}$;
- As relutâncias $\mathcal{R}_{amA}$, $\mathcal{R}_{amB}$ e $\mathcal{R}_{amC}$ serão representadas por $\mathcal{R}_{am}$;
- As relutâncias $\mathcal{R}_{efA}$, $\mathcal{R}_{efB}$ e $\mathcal{R}_{efC}$ serão representadas por $\mathcal{R}_{ef}$.

As duas condições de fluxos magnéticos que ocorrem tanto nas colunas como nas culatras, conduz a diferentes valores de relutância $\mathcal{R}_{col}$ e $\mathcal{R}_{cul}$. Entretanto estes valores podem ser determinados através da curva B-H do material magnético, restando como incógnitas as relutâncias dos entreferros e as correntes nos outros dois enrolamentos.

Considerando I_A , I_B e I_C as correntes de magnetização do transformador nos enrolamentos, pode-se escrever um sistema de equações de forças magnetomotrizes, considerando os instantes nos quais o fluxo magnético assume seu valor de pico em cada coluna. Devido a não linearidade do circuito magnético, as correntes nos enrolamentos durante a realização do ensaio a vazio apresentam significativa deformação na sua forma de onda.

Para a condição de valor de pico do fluxo, o fluxo magnético e a indução magnética podem ser determinados através das equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

$$\varphi = \frac{V}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} N f} = \frac{V}{4,44 N f} \quad (3.1)$$

$$B = \frac{\varphi}{A_m} \quad (3.2)$$

Uma vez obtido o valor de B , determina-se o campo magnético H pela curva B-H do material. Com isso, a permeabilidade pode ser calculada pela equação (3.3), onde a densidade de fluxo magnético B e a intensidade de campo magnético H são relacionadas pela permeabilidade do material do núcleo magnético.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.3)$$

O circuito magnético simples consiste em uma fonte de força magnetomotriz fornecendo fluxo através de um caminho magnético contínuo. Dependendo do tipo de caminho magnético, os circuitos magnéticos podem ser lineares ou não lineares. Quando materiais não magnéticos são usados como caminho para o fluxo, μ é constante. Assim, B e H possuem uma relação linear.

Entretanto, quando materiais ferromagnéticos são usados, μ não é constante, de forma que B e H possuam uma relação não linear. Para a determinação da permeabilidade magnética, pode-se usar a curva B - H característica do material. A relutância está relacionada com a permeabilidade do material do núcleo, o comprimento ℓ e a área da seção transversal do caminho magnético dada pela equação (3.4).

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu \times A_m} \quad (3.4)$$

No modelo a ser desenvolvido não serão representados as relutâncias do entreferro, por que, utilizando a curva B-H do conjunto montado do núcleo do transformador regulador, mostrada na figura 2.3 do capítulo II, contempla-se as relutâncias de entreferro.

3.5 Modelo do Circuito Magnético

O modelo do circuito magnético do transformador será desenvolvido a partir do circuito magnético equivalente apresentado nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7, onde será aplicado o princípio da dualidade [10] para a transformação do circuito magnético do transformador em um circuito elétrico equivalente, permitindo realizar os estudos no programa ATP.

O anexo A descreve a aplicabilidade do princípio da dualidade e a metodologia para aplicação do princípio, convertendo um circuito magnético em um circuito elétrico.

A transformação do circuito magnético em circuito elétrico obedece as seguintes regras:

- Inserção dos nós;
- Determinação do nó de referência;
- Relutância linear transforma-se em indutância;
- Relutância não linear transforma-se em indutância saturável.

As figuras 3.9, 3.10 e 3.11 apresentam com destaque os nós para a aplicação do princípio da dualidade. O nó n é o nó de referência externo para determinação do circuito elétrico equivalente.

A força magnetomotriz do enrolamento de regulação apresentado nestas figuras está na forma concentrada, devendo ser transformada para a forma distribuída aperfeiçoando o modelo do transformador.

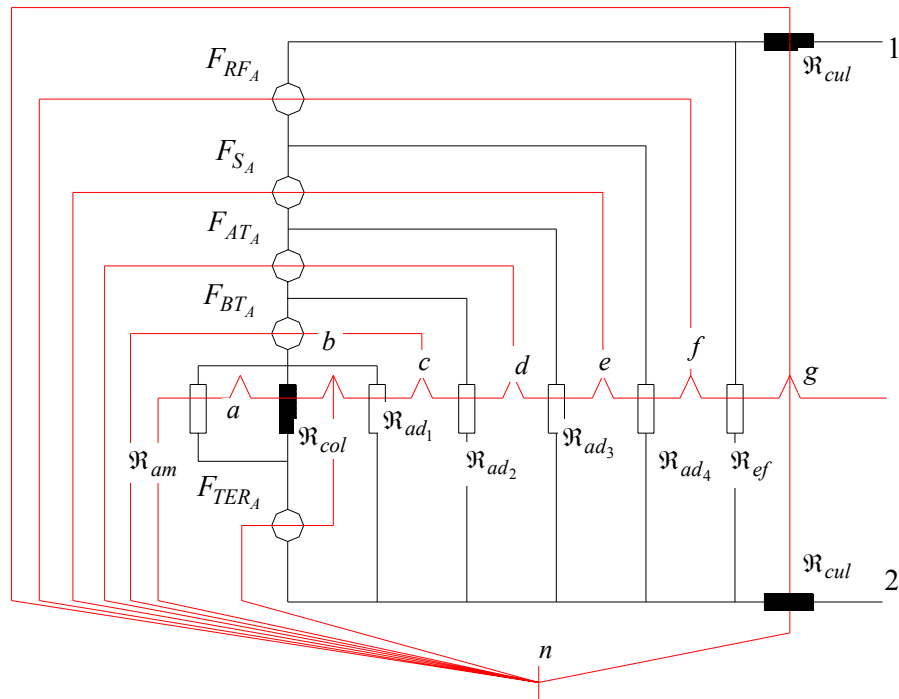


Figura 3.9 – Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, referente à fase A.

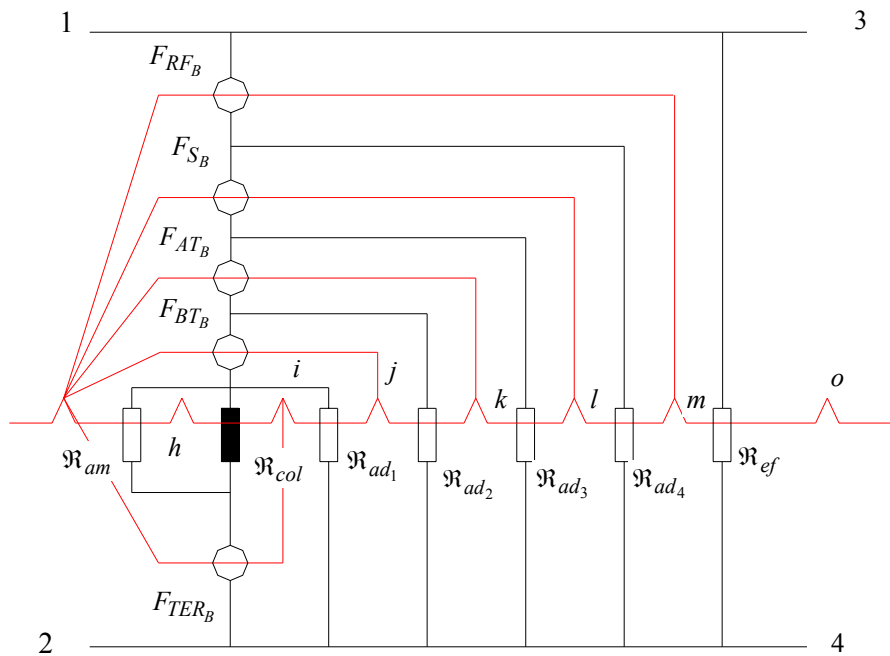


Figura 3.10 – Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, referente à fase B.

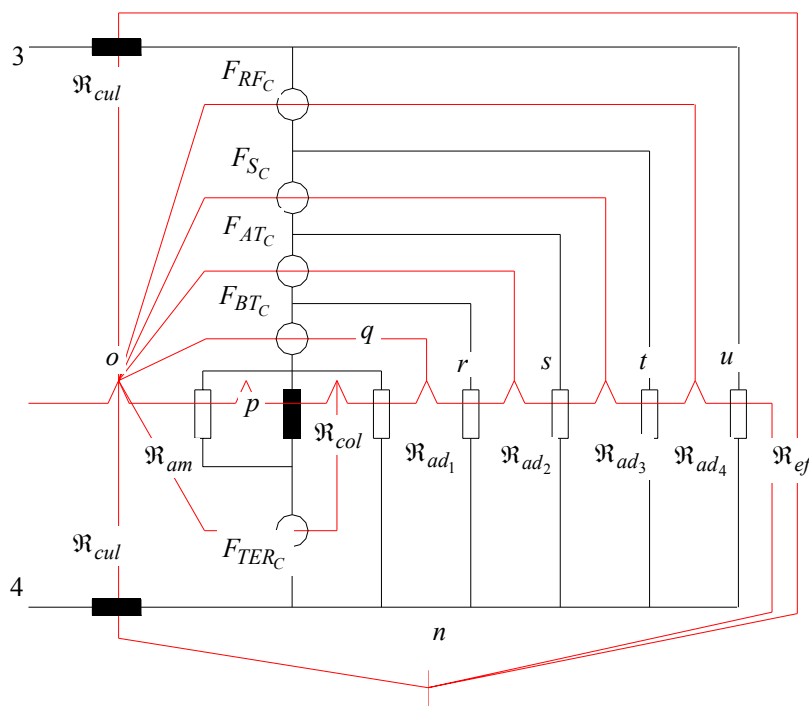


Figura 3.11 – Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, referente à fase C.

Verificando a figura 3.8 onde se tem esta representação do enrolamento de regulação na forma distribuída, insere-se os nós para a aplicação do princípio da dualidade, que é mostrado na figura 3.12. Para as demais fases é a mesma representação.

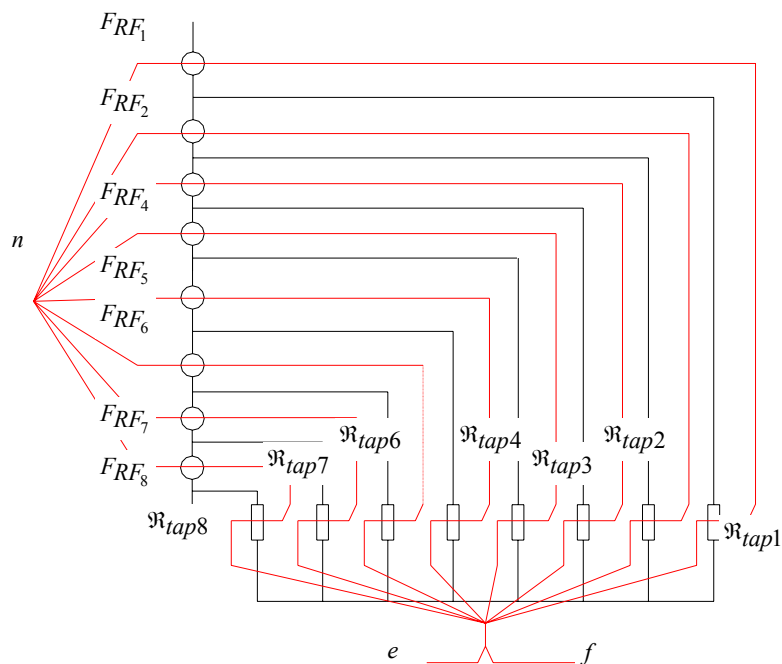


Figura 3.12 – Aplicação do princípio da dualidade do circuito magnético, no enrolamento de regulação na fase A.

Através do circuito representado nas figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12, obtém-se o circuito elétrico equivalente mostrado na figura 3.13, onde cada indutância corresponde a uma relutância e transformadores ideais representam os enrolamentos do transformador.

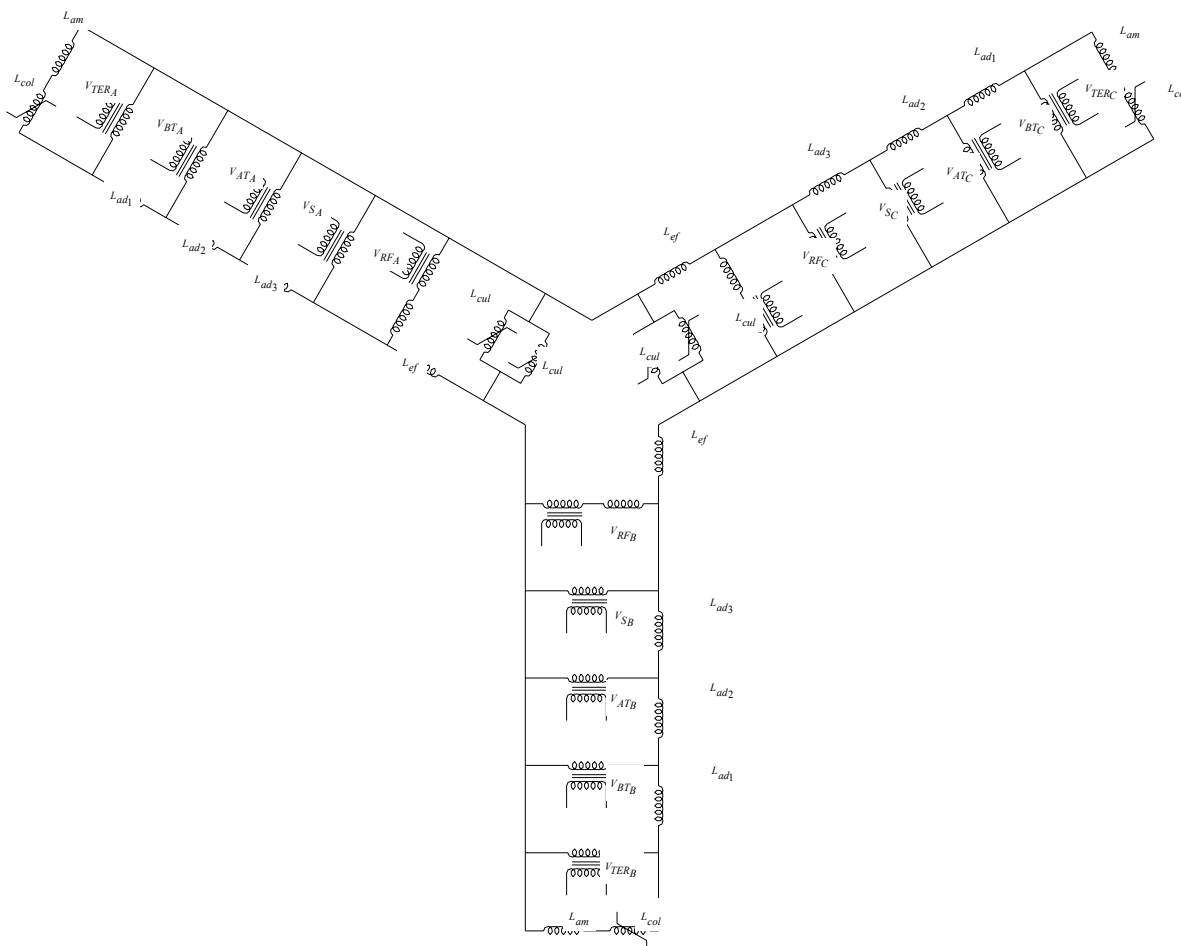


Figura 3.13 – Circuito elétrico equivalente do transformador obtido pela aplicação do princípio da dualidade.

Construtivamente as dimensões físicas do núcleo e dos enrolamentos de cada uma das fases do transformador são semelhantes entre si. As indutâncias correspondentes a esta representação têm valores semelhantes. Com isso, podem-se adotar algumas simplificações.

- As indutâncias não lineares das colunas L_{nuA} , L_{nuB} e L_{nuC} são representadas por L_{col} ;

- As indutâncias não lineares das culatras L_{sAB} , L_{sBC} , L_{iAB} e L_{iBC} serão representadas por L_{cul} , sendo que o equivalente simplificado das indutâncias das culatras é $L_{cul}/2$ já que as indutâncias das culatras inferior e superior são associadas em paralelo;
- As indutâncias L_{amA} , L_{amB} e L_{amC} são representadas por L_{am} ;
- As indutâncias L_{efA} , L_{efB} e L_{efC} são representadas por L_{ef} .

Os indutores não lineares são modelados de acordo com as seguintes correspondências, relacionadas conforme as expressões (3.5) e (3.6):

- Entre a indução magnética da curva $B \times H$ e o fluxo total concatenado no circuito magnético;
- Entre o campo magnético H e a corrente necessária para a produção da força magnetomotriz relativa ao fluxo.

$$\lambda = N \times \varphi \quad (3.5)$$

$$I = \frac{\mathfrak{R} \times \varphi}{N} \quad (3.6)$$

3.6 Perdas no Ferro e Cobre

As perdas no ferro são representadas no circuito elétrico por resistências em paralelo com as indutâncias não lineares das colunas e culatras.

As perdas no cobre são representadas pelas resistências de cada enrolamento inserido em série com o transformador ideal representado no modelo. O transformador ideal é um transformador monofásico linear com indutância de dispersão e perdas no núcleo desprezível.

A figura 3.14 mostra o circuito magnético do transformador com a inclusão das perdas no ferro e no cobre.

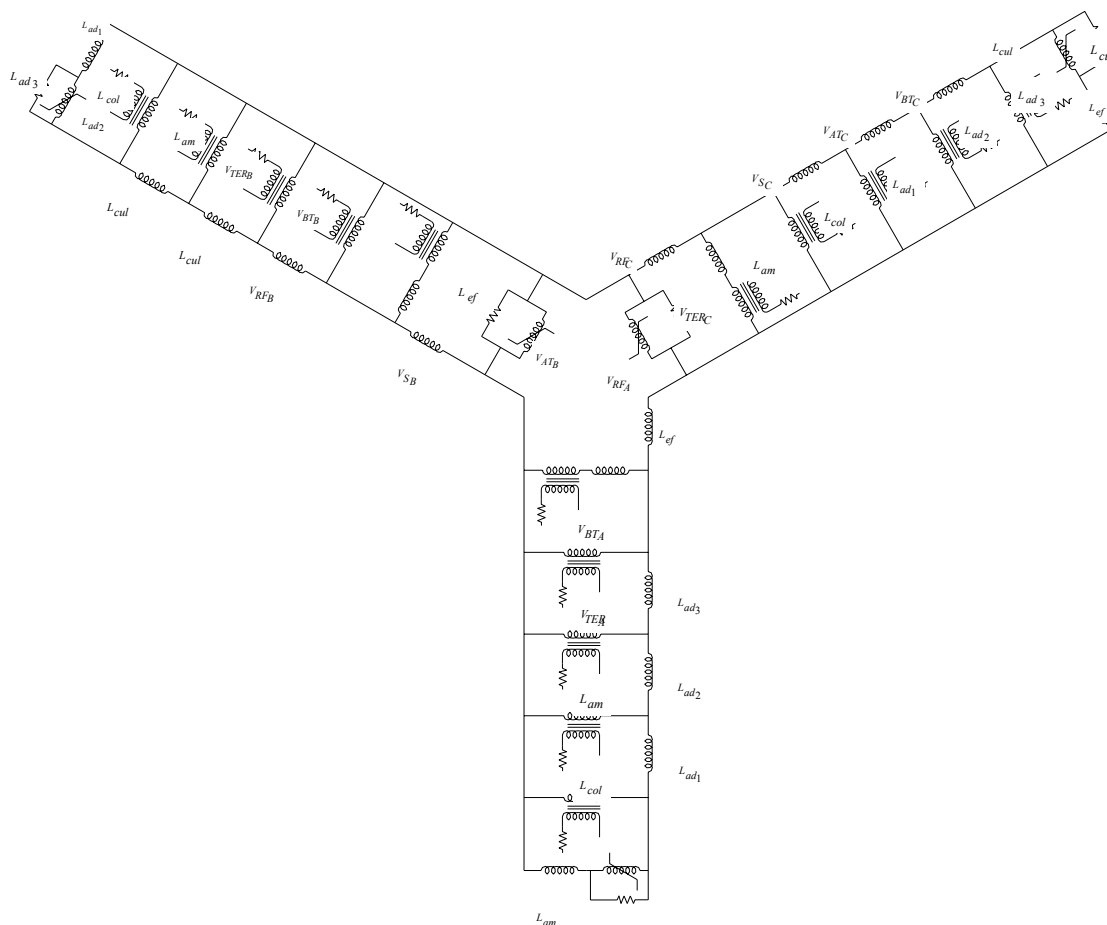


Figura 3.14 – Circuito elétrico equivalente do transformador simplificado.

3.7 Capacitância do Enrolamento

Existem muitas capacitâncias em um transformador e elas não podem ser expressas em uma única equação. Porém, as mais importantes capacitâncias são as listadas abaixo:

- Capacitância do enrolamento para núcleo;
- Capacitância do enrolamento para enrolamento;
- Capacitância de camada para camada no enrolamento;
- Capacitância de espira para espira.

A real capacitância de um transformador é quase impossível de se medir com precisão com uma ponte, porque sua obtenção depende da tensão nos vários pontos do enrolamento.

Como o estudo que está sendo realizado tem o objetivo de verificar o comportamento dinâmico do sistema, onde o transformador está inserido e não o comportamento da distribuição da tensão ao longo do enrolamento do transformador, devem ser consideradas apenas as capacitâncias que estão apresentadas na figura 2.5 do capítulo II, as quais são fornecidas pelo fabricante:

- Capacitâncias entre enrolamentos;
- Capacitâncias entre enrolamento e núcleo;
- Capacitância entre enrolamento e tanque.

3.8 Considerações Finais

Este capítulo apresenta a metodologia para a modelagem do circuito magnético de um transformador, transformando este circuito em um circuito elétrico, aplicando o princípio da dualidade, possibilitando com isso, realizar estudos no programa ATP.

Antes de se construir o modelo do circuito magnético do transformador, teve-se que modelar a forma construtiva do núcleo do transformador e a forma construtiva dos enrolamentos do mesmo.

Essa forma construtiva do enrolamento é importantíssima para a determinação das forças magnetomotrizes dos mesmos e as relutâncias devidas os fluxos de dispersão envolvidos. Esse aprendizado facilitou na construção da modelagem magnética do transformador.

CAPÍTULO IV

MODELAGEM DO SISTEMA ELETROMECHANICO DE COMUTAÇÃO DO TRANSFORMADOR REGULADOR

4.1 Introdução

Todo transformador regulador possui um comutador de derivação em carga, podendo este acessório ser instalado no enrolamento de baixa ou de alta tensão. Esse sistema é muito importante dentro do conjunto do sistema elétrico, pois o mesmo realiza a primeira regulação da tensão para os circuitos de distribuição, diminuindo o impacto no consumidor final, com relação às variações de tensão.

O anexo B traz uma descrição das aplicações deste tipo de acessório, seus principais componentes e sua interligação com os enrolamentos dos transformadores.

O objetivo deste capítulo é criar uma modelagem deste comutador de derivação em carga para realizar a mudança do nível de tensão do transformador automaticamente. A modelagem será desenvolvida baseada no modelo de comutador aplicado no transformador regulador caracterizado no capítulo II. Para isto, necessita-se estudar a funcionalidade do sistema eletro-mecânico de comutação definindo um modelo lógico que represente esta comutação. As referências [9] e [11] são utilizadas para o desenvolvimento desta modelagem. Analisando esta documentação pode-se concluir que este sistema eletro-mecânico é dividido em setores, como:

- Mecanismo de chaveamento dos taps do enrolamento de regulação, chamado de seletor de derivação;

- Mecanismo de chaveamento do enrolamento de regulação, chamado de chave de comutação;
- Sistema de comando eletro-mecânico de chaveamento do seletor derivação e da chave de comutação.

A diferença das características entre fabricantes de comutadores não interferirá no modelo a ser desenvolvido neste capítulo. O princípio de funcionamento e a conectividade no transformador são similares, e o objetivo desta dissertação não é estudar detalhadamente o comutador, mas o conjunto que constitui o transformador regulador.

4.2 Componentes Básicos do Comutador de Derivação em Carga

O seletor derivação em carga é construído em módulos de unidades monofásicos, formando assim o comutador trifásico. Cada unidade monofásica é constituída por uma placa de resina epóxi que, em geral, possui uma chave seletora e o resistor de transição.

Na placa de resina epóxi são montadas buchas de passagem, que através delas realiza a conexão do enrolamento de regulação do transformador e os contatos fixos da chave seletora.

A chave seletora consiste de contatos fixos e de um contato móvel. Os contatos fixos são montados no suporte, o qual é aparafusado nos terminais previamente montados na placa de resina epóxi. Cada contato fixo tem dois caminhos de contato, um para o movimento do contato mestre e um para o movimento do contato de chaveamento.

O contato móvel consiste do contato mestre do chaveamento e dois contatos de transição. O sistema é construído em uma unidade rotatória rígida com um eixo de direção comum. Na posição “serviço” a corrente de carga é conduzida para o movimento do contato mestre, que consiste de dois contatos salientes, pressionado dentro do contato fixo por mola. O movimento do contato mestre de chaveamento e o contato de transição são realizados por rolagem.

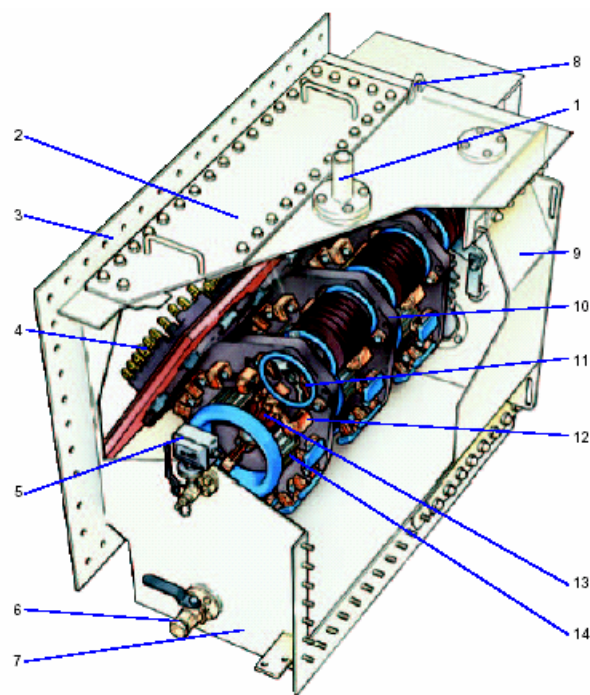
O material do contato de chaveamento é composto por uma liga de cobre e tungstênio. Em caso de comutadores de baixas correntes, os contatos são fabricados em cobre.

Os resistores de transição são construídos de arames montados sobre uma bobina isolante. Eles são conectados entre o movimento do contato mestre e o contato de transição. O seu dimensionamento é definido a partir da equação 4.1.

$$R_T = \frac{\Delta V_{tap}}{I_{nom}} \quad (4.1)$$

A chave de comutação é usada para a reversão do enrolamento de regulação ou para mudança da conexão do enrolamento de regulação grossa para fina. A chave consiste de um contato de movimento e dois contatos fixos. A corrente é conduzida por quatro contatos salientes no ramo do movimento e transferido para os contatos fixos. A chave de comutação não conduz ou interrompe corrente durante sua operação.

A figura 4.1 mostra os componentes do comutador em carga aplicado no transformador regulador descrito no capítulo II.



- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Ligação ao recipiente de expansão | 8. Olhal de elavação |
| 2. Tampa de acesso aos comutadores | 9. Tampa frontal |
| 3. Flange de fixação à caixa do transformador | 10. Moldura |
| 4. Terminais dos condutores | 11. Seletor de comutação |
| 5. Relé de pressão | 12. Contatos fixos |
| 6. Torneira de óleo | 13. Sistema de contato móvel |
| 7. Caixa do seletor de derivação | 14. Resistor de transição |

Figura 4.1 – Comutador derivação em carga.

4.3 Princípio de Funcionamento do Mecanismo de Comutação

A sequência de chaveamento é projetada para o ciclo de transmissão simétrico. Isto significa que, o chaveamento do contato mestre da chave seletora é interrompido depois do resistor de transição estar conectado no tap de regulação. Isto assegura máxima segurança na operação da chave em carga.

A taxa de interrupção de carga realiza-se no primeiro zero de corrente após a separação dos contatos, que significa uma proporção do tempo do arco de aproximadamente 6 ms em 50 Hz. O tempo total para completar a sequência é de, aproximadamente, 50 ms. O tempo de operação da mudança de tap do mecanismo de comutação é de, aproximadamente, 3 s por passo.

4.3.1 Seletor de Derivação

A sequência de chaveamento quando se comuta da posição 1 para a posição 2 é mostrada nos diagramas da figura 4.2. O movimento do contato H é mostrado como único porém, consiste de fato de dois; o contato mestre e o chaveamento do contato mestre. O contato mestre abre depois e fecha antes do chaveamento do contato mestre.

- A figura 4.2a mostra o contato mestre H conduzindo a corrente de carga. Os contatos de transição M2 e M1 estão abertos, localizados entre os contatos fixos;
- A figura 4.2b mostra o contato de transição M2 sobre o contato fixo 1 e o contato mestre H está interrompido. O resistor de transição e o contato de transição M2 conduzem a corrente de carga;
- A figura 4.2c mostra o contato de transição M1 sobre o contato fixo 2. A corrente de carga é dividida entre os contatos de transição M1 e M2. A corrente de circulação é limitada pelo resistor;
- A figura 4.2d mostra o contato de transição M2 interrompido no contato fixo 1. O resistor de transição e o contato de transição M1 conduzem a corrente de carga;

- A figura 4.2e mostra o chaveamento do contato mestre H no contato fixo 2. O contato de transição M1 aberto no contato fixo 2. O contato mestre H está conduzindo a corrente de carga.

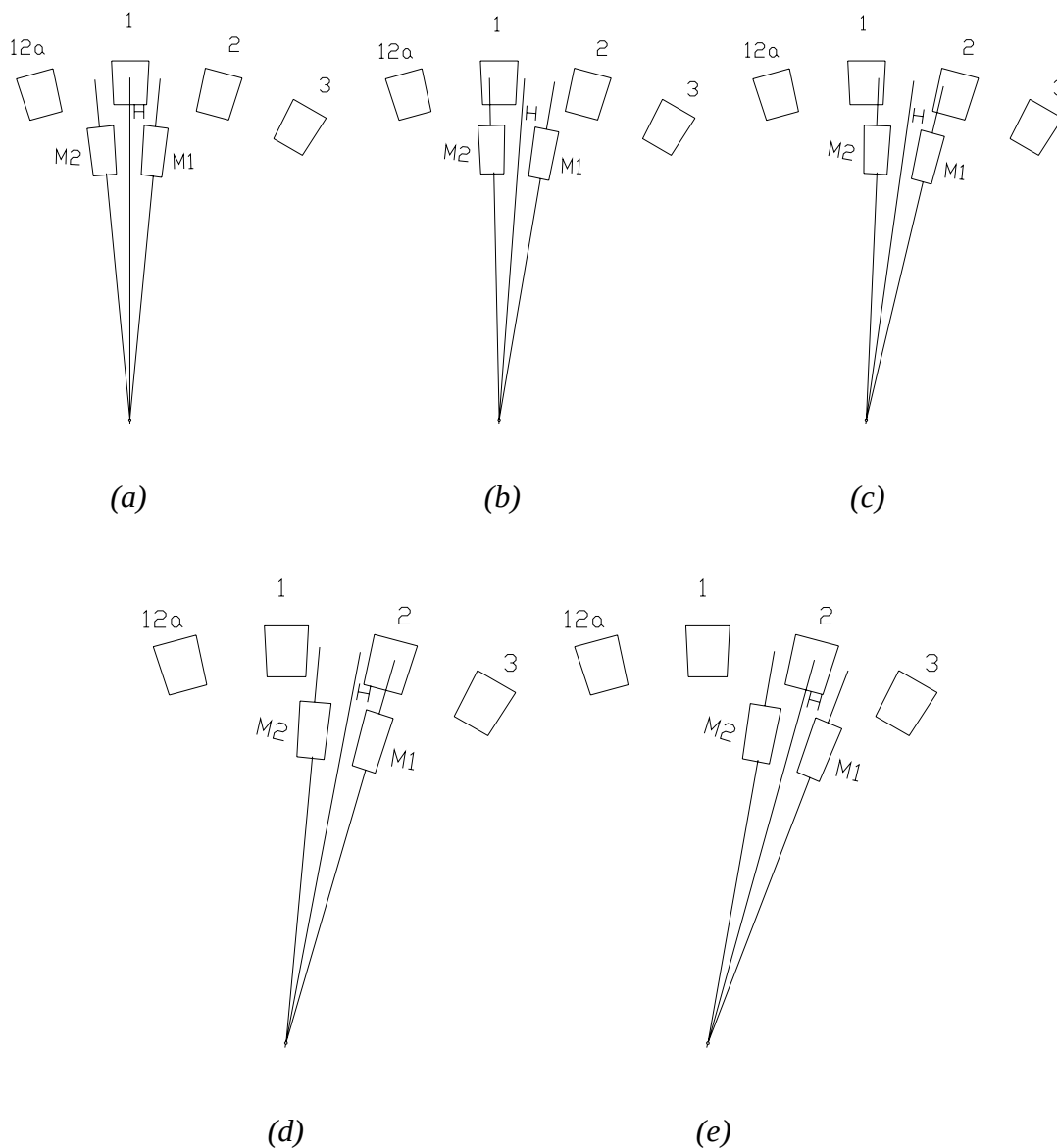


Figura 4.2 – Sequência de chaveamento do seletor derivação.

4.3.2 Chave de Comutação

A sequência de chaveamento quando o seletor de comutação R muda para chavear para mais ou menos é mostra na figura 4.3. O contato do seletor arma ao alcançar o contato fixo 12 após o chaveamento do contato fixo 11. O contato fixo 12 é suficiente largo para cobertura total entre as duas posições do seletor de comutação.

O contato armado do seletor de comutação tem movimento sobre o contato 12 e a mudança do seletor R é na condição sem carga. A corrente de carga vai diretamente do enrolamento através do contato 12 e a corrente sai através do centro do contato armado.

O contato armado da chave de derivação tem o movimento mais além sobre o contato 12 sem qualquer interrupção ou qualidade da corrente. Ao mesmo tempo o contato armado da chave comutadora R, tem movimento direto do contato B para o contato C, que é o fim do enrolamento de regulação, conectando-o no enrolamento principal.

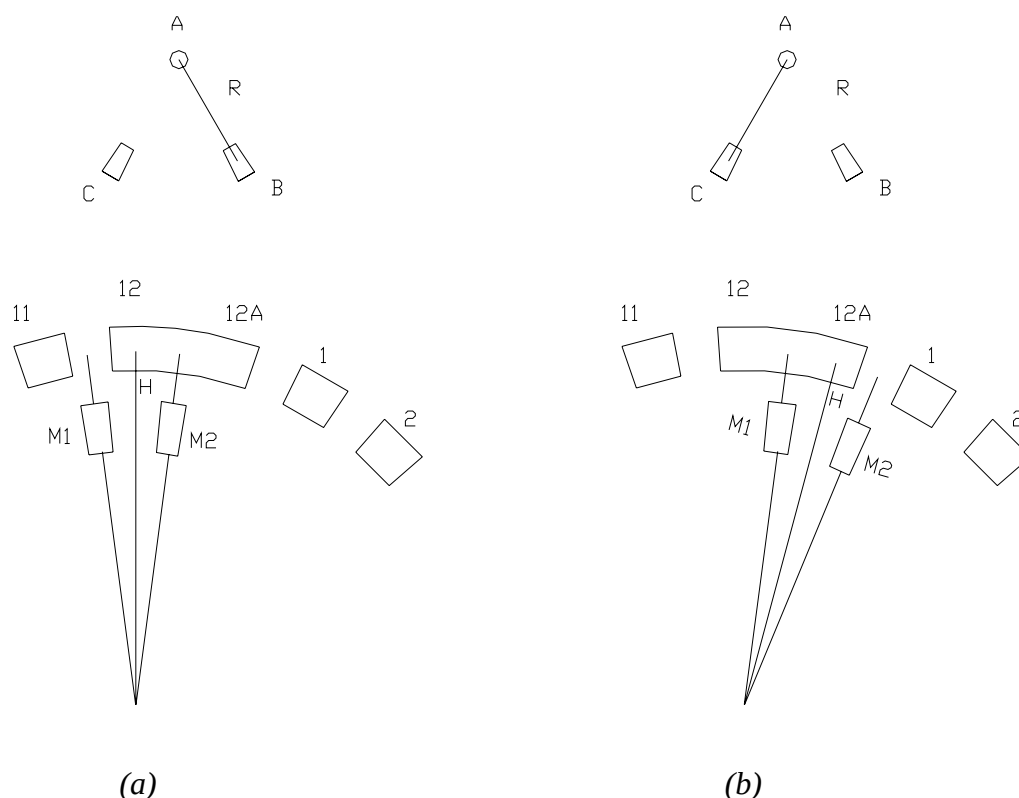


Figura 4.3 – Seqüência de chaveamento do seletor derivação e chave de comutação.

4.4 Modelagem do Sistema de Comutação

O modelo do sistema de comutação de tap para ser aplicado no transformador regulador foi desenvolvido utilizando as subrotinas de TACS [6] do programa ATP.

O modelo obedece às características principais do comutador, que são:

- Seletor de derivação com comutação tap a tap;

- Tempo de comutação do seletor de derivação de, aproximadamente, 50 ms;
- Tempo de comutação do seletor de derivação para o tap central de 140 a 170 ms;
- Seletor de comutação do enrolamento no tap central.

A figura 4.4 mostra o diagrama de blocos do modelo proposto do comutador desenvolvido no programa ATP. No diagrama de bloco estão subentendidas as temporizações dos contatos mostradas na figura B.4 do Anexo B.

O modelo desenvolvido representa o comando elétrico de acionamento do motor que realiza a comutação e o sistema de comutação mecânica do comutador, com todos os seus bloqueios elétricos e mecânicos.

Inseriu-se um tempo inicial que representa os tempos de acionamento dos relés auxiliares e a partida do motor que realiza a movimentação do eixo do sistema de contato móvel.

No seletor de comutação que conecta nos enrolamentos do transformador foi utilizado chave controlada: a TAC quando recebe o valor “0” esta representa o estado aberto e o valor “1” representa o estado fechado.

Para cada posição de ligação, conforme mostra a figura 3.1 do capítulo III, foram utilizadas duas chaves controladoras, uma para ser comandada quando se realiza o procedimento para elevar tap e outra para o procedimento de baixar tap.

A utilização de duas chaves controladoras é necessária devido a movimentação mecânica do seletor de comutação, quando o mesmo está no procedimento de elevar tap, possui uma seqüência definida, e quando se realiza o procedimento de baixar tap é uma seqüência inversa, conforme mostra a figura 4.2 e 4.3. Assim, desenvolveu-se uma movimentação para o procedimento de elevar e outra para baixar.

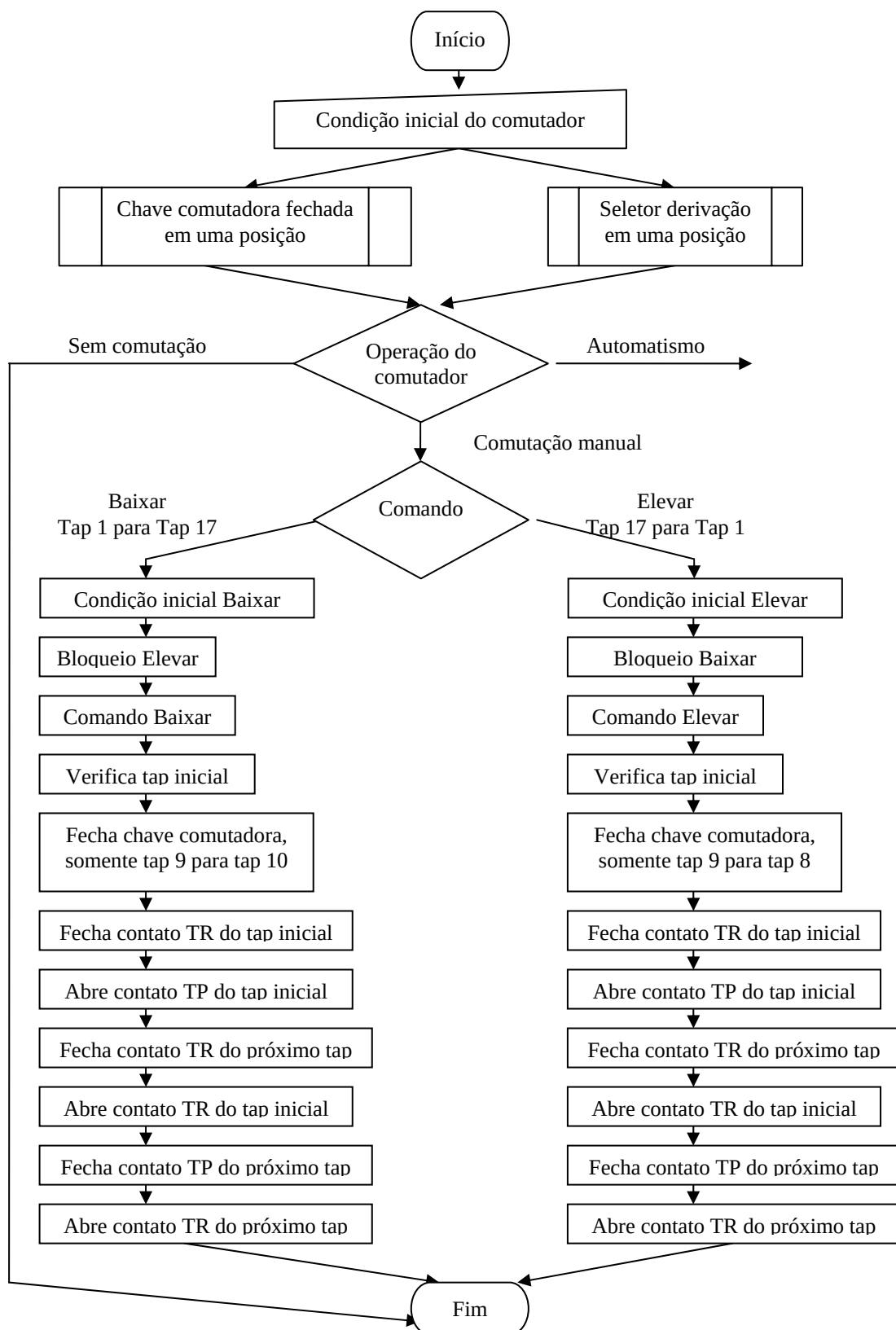


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do modelo do comutador.

A figura 4.5 mostra a chave controladora de uma fase e uma ligação no enrolamento, onde:

TP01E $\Rightarrow$ Chave controladora de elevar;

TP01A $\Rightarrow$ Chave controladora de baixar;

TR01E $\Rightarrow$ Chave controladora de elevar do resistor de transição;

TR01A $\Rightarrow$ Chave controladora de baixar do resistor de transição;

RT $\Rightarrow$ Resistor de transição.

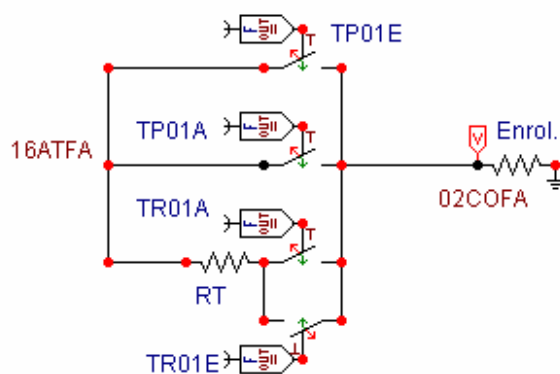


Figura 4.5 – Chaves controladoras conectadas ao enrolamento do transformador.

O comutador está sempre estacionado em um tap qualquer, tap 1 ao 17, com isso realizando o fechamento dos enrolamentos do transformador. No modelo esta representação é estabelecida através das condições iniciais que devem ser parametrizadas. Essa parametrização deve ser realizada independentemente de ocorrer ou não uma comutação.

A chave de comutação é representada no modelo através das chaves controladoras CHDI e CHRE. Quando a chave controladora CHDI está fechada, significa que a corrente que circula no enrolamento de regulação está no mesmo sentido do enrolamento principal de alta tensão. Quando a chave controladora CHRE está fechada, isso significa que a corrente que circula no enrolamento de regulação está no sentido contrário à que circula no enrolamento principal de alta tensão.

A tabela 4.1 mostra as condições iniciais nas quais o modelo deve ser parametrizado, em função do tap em que o transformador regulador está ajustado.

Tabela 4.1: Condição inicial do seletor de derivação

Posição inicial do comutador	Chave Posição		Chave Reversão	
	Estado Fechado	Estado Aberto	CHDI	CHRE
TAP 1	POS2	DEMAIS	FECHADA	ABERTA
TAP 2	POS3			
TAP 3	POS4			
TAP 4	POS5			
TAP 5	POS6			
TAP 6	POS7			
TAP 7	POS8			
TAP 8	POS9			
TAP 9	POS12		ABERTA	FECHADA
TAP 10	POS3			
TAP 11	POS4			
TAP 12	POS5			
TAP 13	POS6			
TAP 14	POS7			
TAP 15	POS8			
TAP 16	POS9			
TAP17	POS10			

4.5 Simulação Computacional

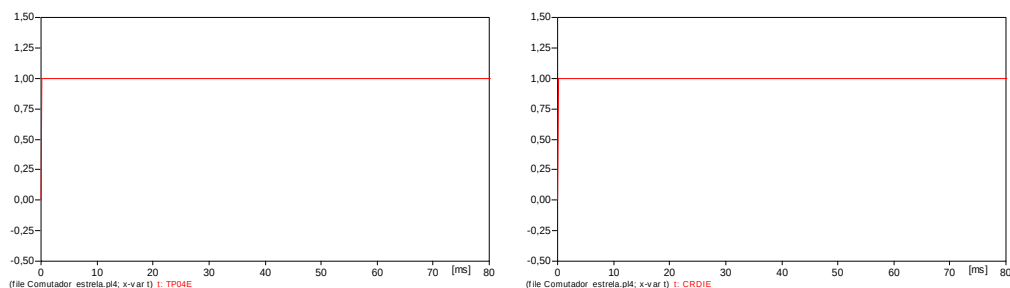
Para análise do desempenho e validação do modelo, várias simulações foram desenvolvidas.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos.

4.5.1 Sem Operação de Comutação

Nesta simulação, processou-se a simulação computacional sem realizar-se a comutação do seletor de derivação, verificando-se o comportamento do estado da chave controladora e da chave de

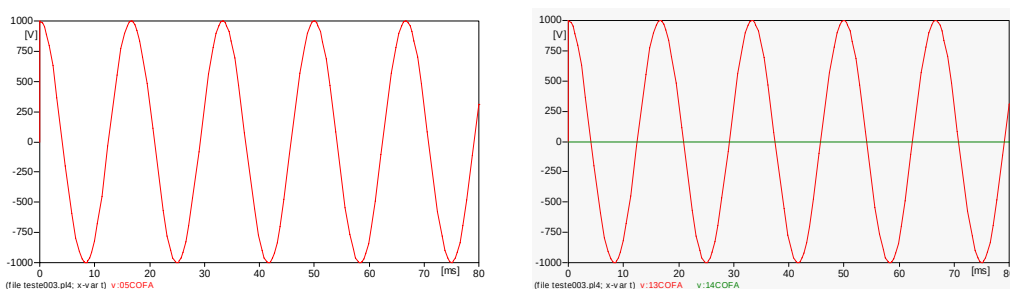
comutação. A figura 4.6 mostra o estado das chaves controladoras que representam o seletor de derivação e a chave de comutação. A figura 4.7 mostra o comportamento da tensão, o qual está correlacionado com o estado das chaves controladoras. Observa-se que na figura 4.7.b a tensão na chave CHDI está normal e constante e na chave CHRE está com valor zero de tensão, pois conforme a tabela 4.1, a chave CHRE deve estar aberta para a parametrização deste tap.



(a) – Chave controladora tap 4.

(b) – Chave controladora CHDI.

Figura 4.6 – Estado da chave controladora do tap 4 e CHDI



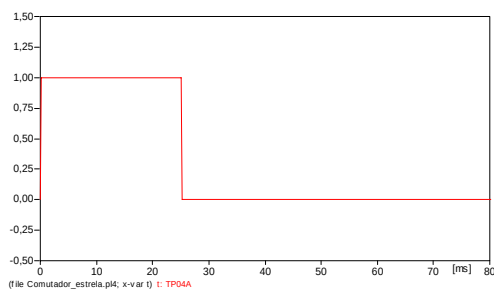
(a) – Tensão no Tap 4.

(b) – Tensão na CHDI.

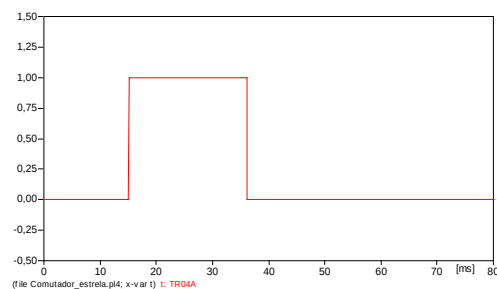
Figura 4.7 – Comportamento da tensão no tap 4 e CHDI.

4.5.2 Com Operação do Comutador

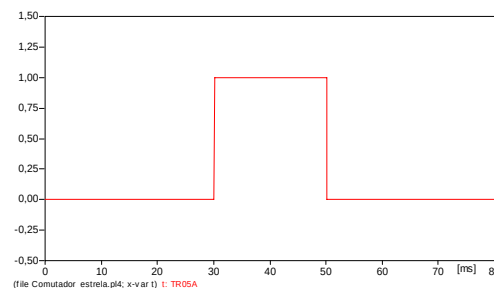
Nesta simulação, realizou-se a comutação do seletor de derivação verificando o comportamento do estado das chaves controladoras. A figura 4.8 mostra o estado das chaves controladoras, representando o seletor de derivação na comutação do tap 4 para o tap 5, no processo de baixar o tap. Observa-se que se obteve o comportamento do estado de condução das chaves controladoras, respeitando a seqüência definida na figura 4.2 e um tempo de comutação total de aproximadamente 50ms.



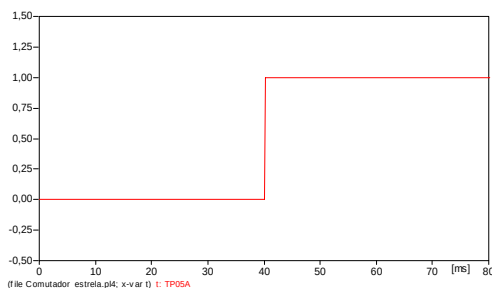
(a) – Chave controladora TP04A.



(b) – Chave controladora TR04A.



(c) – Chave controladora TR05A.



(d) – Chave controladora TP05A.

Figura 4.8 – Estado das chaves controladoras na comutação do tap4 para tap5.

A figura 4.9 mostra o comportamento da tensão que está correlacionado com o estado das chaves controladoras (figura 4.8). Onde pode-se observar que a tensão teve um comportamento adequado na comutação: não se teve interrupção da tensão, pois a corrente circulou pelos resistores de transição, chaves controladoras TR4A e TR5A.

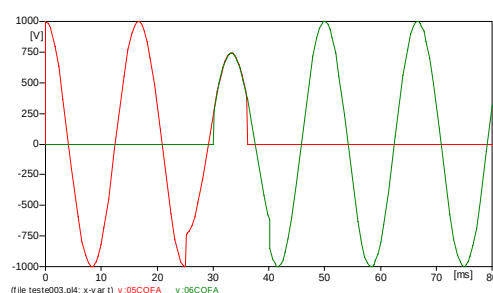
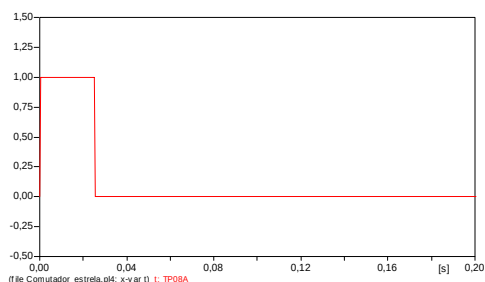


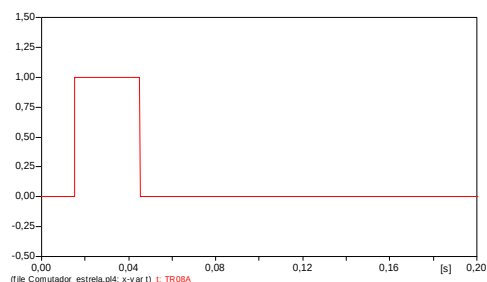
Figura 4.9 – Comportamento da tensão na comutação do tap4 para tap5.

A figura 4.10 mostra o estado das chaves controladoras que representam o seletor de derivação na comutação do tap 8 para o tap 9. Observa-se o comportamento do estado de condução das chaves controladoras, respeitando a sequência definida na figura 4.2, com tempo de comutação total de, aproximadamente, 170ms. Esse tempo de comutação é maior do que o caso analisado

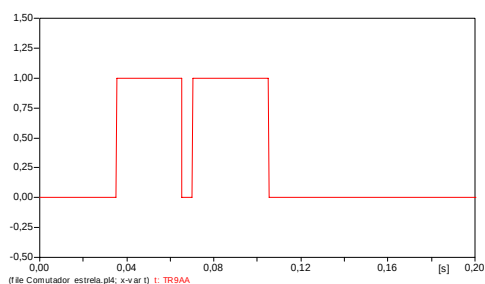
anteriormente porque, nesta comutação, tem-se a preparação para a ativar a chave de comutação, que dá o sentido da corrente no enrolamento de regulação.



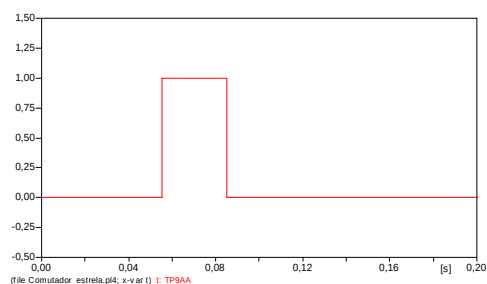
(a) – Chave controladora TP08A.



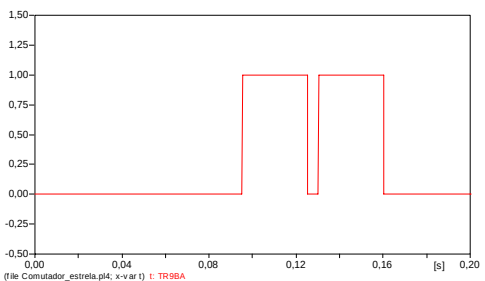
(b) – Chave controladora TR08A.



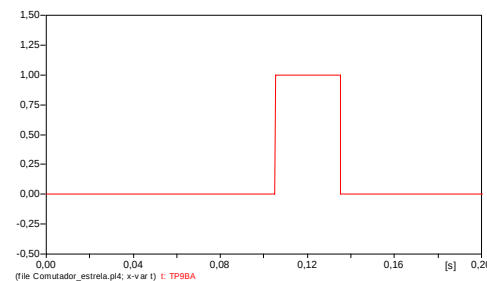
(c) – Chave controladora TR9AA.



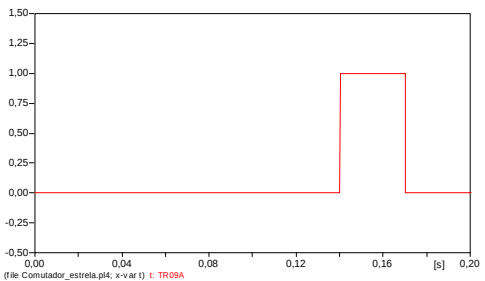
(d) – Chave controladora TP9AA.



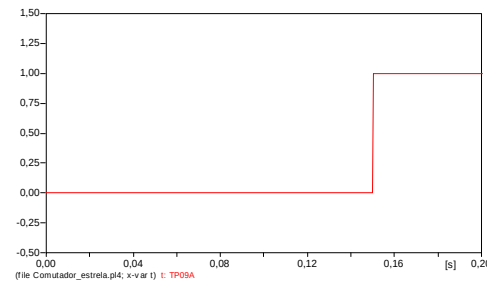
(e) – Chave controladora TR9BA.



(f) – Chave controladora TP9BA.



(g) – Chave controladora TR09A.



(h) – Chave controladora TP09A.

Figura 4.10 – Estado das chaves controladoras na comutação do tap 8 para tap 9.

A figura 4.11 mostra o comportamento da tensão que está correlacionado com o estado das chaves controladoras. Pode-se observar na figura que a tensão teve um comportamento adequado com o estado das chaves controladoras. Isto é, não se teve interrupção da tensão, pois a corrente circulou pelos resistores de transição, chaves controladoras TR8A, TR9AA, TR9BA e TR09A.

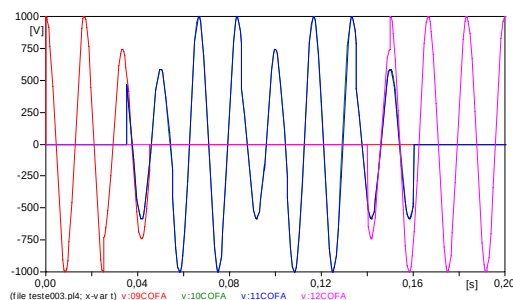


Figura 4.11 – Comportamento da tensão na comutação do tap 8 para tap 9.

4.6 Considerações Finais

Realizou-se as simulações computacionais em todos os taps, em ambos os sentidos de comutação. O comportamento encontrado na análise de cada contato e da tensão nos terminais do comutador de cada tap, são similares aos resultados apresentados no item 4.5 deste capítulo.

Observa-se que nos instantes onde ocorrem à inserção dos resistores de transição, tem-se um afundamento da tensão nos terminais do comutador. Isto pode representar um transitório na corrente e na tensão do transformador regulador.

Conclui-se, assim, que o modelo desenvolvido está representando adequadamente o comportamento elétrico e mecânico do comutador de taps do transformador, podendo ser assim, inserido no modelo desenvolvido do transformador regulador apresentado no capítulo III.

CAPÍTULO V

PARÂMETROS DO MODELO DO TRANSFORMADOR REGULADOR

5.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma metodologia de cálculo dos parâmetros do modelo do transformador regulador descrito no capítulo III, utilizando os resultados de ensaios de rotina do transformador, aliados à geometria e à característica de saturação do material magnético que compõe o núcleo, informados no capítulo II. Para a realização dos cálculos serão utilizados como referência os seguintes valores de base:

$$\begin{aligned}P_{\text{base}} &= 32\text{MVA} \\V_{\text{base}_{AT}} &= 84\text{kV para ligação delta} \\V_{\text{base}_{AT}} &= 131,6\text{kV para ligação estrela} \\V_{\text{base}_{BT}} &= 13,8\text{kV}\end{aligned}$$

Este capítulo também tem o objetivo de exemplificar a aplicação da estratégia de cálculo das relutâncias apresentada no capítulo III, e conseqüente determinação dos parâmetros do modelo, de acordo com as referências [12], [13] e [14].

5.2 Modelo do Transformador

Como descrito no capítulo II, o transformador regulador a ser modelado possui dois níveis de tensão nominal no enrolamento de alta tensão, 84 kV e 131,6 kV. Para atender esta condição operativa, é necessária uma quantidade específica de espiras para ambas as tensões, a qual é determinada pelo tipo de ligação do enrolamento (delta ou estrela). Foi necessário realizar o cálculo

nos parâmetros do modelo apresentado na figura 3.10 do capítulo III com relação os fluxos de dispersão, o qual possui valores diferentes para cada ligação.

5.2.1 Modelo do Transformador para Operação em 131,6 kV

Analizando o diagrama unifilar do transformador regulador para operação neste nível de tensão, observa-se que o enrolamento complementar de alta tensão S fica energizado sem a circulação de corrente. A figura 5.1 mostra o modelo do transformador para operação neste nível de tensão, inclusive com as conexões com o comutador para permitir a mudança de taps.

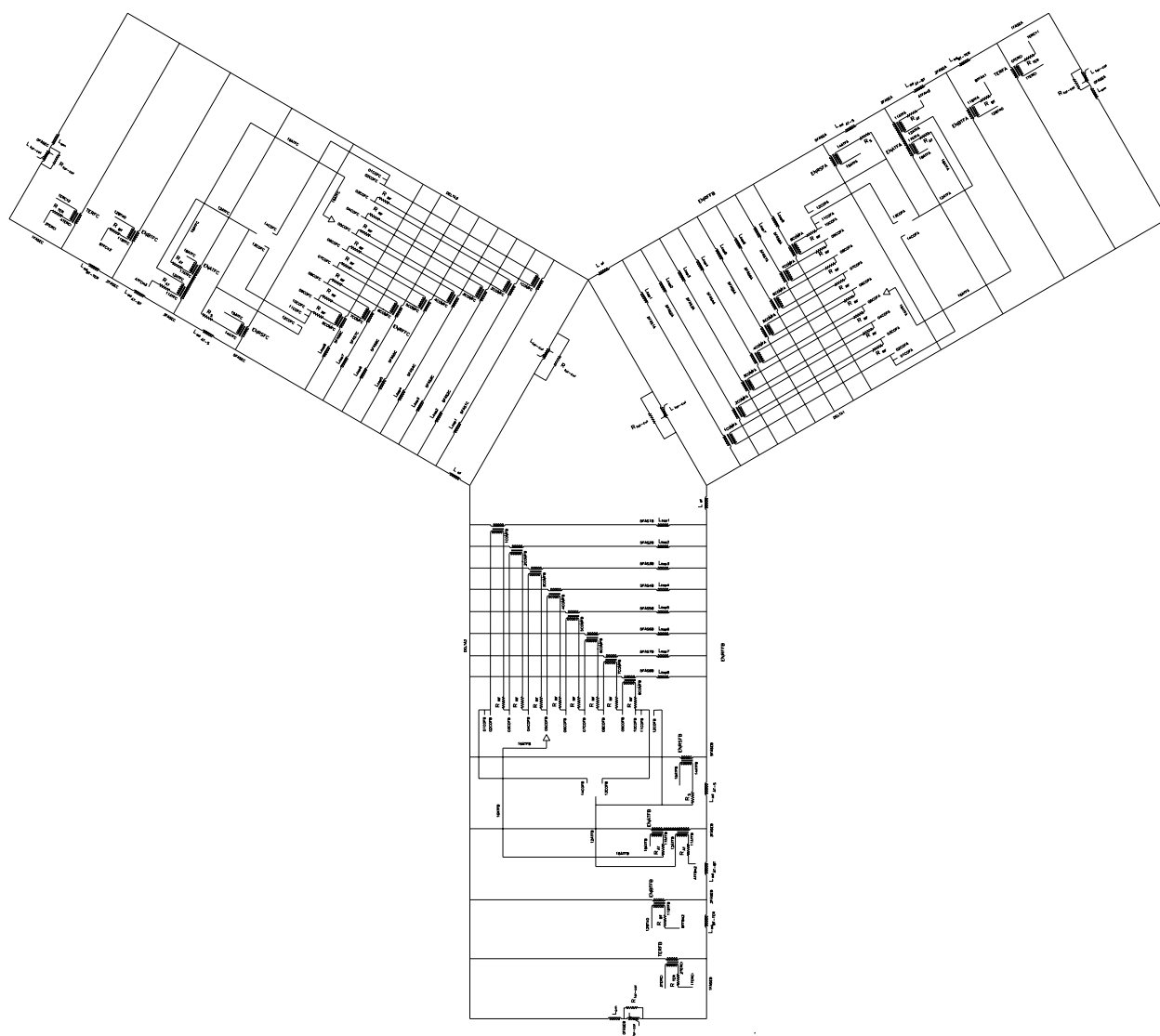


Figura 5.1 – Modelo do transformador para operação em 131,6 kV.

5.2.2 Modelo do Transformador para Operação em 84 kV

Analisando o diagrama unifilar do transformador para operação neste nível de tensão, observa-se que o enrolamento terciário TER fica energizado, e o enrolamento S tem circulação da corrente primária do transformador. A figura 5.2 mostra o modelo do transformador para operação neste nível de tensão, inclusive com as conexões com o comutador para permitir a mudança de taps.

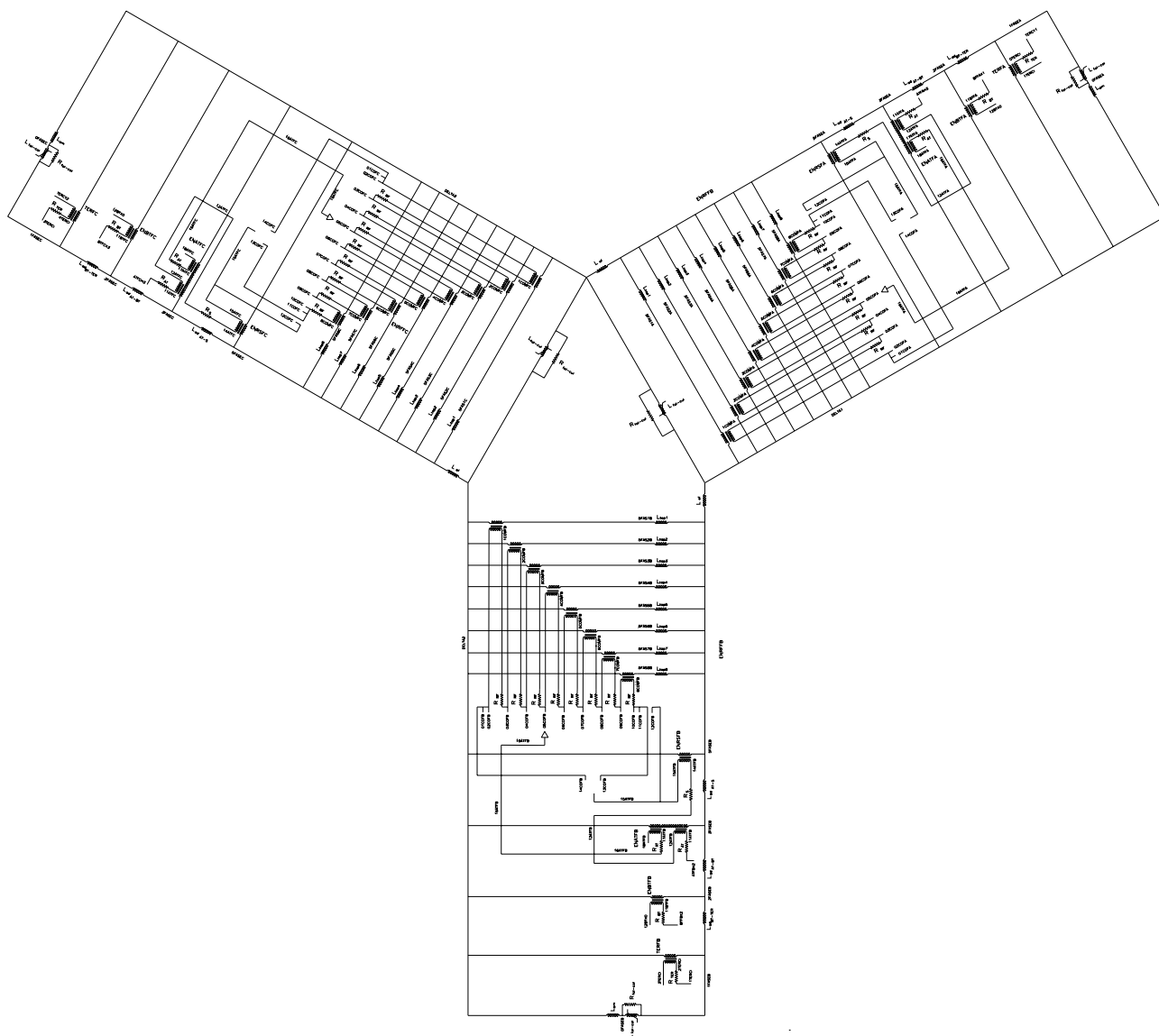


Figura 5.2 – Modelo do transformador para operação em 84 kV.

5.3 Curva de Magnetização

No capítulo II, a figura 2.3 apresenta a curva de magnetização do transformador. A curva é função da tensão induzida em vazio $V_{0_{pu}}$ e a corrente de excitação $I_{o_{pu}}$.

Para obter a curva $B \times H$ do referido núcleo de aço silício através da curva de magnetização apresentada, adotou-se os seguintes procedimentos:

$$B = \frac{V_0}{4,44 A_{nu} f N_{AT}} \quad (5.1)$$

$$H = \frac{N_{AT} \sqrt{2} I_0}{l} \quad (5.2)$$

Apesar da corrente I_o não ser senoidal, para os cálculos iniciais adotou-se o fator de crista $\sqrt{2}$, como se a mesma fosse senoidal.

Calculando-se ponto a ponto, a partir da curva de magnetização do núcleo apresentado, obtém-se a curva $B \times H$ apresentada na figura 5.3.

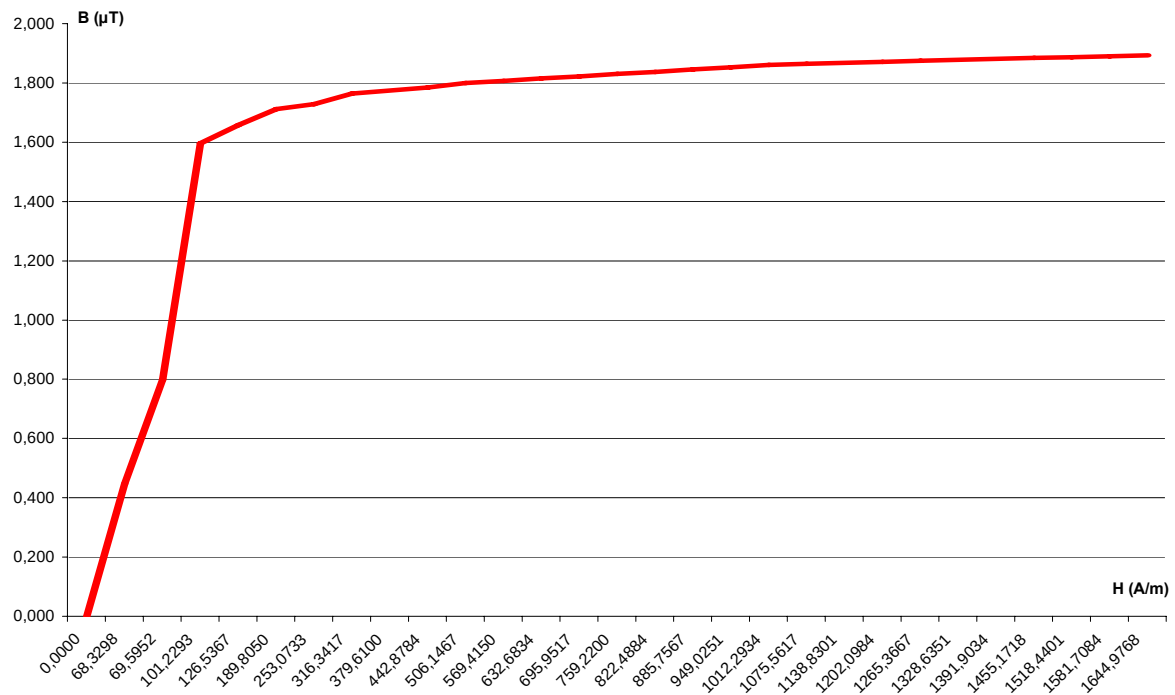


Figura 5.3 – Curva B – H do transformador.

5.4 Cálculo da Permeabilidade Magnética

O valor de pico do fluxo magnético é determinado através da equação (3.1), da seguinte forma:

$$\varphi = \frac{V_{AT}}{4,44 N_{AT} f} = \frac{84000}{4,44 \times 1371 \times 60} = 22,99 \times 10^{-2} \text{ Wb}$$

Onde, N_{AT} equivale ao número total de espiras do enrolamento de alta tensão na tensão de 84 kV, ou seja, ligado no tap 9.

Os valores máximos de indução magnética da coluna e da culatra são obtidos através da equação (3.2), sendo as áreas da coluna e culatra, as áreas líquidas fornecidas no item 2.3.1 do capítulo II.

$$A_{nu} = A_{col} = A_{cul} = 1.304 \text{ cm}^2 = 0,1304 \text{ m}^2$$

$$B_{col} = B_{cul} = \frac{\varphi}{A_m} = \frac{22,99 \times 10^{-2}}{0,1304} = 1,763 \text{ T}$$

Através da curva $B \times H$, figura 5.3, determina-se os valores de H correspondentes ao valor máximo. Pela equação (3.3), obtém-se a permeabilidade magnética para o valor máximo.

$$\mu_{col}(B_{max}) = \mu_{cul}(B_{max}) = \frac{B}{H} = \frac{1,763}{316,3417} = 0,5573 \times 10^{-2} \text{ H/m}$$

5.5 Cálculo das Relutâncias

Através da equação (3.4), obtém-se as relutâncias da coluna, $\mathfrak{R}_{col1}$ e $\mathfrak{R}_{col2}$ e culatra, $\mathfrak{R}_{cul1}$ e $\mathfrak{R}_{cul2}$, para a indução magnética máxima.

$$\mathfrak{R}_{col1} = \mathfrak{R}_{col2} = \frac{2,205}{0,5573 \times 10^{-2} \times 0,1304} = 3034,18 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathfrak{R}_{cul1} = \mathfrak{R}_{cul2} = \frac{1,193}{0,5573 \times 10^{-2} \times 0,1304} = 1641,62 \text{ H}^{-1}$$

5.6 Cálculo das Forças Magnetomotrizes nas Culatras e Colunas e suas Respectivas Correntes

A modelagem de indutores não lineares no programa ATP necessita das características de magnetização do indutor, as quais são representadas pelos valores de pico da corrente e do fluxo concatenado [14].

No cálculo da corrente considera-se a força magnetomotriz necessária para estabelecer o fluxo magnético no circuito magnético do transformador.

Nas culatras considera-se que estas possuem um enrolamento virtual, com o mesmo número de espiras do enrolamento do transformador de alta tensão.

São tomados como referência os valores de pico do fluxo nominal e da corrente necessária à sua circulação. Os demais pontos da característica de magnetização podem ser obtidos fazendo a correspondência entre a indução magnética da curva $B \times H$ e o fluxo total concatenado no circuito magnético, bem como entre o campo magnético H e a corrente necessária para produção do valor de pico do fluxo de acordo com as equações (3.5) e (3.6).

$$\lambda = N \times \varphi = 1371 \times 22,99 \cdot 10^{-2} = 31519,29 \cdot 10^{-2} \text{ Wb / esp}$$

$$i_{\text{col}} = \frac{\mathcal{R}_{\text{col}_1} \times \varphi}{N} = \frac{3034,18 \times 22,99 \cdot 10^{-2}}{1371} = 50,8795 \cdot 10^{-2} \text{ A}$$

$$i_{\text{cul}} = \frac{2 \times \mathcal{R}_{\text{cul}_1} \times \varphi}{N} = \frac{2 \times 1641,62 \times 22,99 \cdot 10^{-2}}{1371} = 55,0559 \cdot 10^{-2} \text{ A}$$

Observação: O número 2 incluído no cálculo da corrente na culatra (ultimas equações acima) representa as duas culatras, superior e inferior, que estão em série com as colunas externas.

5.7 Cálculo das Resistências dos Enrolamentos

Os valores das resistências dos enrolamentos adotados no modelo desenvolvido, serão obtidos através dos resultados do ensaio de medição da resistência dos enrolamentos apresentados no capítulo II, referidos à temperatura de 75°C , conforme equação (5.3), obtida na referência [15].

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1} \times \frac{(\theta_2 + K)}{(\theta_1 + K)} \quad (5.3)$$

O fator de correção K referido na equação (5.3) depende do tipo de material:

- Para o cobre o fator de correção K é 234,5;
- Para o alumínio o fator de correção K é 225.

5.7.1 Cálculo da Resistência do Enrolamento de Alta Tensão (AT)

O transformador que está sendo modelado pode ter o enrolamento de alta tensão conectado ligado em delta (na tensão 84 kV), e em estrela (na tensão 131,6 kV). A tabela 5.1 apresenta os valores de resistência medidos e corrigidos para a temperatura $75^{\circ}C$.

Tabela 5.1 – Medição da resistência do enrolamento de alta tensão.

Ligação	Tap	Resistência mΩ					
		Temperatura 23,8°C			Temperatura 75°C		
		H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1
Estrela	9	1947	1951	1950	2332,93	2337,73	2336,53
Delta		732,455	732,204	732,980	877,64	877,34	878,27

Os valores medidos não são os valores reais da resistência de enrolamento, mas sim o valor resultante da associação das resistências dos demais enrolamentos de alta tensão.

Para o transformador ligado em delta, a resistência medida no ensaio é equivalente a uma associação de resistências dos enrolamentos. Através das equações (5.4), (5.5) e (5.6) pode-se calcular o valor da resistência de cada enrolamento.

$$R_{med_{H1-H2}} = \frac{R_{faseA}(R_{faseB} + R_{faseC})}{R_{faseA} + R_{faseB} + R_{faseC}} \quad (5.4)$$

$$R_{med_{H2-H3}} = \frac{R_{faseB}(R_{faseA} + R_{faseC})}{R_{faseA} + R_{faseB} + R_{faseC}} \quad (5.5)$$

$$R_{med_{H3-H1}} = \frac{R_{faseC}(R_{faseA} + R_{faseB})}{R_{faseA} + R_{faseB} + R_{faseC}} \quad (5.6)$$

Como as bobinas são construídas conforme um projeto específico e padrão, pode-se considerar:

$$R_{AT} = R_{faseA} = R_{faseB} = R_{faseC} \quad (5.7)$$

As equações (5.4), (5.5) e (5.6) podem ser re-escrita conforme equação (5.8):

$$R_{med} = \frac{2}{3} R_{AT} \quad (5.8)$$

Onde R_{med} é o valor médio da resistência obtida conforme a tabela 5.1, referida à temperatura de 75°C. A tabela 5.2 apresenta os valores reais das resistências dos enrolamentos de alta tensão do transformador quando o mesmo está na ligação em delta.

Tabela 5.2 – Valor da resistência do enrolamento de alta tensão, ligação em delta.

Ligação	Tap	Resistência (mΩ)		
		Fase A	Fase B	Fase C
Triângulo	9	1316,625	1316,625	1316,625

Para o transformador ligado em estrela, a resistência medida no ensaio é um valor equivalente a uma associação de resistências do enrolamento. Através das equações (5.9), (5.10) e (5.11) pode-se calcular o valor da resistência de cada enrolamento.

$$R_{med_{H1-H2}} = R_{faseA} + R_{faseB} \quad (5.9)$$

$$R_{med_{H2-H3}} = R_{faseB} + R_{faseC} \quad (5.10)$$

$$R_{med_{H3-H1}} = R_{faseC} + R_{faseA} \quad (5.11)$$

Realizando a mesma análise anterior conforme mostra a equação (5.7), pode-se calcular o valor da resistência do enrolamento através da equação (5.12).

$$R_{med} = 2R_{AT} \quad (5.12)$$

Onde R_{med} é o valor médio da resistência obtida conforme a tabela 5.1, referida à temperatura de 75°C. A tabela 5.3 apresenta os valores reais das resistências dos enrolamentos de alta tensão do transformador quando o mesmo está na ligação em estrela.

Tabela 5.3 – Valor da resistência do enrolamento de alta tensão, ligação em estrela.

Ligação	Tap	Resistência mΩ		
		Fase A	Fase B	Fase C
Estrela	9	1167,87	1167,87	1167,87

Analisando o diagrama unifilar do transformador, figura 3.1, conclui-se que o valor da resistência do enrolamento AT corresponde aos valores apresentados na tabela 5.3, independente da ligação do transformador.

5.7.2 Cálculo da Resistência do Enrolamento Complementar (S)

O enrolamento complementar (S) permite que o transformador seja ligado em delta para a tensão de 84 kV.

Analisando o diagrama unifilar do transformador, observa-se que este enrolamento está em série com o enrolamento de alta tensão (AT) na ligação delta. Quando o transformador está ligado em estrela, este enrolamento não circula corrente. Calcula-se a resistência deste enrolamento complementar através da diferença entre as resistências, na ligação delta e estrela.

$$R_S = R_{AT_{\text{delta}}} - R_{AT_{\text{estrela}}} \quad (5.13)$$

A tabela 5.4 mostra o valor da resistência de enrolamento complementar (S).

Tabela 5.4 – Valor da resistência do enrolamento de alta tensão (S)

Resistência mΩ		
Fase A	Fase B	Fase C
148,75	148,75	148,75

5.7.3 Cálculo da Resistência do Enrolamento de Regulação (RF)

O enrolamento de regulação (RF) é composto de 8 (oito) bobinas independentes que formam os taps para conexão do comutador. Cada bobina possui o mesmo número de espiras, a mesma bitola de cobre e o fio possui a mesma camada de isolamento. Conclui-se que sua resistência pode ser determinada por:

$$R_{RF} = R_{\text{tap1}} - R_{\text{tap2}} \quad (5.14)$$

A tabela 5.5 mostra os valores de resistência para o comutador na posição de tap 1 e 2 e seus valores corrigidos para à temperatura de $75^{\circ}C$.

Tabela 5.5 – Medição da resistência dos taps no enrolamento de alta tensão.

Ligação	Tap	Resistência mΩ					
		Temperatura 23,8°C			Temperatura 75°C		
		H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1
Estrela	1	2275	2280	2280	2725,95	2731,94	2731,94
	2	2234	2239	2239	2676,82	2682,81	2682,81
Delta	1	842,138	841,940	843,057	1009,07	1008,83	1010,17
	2	828,471	828,335	829,259	992,69	992,68	993,63

A tabela 5.6 mostra os valores de resistência da uma bobina de regulação. A bobina de regulação é a mesma tanto na ligação delta como estrela do transformador.

Tabela 5.6 – Valor da resistência de cada bobina de regulação.

Resistência (mΩ)		
Fase A	Fase B	Fase C
24,584	24,584	24,584

5.7.4 Cálculo da Resistência do Enrolamento de Baixa Tensão (BT)

O valor da resistência do enrolamento de baixa tensão (BT) é obtido diretamente da medição realizada. Devendo-se realizar a correção para à temperatura de 75°C. A tabela 5.7 mostra os valores de resistência.

Tabela 5.7 – Valor da resistência do enrolamento de baixa tensão.

Resistência mΩ					
Temperatura 23,8°C			Temperatura 75°C		
X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0	X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0
9,055	8,997	9,050	10,85	10,78	10,84

Como as bobinas são construídas conforme um projeto específico e padrão considera-se:

$$R_{BT} = \frac{R_{faseA_{BT}} + R_{faseB_{BT}} + R_{faseC_{BT}}}{3} \quad (5.15)$$

A tabela 5.8 mostra o valor médio da resistência do enrolamento de baixa tensão (BT) para à temperatura de 75°C.

Tabela 5.8 – Valor médio da resistência do enrolamento de baixa tensão a 75°C.

Temperatura 75°C		
X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0
10,825	10,825	10,825

5.7.5 Cálculo da Resistência do Enrolamento Terciário (TER)

Analisando o diagrama unifilar do transformador, observa-se que o enrolamento terciário somente disponibiliza duas buchas de saída, realizando internamente a ligação das bobinas de cada fase. Assim, pode-se equacionar:

$$R_{medTER} = R_{faseA_{TER}} + R_{faseB_{TER}} + R_{faseC_{TER}} \quad (5.16)$$

como

$$R_{TER} = R_{faseA_{TER}} = R_{faseB_{TER}} = R_{faseC_{TER}} \quad (5.17)$$

portanto

$$R_{medTER} = 3R_{TER} \quad (5.18)$$

A tabela 5.9 mostra os valores corrigidos da resistência medida e a tabela 5.10 mostra os valores de resistência de enrolamento terciário de cada fase.

Tabela 5.9 – Medição da resistência do enrolamento terciário.

Resistência mΩ	
Temperatura 23,8°C	Temperatura 75°C
Y1 – Y2	Y1 – Y2
78,273	93,79

Tabela 5.10 – Valor da resistência do enrolamento terciário.

Resistência mΩ		
Fase A	Fase B	Fase C
31,26	31,26	31,26

5.8 Cálculo da Indutância Devido ao Fluxo de Dispersão

O valor da impedância que será utilizada no cálculo da reatância de dispersão X_d é a informada no capítulo II, obtida através do ensaio de curto circuito, de forma que o cálculo realizado a partir da impedância percentual é mais confiável.

A resistência R_{total} é a soma das resistências dos enrolamentos de cada fase, que é utilizada no cálculo para determinar a reatância de dispersão. Os valores destas resistências são as calculadas no item 5.7 deste capítulo.

5.8.1 Enrolamento de Alta Tensão em Estrela

Através do diagrama unifilar do transformador, nota-se que com o comutador automático na posição central, tap 9, com a impedância percentual medida no ensaio de perdas em carga, tem-se a indutância de dispersão entre o enrolamento AT e BT .

A impedância do transformador, obtida no ensaio referido, à temperatura de $75^{\circ}C$, para o tap de posição 9, conforme tabela 2.7 é:

$$\begin{aligned} Z &= 19,13\% \\ P_{base} &= 32\text{MVA} \\ V_{base} &= 13,8\text{kV} \\ Z_{base(32\text{MVA})} &= 5,95125\Omega \end{aligned}$$

Referindo a impedância de base:

$$Z_{T_{\text{referido}}} = \frac{Z_T}{100} \times Z_{base} = \frac{19,13}{100} \times 5,95125 = 1,138474 \Omega$$

Assim:

$$R_{Total} = R_{AT} + R_{BT} = 0,023667 \Omega$$

$$\begin{aligned} X_d &= \sqrt{Z_{T_{\text{referido}}}^2 - R_{Total}^2} \\ X_d &= 1,138228 \Omega \end{aligned}$$

A indutância de dispersão é:

$$L_{ad_{\text{tap9}}} = \frac{X_d}{2\pi f} = \frac{1,138228}{2 \times \pi \times 60} = 3,019\text{mH}$$

Portanto:

$$L_{ad_{AT-BT}} = L_{ad_{\text{tap9}}} = 3,019\text{mH}$$

Quando o comutador posicionar-se em qualquer tap, desde posição de tap 1 até tap 8, o enrolamento RF terá uma força magnetomotriz impondo que o sentido da corrente esteja circulando

com a mesma polaridade do enrolamento de AT. Isto significa que aumentou-se o número de espiras e a quantidade de fluxo total, obtendo-se uma tensão maior na alta tensão para cada posição, considerando a tensão na baixa tensão constante.

Quando o comutador posicionar-se em qualquer posição de tap, desde posição de tap 10 até tap 17, o enrolamento RF terá uma força magnetomotriz impondo que o sentido da corrente esteja circulando com a polaridade invertida do enrolamento de AT. Isto significa que diminui-se o número de espiras e a quantidade de fluxo total, obtendo-se uma tensão menor na alta tensão para cada posição, considerando a tensão na baixa tensão constante.

Para obter o fluxo de dispersão produzido em cada tap, do tap 1 até 8 e do tap 10 até 17, calcula-se através da diferença entre a indutância de cada tap e o outro.

A tabela 5.11 apresenta os valores da indutância de dispersão para cada posição do comutador.

Tabela 5.11 – Valor da indutância de dispersão $L_{ad_{AT-RF}}$

Tap	Impedância transformador (%)	Indutância total de dispersão (mH)	Indutância dispersão de cada tap (mH)
1	20,29	3,202	0,015
2	20,19	3,187	0,019
3	20,07	3,168	0,024
4	19,92	3,144	0,025
5	19,76	3,119	0,026
6	19,60	3,093	0,023
7	19,45	3,070	0,030
8	19,26	3,040	0,021
9	19,13	3,019	0,006
10	19,09	3,013	0,010
11	19,03	3,003	0,006
12	18,99	2,997	0,014
13	18,90	2,983	0,011
14	18,83	2,972	0,014
15	18,74	2,958	0,013
16	18,66	2,945	0,014
17	18,57	2,931	

Na ligação estrela do transformador, o enrolamento S estará energizado somente em tensão, não havendo passagem de corrente por ele. A indutância de dispersão $L_{ad_{AT-S}}$ e $L_{ad_{S-RF}}$ não interferirá no cálculo.

O valor da indutância de dispersão entre o enrolamento TER e BT será calculado utilizando os dados geométricos do transformador. Para realizar este cálculo será utilizada a equação 5.19, obtida na referência [9], onde se tem:

$$\%X = \frac{5,94 N I (3b_0s_0 + b_1s_1 + b_2s_2)}{\phi_m 10^8 [h_x + 0,32(b_0 + b_1 + b_2)]} \quad (5.19)$$

Onde:

$b_0 \Rightarrow$ é a distância entre os enrolamentos A e B;

$b_1 \Rightarrow$ é espessura do enrolamento B;

$b_2 \Rightarrow$ é espessura do enrolamento A;

$s_0 \Rightarrow$ é o comprimento da circunferência média entre os enrolamentos A e B;

$s_1 \Rightarrow$ é o comprimento médio da circunferência do enrolamento B;

$s_2 \Rightarrow$ é o comprimento médio da circunferência do enrolamento A;

$h_x \Rightarrow$ é a altura média dos enrolamentos A e B.

Assim:

$$b_0 = \frac{\phi_{int_{BT}} - \phi_{ext_{TER}}}{2} = \frac{514 - 484}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$b_1 = \frac{\phi_{est_{BT}} - \phi_{int_{BT}}}{2} = \frac{672 - 514}{2} = 79 \text{ mm}$$

$$b_2 = \frac{\phi_{ext_{TER}} - \phi_{int_{TER}}}{2} = \frac{484 - 456}{2} = 14 \text{ mm}$$

$$s_0 = 2\pi \frac{\phi_{ext_{TER}} + b_0}{2} = 2\pi \frac{484 + 15}{2} = 1567,6669 \text{ mm}$$

$$s_1 = 2\pi \frac{\phi_{int_{BT}} + b_1}{2} = 2\pi \frac{672 + 79}{2} = 2359,3544 \text{ mm}$$

$$s_2 = 2\pi \frac{\phi_{\text{int_TER}} + b_1}{2} = 2\pi \frac{456 + 14}{2} = 1476,5599 \text{ mm}$$

Voltando na equação 5.19, utilizando o número de espiras e a corrente que passa pelo enrolamento TER, tem-se:

$$X_{\text{BT-TER}} = 2,5 \%$$

$$X_{\text{BT-TER}} = 0,14878 \Omega$$

$$L_{\text{ad_BT-TER}} = \frac{X_{\text{BT-TER}}}{2 \pi f} = \frac{0,14870}{2 \pi 60} = 0,394 \text{ mH}$$

5.8.2 Enrolamento de Alta Tensão em Delta

Analizando o diagrama unifilar do transformador, nota-se que com o comutador na posição central, tap 9, através da impedância percentual medida no ensaio de perdas em carga, obtém-se a indutância de dispersão total entre os enrolamentos AT, S e BT.

A impedância do transformador obtida no ensaio referido à temperatura de 75°C , para o tap de posição 9, conforme tabela 2.7 é:

$$\begin{aligned} Z &= 20,09\% \\ P_{\text{base}} &= 32 \text{ MVA} \\ V_{\text{base}} &= 13,8 \text{ kV} \\ Z_{\text{base}(32 \text{ MVA})} &= 5,95125 \Omega \end{aligned}$$

Referindo à impedância de base:

$$Z_{\text{Treferido}} = \frac{Z_{\text{T}}}{100} \times Z_{\text{base}} = \frac{20,09}{100} \times 5,95125 = 1,195606 \Omega$$

Assim:

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{AT}} + R_{\text{S}} + R_{\text{BT}} = 0,02267 \Omega$$

$$X_{\text{d}} = \sqrt{Z_{\text{Treferido}}^2 - R_{\text{Total}}^2}$$

$$X_{\text{d}} = \sqrt{1,195606^2 - 0,02267^2} = 1,195391 \Omega$$

A indutância de dispersão é:

$$L_{\text{ad_tap9}} = \frac{X_{\text{d}}}{2 \pi f} = \frac{1,195391}{2 \times \pi \times 60} = 3,171 \text{ mH}$$

Portanto:

$$L_{ad_{AT-S}} = L_{ad_{tap9}} = 3,171 \text{ mH}$$

O enrolamento RF tem o mesmo princípio de atuação para o transformador ligado em delta. Assim, com mais espiras, tem-se mais fluxo de dispersão e, com menos espiras, tem-se fluxo menor.

A tabela 5.12 apresenta os valores da impedância de dispersão $L_{ad_{S-RF}}$ entre o enrolamento S e RF para cada posição do comutador.

Tabela 5.12 – Valor da indutância de dispersão $L_{ad_{S-RF}}$

Tap	Impedância transformador (%)	Indutância total (mH)	Indutância dispersão de cada tap (mH)
1	21,34	3,368	0,017
2	21,23	3,351	0,021
3	21,10	3,330	0,025
4	20,94	3,305	0,025
5	20,78	3,280	0,033
6	20,57	3,247	0,030
7	20,38	3,217	0,027
8	20,21	3,190	0,019
9	20,09	3,171	0,014
10	20,00	3,157	0,018
11	19,89	3,139	0,016
12	19,79	3,123	0,015
13	19,69	3,108	0,024
14	19,54	3,084	0,021
15	19,41	3,063	0,019
16	19,29	3,044	0,018
17	19,17	3,026	

Na ligação delta do transformador, o enrolamento TER terá força magnetomotriz sem a circulação de corrente. Com isso, a indutância de dispersão $L_{ad_{TER-BT}}$ poderá ser determinada pelo espaço de ar existente entre os dois enrolamentos, terciário (TER) e baixa tensão (BT), conforme calculado no item 5.8.1.

O valor calculado de indutância de dispersão para o comutador na posição de tap 9 corresponderá à soma das indutâncias de dispersão do enrolamento AT – BT e AT – S. Portanto:

$$L_{ad_{tap9}} = L_{ad_{AT-BT}} + L_{ad_{AT-S}} \quad (5.20)$$

A indutância de dispersão do enrolamento de AT – S será obtida baseando-se nos dados geométricos, da equação 5.19 (onde ϕ = diâmetro). Os quais são:

$$b_0 = \frac{\phi_{int_S} - \phi_{ext_{AT}}}{2} = \frac{1070 - 998}{2} = 36 \text{ mm}$$

$$b_1 = \frac{\phi_{ext_S} - \phi_{int_{AT}}}{2} = \frac{1090 - 1070}{2} = 10 \text{ mm}$$

$$b_2 = \frac{\phi_{ext_{AT}} - \phi_{int_{AT}}}{2} = \frac{998 - 746}{2} = 126 \text{ mm}$$

$$s_0 = 2\pi \frac{\phi_{ext_{AT}} + b_0}{2} = 2\pi \frac{998 + 36}{2} = 3248,4319 \text{ mm}$$

$$s_1 = 2\pi \frac{\phi_{int_S} + b_1}{2} = 2\pi \frac{1070 + 10}{2} = 3392,9463 \text{ mm}$$

$$s_2 = 2\pi \frac{\phi_{int_{AT}} + b_1}{2} = 2\pi \frac{746 + 126}{2} = 2739,49 \text{ mm}$$

Voltando na equação 5.19, utilizando o número de espiras do enrolamento S, bem como a corrente que passa pelo mesmo, teremos:

$$X_{AT-S} = 2,0284 \text{ pu}$$

$$X_{AT-S} = 4,4726 \Omega$$

$$L_{ad_{AT-S}} = \frac{X_{AT-S}}{2\pi f} = \frac{4,4726}{2\pi 60} = 11,864 \text{ mH}$$

Retornando à equação 5.20, tem-se:

$$L_{ad_{AT-BT}} = L_{ad_{tap9}} - L_{ad_{AT-S}} = 3,064 \text{ mH}$$

5.9 Cálculo da Indutância Devido ao Fluxo Mútuo através do Ar

Para o cálculo desta indutância utilizam-se os dados geométricos do transformador para determinar a área de ar entre o enrolamento TER e a coluna. Segue-se o cálculo desta indutância de dispersão.

$$A_{i_{TER}} = \frac{\pi \times (0,456)^2}{4} = 17,56 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$A_m = 0,1304 \text{ m}^2$$

$$A_{ar} = 0,1756 - 0,1304 = 4,52 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$h = \frac{h_{col} + h_{e_{BT}}}{2} = \frac{1,785 + 1,630}{2} = 1,7075 \text{ m}$$

Através dos dados acima se pode calcular a relutância $\mathfrak{R}_{am}$ pela equação (3.4) e posteriormente sua indutância L_{am} . Assim:

$$\mathfrak{R}_{am} = \frac{h}{\mu \times A_{ar}} = \frac{1,7075}{4\pi \cdot 10^{-7} \times 0,0452} = 30,067 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$L_{am} = \frac{N_{TER}^2}{\mathfrak{R}_{am}} = \frac{130^2}{30,067 \cdot 10^6} = 562,0780 \mu\text{H}$$

5.10 Indutância de Dispersão entre Fases

A indutância devido à parcela do fluxo de dispersão entre fases é calculada a partir dos dados U_m e I_m fornecidos pelo ensaio da medição de sequência zero apresentado no capítulo II.

Para o cálculo da indutância de dispersão utiliza-se os valores de ensaio obtidos na posição de tap 9 do comutador.

5.10.1 Enrolamento de Alta Tensão em Estrela

Sabe-se que para cada fase:

$$Z_0 = \frac{3 \times U_m}{I_m} = \frac{3 \times 22,27}{182,04} = 367 \text{ m}\Omega$$

A reatância de sequência zero por fase é determinada por:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_{Total_{BT}}^2} = \sqrt{0,367^2 - 0,01082^2} = 366,84 \text{ m}\Omega$$

A indutância de sequência zero é dada por:

$$L_{seq0} = \frac{X_0}{2\pi f} = \frac{0,36684}{2 \times \pi \times 60} = 973,07 \mu\text{H}$$

Analizando o diagrama de ligação do ensaio de medição de seqüência zero, figura 2.6, a indutância de seqüência zero calculada é a própria indutância de dispersão entre fases L_{ef} , pelo fato dos enrolamentos de alta tensão e terciário estarem abertos. Com isso não teremos a indutância de dispersão entre enrolamentos.

$$L_{ef} = L_{seq0} = 973,07 \mu H$$

5.10.2 Enrolamento de Alta Tensão em Delta

Sabe-se que para cada fase:

$$Z_0 = \frac{3 \times U_m}{I_m} = \frac{3 \times 72,90}{181,18} = 1,207 \Omega$$

A reatância de seqüência zero por fase é determinada por:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_{TotalBT}^2} = \sqrt{1,207^2 - 0,01082^2} = 1,206 \Omega$$

A indutância de seqüência zero é dada por:

$$L_{seq0} = \frac{X_0}{2 \pi f} = \frac{1,206}{2 \times \pi \times 60} = 3,201 mH$$

Pelo mesmo motivo descrito no item anterior, tem-se:

$$L_{ef} = L_{seq0} = 3,201 mH$$

5.11 Representação das Perdas no Ferro

O ensaio a vazio fornece as perdas no núcleo. As perdas no ferro podem ser calculadas subtraindo as perdas nos enrolamentos, assim:

$$P_{fe} = P_{total} - R_{BT} (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)$$

$$P_{fe} = 20040 - 0,01082 \times (1,627)^2 = 20039,97 W$$

Estas perdas no ferro são distribuídas entre colunas e culatras na proporção de seus volumes e representadas no circuito elétrico equivalente por resistências em paralelo com os indutores não lineares.

Os volumes e as perdas na coluna e na culatra são calculados por:

$$V_{\text{coluna}} = 3(A_n \times l_{\text{coluna}}) = 3(0,1304 \times 2,205) = 0,862596 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{culatra}} = 2(A_n \times l_{\text{culatra}}) = 2(0,1304 \times 2,386) = 0,6222688 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{núcleo}} = V_{\text{coluna}} + V_{\text{culatra}} = 0,862596 + 0,6222688 = 1,4848648 \text{ m}^3$$

$$P_{\text{fe-coluna}} = \frac{P_{\text{fe}}}{V_{\text{núcleo}}} \times V_{\text{coluna}} = \frac{20039,97}{1,4848648} \times 0,287532 = 3880,52 \text{ W}$$

$$P_{\text{fe-culatra}} = \frac{P_{\text{fe}}}{V_{\text{núcleo}}} \times V_{\text{culatra}} = \frac{20039,97}{1,4848648} \times 0,3111344 = 4199,12 \text{ W}$$

As resistências que representam estas perdas são determinadas da seguinte forma:

$$R_{\text{fcol}} = \frac{V^2}{P_{\text{fe-col}}} = \frac{(13800)^2}{3880,52} = 49075,90 \Omega$$

$$R_{\text{fcul}} = \frac{V^2}{P_{\text{fe-cul}}} = \frac{(13800)^2}{4199,12} = 45352,36 \Omega$$

5.12 Ajuste dos Parâmetros Magnéticos e Elétricos do Transformador

5.12.1 Ajuste dos Parâmetros Magnéticos

O parâmetro magnético do modelo do transformador, calculado nos itens anteriores, tem como base o valor da tensão, corrente e número de espiras dos respectivos enrolamentos. Deve-se referir estes parâmetros para uma base única de tensão representativa do núcleo magnético, devendo ser, portanto aplicado nas indutâncias lineares, nas correntes e fluxos totais dos indutores não lineares. Estes parâmetros em questão serão ajustados para uma nova tensão base de 10.000 V adotada aleatoriamente.

O valor do fluxo total na tensão de base 10.000 V é calculado pela equação (3.1):

$$\Phi_{10kV} = \frac{V}{4,44 N f} = \frac{10000}{4,44 \times 1371 \times 60} = 2,738 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

Onde N é o número total de espiras do enrolamento de alta tensão na tensão de 84 kV no tap 9.

Nestas condições o valor do fluxo concatenado correspondente é:

$$\lambda_{10kV} = N\phi = 1371 \times 2,738 \cdot 10^{-2} = 3753,798 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

Com relação às correntes para produção de tal fluxo, estas são obtidas referindo as correntes i_{col} e i_{cul} à tensão de 10.000 V, tomada como base de tensão, multiplicando-se pelo fator K_i .

$$K_i = \frac{84000}{10.000} = 8,4$$

$$i_{col_{10kV}} = 8,4 \times 50,8795 \cdot 10^{-2} = 427,3878 \cdot 10^{-2} \text{ A}$$

$$i_{cul_{10kV}} = 8,4 \times 55,0559 \cdot 10^{-2} = 462,4696 \cdot 10^{-2} \text{ A}$$

Para representar as indutâncias não lineares das colunas e culatras, utiliza-se a relação entre o fluxo magnético e a corrente. Deve-se então relacionar cada ponto da curva $B-H$ com correntes e fluxo concatenado. Estes parâmetros são determinados, para coluna e culatra, de acordo com o seguinte procedimento:

$$\lambda_{col-i} = \frac{B_i}{B_{col}} \lambda_{10kV} = \frac{B_i}{1,763} \times 3753,798 \cdot 10^{-2} = B_i \times 2129,21 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \quad (5.21)$$

$$\lambda_{col-i} = \lambda_{cul-i} \quad (5.22)$$

$$i_{col-i} = \frac{H_i}{H_{col}} i_{col_{10kV}} = \frac{H_i}{316,3417} \times 427,3878 \cdot 10^{-2} = H_i \times 1,3510 \cdot 10^{-2} \text{ A} \quad (5.23)$$

$$i_{cul-i} = \frac{H_i}{H_{cul}} i_{cul_{10kV}} = \frac{H_i}{316,3417} \times 462,4696 \cdot 10^{-2} = H_i \times 1,4619 \cdot 10^{-2} \text{ A} \quad (5.24)$$

Aplicando as equações (5.21), (5.22), (5.23) e (5.24) para cada ponto da curva $B-H$ obtêm-se os dados apresentados na tabela 5.13. O índice i indica parâmetro variável.

A tabela 5.13 contempla um ajuste na corrente da coluna e da culatra em função do material magnético e, o projeto de corte da chapa aplicado na construção do núcleo deste transformador, para obter-se um nível de ruído especificado no fornecimento, que é inferior ao valor normalizado. Esta tabela é aplicada em ambos modelos de transformador, na ligação delta ou estrela, por ser o mesmo núcleo em ambas ligações.

Tabela 5.13 – Fluxo magnético e corrente para variações indutâncias

Dados da Curva B-H		Coluna		Culatra	
B (T)	H (A/m)	Fluxo (Wb)	Corrente (A)	Fluxo (Wb)	Corrente (A)
0,447	54,6638	9,5197705	0,4283692	9,5197705	0,4635329
0,798	55,6761	16,9947620	0,4363020	16,9947620	0,4721168
1,596	80,9835	33,9897117	0,6346211	33,9897117	0,6867154
1,658	101,2293	35,3001353	0,7932763	35,3001353	0,8583943
1,711	151,8440	36,4267354	1,1899145	36,4267354	1,2875914
1,728	202,4587	36,8022687	1,5865526	36,8022687	1,7167885
1,764	253,0733	37,5533354	2,1963262	37,5533354	2,3766167
1,774	303,6880	37,7786555	2,4567815	37,7786555	2,6584522
1,785	354,3027	38,0039755	2,8662451	38,0039755	3,1015275
1,799	404,9174	38,3044022	3,2757087	38,3044022	3,5446029
1,807	455,5320	38,4686980	3,6851723	38,4686980	3,9876783
1,814	506,1467	38,6329938	4,0946359	38,6329938	4,4307536
1,822	556,7614	38,7972897	4,5040994	38,7972897	4,8738290
1,830	607,3760	38,9615855	4,9135630	38,9615855	5,3169044
1,838	657,9907	39,1258814	5,3230266	39,1258814	5,7599797
1,845	708,6054	39,2901772	5,7324902	39,2901772	6,2030551
1,853	759,2200	39,4544731	6,1419538	39,4544731	6,6461304
1,861	809,8347	39,6187689	6,5514174	39,6187689	7,0892058
1,864	860,4494	39,6891814	6,9608809	39,6891814	7,5322812
1,867	911,0641	39,7595939	7,3703445	39,7595939	7,9753565
1,871	961,6787	39,8300064	7,7798081	39,8300064	8,4184319
1,874	1012,2934	39,9004189	8,1892717	39,9004189	8,8615073
1,877	1062,9081	39,9708314	8,5987353	39,9708314	9,3045826

5.12.2 Ajuste dos Parâmetros Elétricos

Os parâmetros elétricos do modelo do transformador, indutores lineares e não lineares serão ajustados para uma nova tensão base de 10.000 V adotada aleatoriamente.

Para as indutâncias devido ao fluxo de dispersão: quando calculadas utilizando os parâmetros da alta tensão, na ligação estrela, elas devem ser multiplicadas pela relação 5.25 (para serem referidas à nova base).

$$\left(\frac{10}{75,979} \right)^2 = 0,01732 \quad (5.25)$$

Na ligação delta, elas devem ser multiplicadas pela relação 5.26 (para serem referidas à nova base).

$$\left(\frac{10}{84}\right)^2 = 0,01417 \quad (5.26)$$

Para a indutância devido ao fluxo de dispersão, quando calculada utilizando os parâmetros da baixa tensão, deve ser multiplicada pela relação 5.27 (para serem referidas à nova base).

$$\left(\frac{10}{7,967}\right)^2 = 1,5745 \quad (5.27)$$

A tabela 5.14 mostra os valores das indutâncias dos parâmetros do modelo para a nova tensão base de 10.000 V, para ambas ligações do transformador, delta e estrela.

Tabela 5.14 – Parâmetros do modelo do circuito magnético na base de 10 kV – transformador ligado em estrela e delta (indutâncias em mH).

Legenda	Indutância (mH)	
	Lig. Estrela	Lig. Delta
L_{am}	0,295	0,295
$L_{ad_{BT-TER}}$	0,621	0,621
$L_{ad_{AT-BT}}$	4,753	4,825
$L_{ad_{AT-S}}$	0,205	0,168
L_{ef}	1,532	5,040
$L_{ad_{RF-tap1}}$	0,033	0,027
$L_{ad_{RF-tap2}}$	0,047	0,033
$L_{ad_{RF-tap3}}$	0,036	0,039
$L_{ad_{RF-tap4}}$	0,041	0,039
$L_{ad_{RF-tap5}}$	0,039	0,052
$L_{ad_{RF-tap6}}$	0,038	0,047
$L_{ad_{RF-tap7}}$	0,030	0,043
$L_{ad_{RF-tap8}}$	0,024	0,030

5.13 Considerações Finais

Este capítulo apresenta a metodologia para parametrizar o modelo do transformador a ser implementado no software ATP.

Para que esta metodologia seja eficiente e confiável, é importante adquirir o conhecimento físico construtivo do transformador e o seu diagrama unifilar de ligações internas, visto que, este conhecimento é necessário na implementação do circuito elétrico no software ATP, como também, na determinação dos parâmetros elétricos do mesmo, como demonstrado neste capítulo.

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO DO TRANSFORMADOR REGULADOR

6.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o desempenho do modelo do transformador regulador desenvolvido e implementado no programa ATP, comparando os resultados das simulações computacionais com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório realizados, pelo fabricante do transformador, ensaios estes descritos no capítulo II.

As simulações computacionais dos ensaios são realizadas seguindo os métodos descritos na NBR 5380 [15]. Estas simulações são feitas para a condição de ligação do enrolamento de alta tensão do transformador, que pode estar na ligação estrela ou delta. Os ensaios simulados em ambas as ligações são:

- Ensaio de relação de transformação;
- Ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação;
- Ensaio de perdas em carga e impedância de curto-circuito;
- Ensaio da medição da impedância de sequência zero.

6.2 Transformador Regulador na Ligação Estrela

Os resultados dos ensaios obtidos nas simulações computacionais estão descritos nas subseções seguintes.

6.2.1 Simulação do Ensaio de Relação de Transformação

Nesta simulação energizou-se o transformador com uma fonte de tensão trifásica equilibrada de valor nominal 11.267,65 V de pico por fase, que corresponde a uma tensão nominal 13.800 Vrms nos terminais de baixa tensão do transformador.

A tabela 6.1 apresenta os resultados das medições realizadas no ensaio nos terminais de alta tensão e baixa tensão do transformador.

Tabela 6.1 – Resultados da simulação do ensaio de relação de transformação.

Tap	Tensão medida (Volts)					
	Alta Tensão			Baixa Tensão		
	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0
1	146000	146000	146000	7967,0	7968,0	7968,0
2	144200	144200	144200			
3	142400	142400	142400			
4	140600	140600	140600			
5	138800	138800	138800			
6	137000	137000	137000			
7	135200	135200	135200			
8	133400	133400	133400			
9	131600	131600	131600			
10	129800	129800	129800			
11	128000	128000	128000			
12	126200	126200	126200			
13	124400	124400	124400			
14	122600	122600	122600			
15	120800	120800	120800			
16	119000	119000	119000			
17	117200	117200	117100			

A tabela 6.2 apresenta os valores de relação de transformação, teórico e simulado, e a diferença percentual entre eles. A qual corresponde ao maior valor obtido em cada fase, no mesmo tap do comutador.

Tabela 6.2 – Relação de transformação e diferença percentual.

Tap	Relação Teórica	Relação Obtida na Simulação			Diferença Percentual da Relação de Transformação (%)
		Fase A	Fase B	Fase C	
1	10,590	10,580	10,579	10,579	-0,10
2	10,460	10,450	10,449	10,449	-0,11
3	10,330	10,319	10,318	10,318	-0,12
4	10,190	10,189	10,188	10,188	-0,02
5	10,060	10,059	10,057	10,057	-0,03
6	9,932	9,928	9,927	9,927	-0,05
7	9,801	9,798	9,796	9,796	-0,05
8	9,670	9,667	9,666	9,666	-0,04
9	9,539	9,537	9,536	9,536	-0,04
10	9,408	9,406	9,405	9,405	-0,03
11	9,277	9,276	9,275	9,275	-0,02
12	9,145	9,145	9,144	9,144	-0,01
13	9,014	9,015	9,014	9,014	0,01
14	8,883	8,885	8,883	8,883	0,02
15	8,752	8,754	8,753	8,753	0,02
16	8,621	8,624	8,623	8,623	0,03
17	8,490	8,493	8,492	8,485	-0,06

6.2.2 Simulação do Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação

Esta simulação repetiu as condições do ensaio a vazio, com o transformador sendo alimentado por uma fonte constante, conectada no enrolamento de baixa tensão, com o neutro X_0 isolado.

A simulação computacional foi realizada com o comutador no tap 09, com o valor da tensão de 95%, 100% e 105% da tensão nominal do transformador regulador. A tabela 6.3 apresenta os valores obtidos no referido ensaio. O valor em porcentagem de corrente de excitação $I_0(\%)$ é calculado para uma potência garantida de 40 MVA.

Tabela 6.3 – Resultado da simulação do ensaio de perdas em vazio.

%	Veficaz (V)	Vsimulado (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	I_0 (A)	I_0 (%)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)	Wt (W)
95	13110	13110	1,066	0,806	1,276	1,049	0,063	5090	5404	8296	18790
100	13800	13800	1,568	1,099	1,772	1,480	0,088	4892	5989	9939	20820
105	14490	14490	3,495	2,386	3,670	3,184	0,190	2707	6605	13640	22952

A figura 6.1 apresenta o oscilograma das correntes de magnetização do transformador, na condição de 100% da tensão nominal. Verifica-se que as formas de onda das correntes são similares e a fase central possui um valor menor de corrente de magnetização do que as fases laterais. Devido à condição de simetria da fonte de tensão que impõe um valor de pico de fluxo em uma coluna e, nas outras colunas impõe aproximadamente a metade deste valor, nas colunas laterais há um fluxo maior do que aquele da coluna central do núcleo.

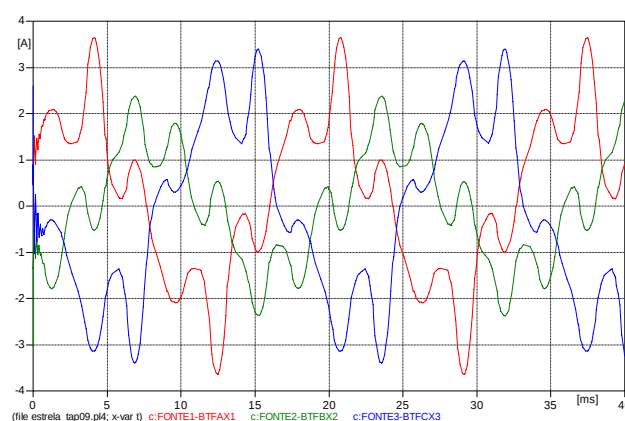


Figura 6.1 – Formas de onda das correntes de excitação.

6.2.3 Simulação do Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-circuito

Esta simulação repetiu as condições do ensaio de perdas em carga com o transformador alimentado por uma fonte trifásica e constante, no enrolamento de alta tensão, e com o enrolamento de baixa tensão curto-circuitado. A tabela 6.4 apresenta os valores obtidos na referida simulação e o valor da impedância do transformador em cada posição do comutador.

Verifica-se que a impedância do transformador está relacionada com a posição em que o comutador de derivação em carga do transformador se encontra. O valor máximo de impedância está no tap de maior tensão e a variação da impedância, tap a tap, também não é constante, pois o fluxo de dispersão não é constante para cada tap, como visto anteriormente.

Tabela 6.4 – Resultado da simulação do ensaio de perdas em carga.

Tap	I (A)	Tensão (V)			Z (V)	Potência (W)				Impedância (%)
		H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1		Wa	Wb	Wc	Wtotal	
1	126,4	27890	27890	27890	27890	44920	44930	45260	135110	21,19
2	128,0	27560	27560	27560	27560	45120	45440	45140	135700	20,94
3	129,7	27230	27230	27230	27230	45300	45310	45640	136250	20,69
4	131,2	26860	26860	26860	26860	45370	45390	45720	136480	20,41
5	133,0	26520	26520	26520	26520	45550	45560	45890	137000	20,15
6	134,8	26190	26190	26190	26190	45750	45760	46090	137600	19,90
7	136,5	25830	25830	25830	25830	45850	45860	46190	137900	19,63
8	138,4	25480	25480	25480	25480	45980	45990	46320	138290	19,36
9	140,4	25150	25150	25150	25150	46190	46200	46530	138920	19,11
10	142,3	24810	24810	24810	24810	47340	47350	47680	142370	18,85
11	144,3	24460	24460	24460	24460	48520	48530	48860	145910	18,59
12	146,4	24120	24120	24120	24120	49790	49800	50130	149720	18,33
13	148,5	23780	23780	23780	23780	51100	51110	51440	153650	18,07
14	150,7	23440	23440	23440	23440	52510	52520	52850	157880	17,81
15	153,0	23100	23100	23100	23100	53970	53980	54310	162260	17,55
16	155,3	22750	22750	22750	22750	55470	55480	55810	166760	17,29
17	157,7	22410	22410	22410	22410	57110	57110	57440	171660	17,03

6.2.4 Simulação do Ensaio da Medição da Impedância de Sequência Zero

Esta simulação repetiu as condições do ensaio de medição da impedância de sequência zero com o transformador alimentado por uma fonte monofásica no enrolamento de baixa tensão. O diagrama de ligação para esta simulação é o mesmo apresentado na figura 2.7. A tabela 6.5 apresenta os valores obtidos na referida simulação e o valor da impedância de sequência zero $Z_o(\%)$.

Tabela 6.5 – Resultado da simulação do ensaio de medição da impedância sequência zero.

Tap	Tensão (V)	Corrente (A)	Z_o (Ω /fase)	Z_o (%)
1	22,10	182,3	0,36369	7,64
9	22,27	183,8	0,36349	7,63
17	22,29	184,0	0,36342	7,63

Observa-se que a corrente de sequência zero possui uma forma de onda senoidal, o que mostra a linearidade entre a tensão e a corrente, ou seja, o fluxo de sequência zero se estabelece pelo ar. A figura 6.2 mostra o oscilograma da corrente de sequência zero obtida na simulação.

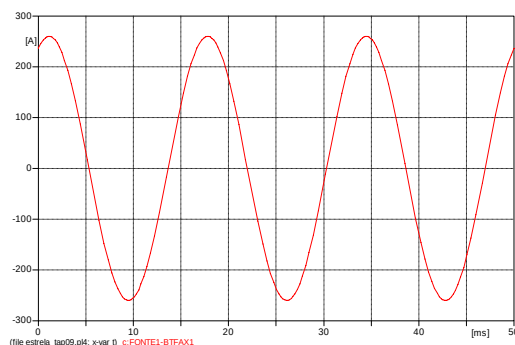


Figura 6.2 – Forma de onda da corrente de sequência zero no enrolamento de baixa tensão.

6.3 Transformador Regulador na Ligação Delta

Os resultados dos ensaios obtidos nas simulações computacionais estão descritos nas subseções seguintes.

6.3.1 Simulação do Ensaio de Relação de Transformação

Nesta simulação energizou-se o transformador com uma fonte de tensão trifásica equilibrada de valor nominal 11.267,65 V de pico por fase, que corresponde a uma tensão nominal 13.800 Vrms nos terminais de baixa tensão do transformador. A tabela 6.6 apresenta os resultados das medições realizadas no ensaio nos terminais de alta tensão e baixa tensão do transformador.

Tabela 6.6 – Resultados da simulação do ensaio de relação de transformação.

Tap	Tensão (Volts)					
	Alta Tensão			Baixa Tensão		
	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0
1	92350	92340	92330	7967,0	7968,0	7968,0
2	91300	91300	91290			
3	90260	90260	90250			
4	89220	89210	89210			
5	88180	88170	88170			
6	87140	87130	87120			
7	86090	86090	86080			
8	85050	85050	85040			
9	84010	84000	83990			
10	82970	82960	82960			
11	81930	81920	81910			
12	80880	80880	80870			
13	79840	79840	79830			
14	78800	78790	78790			
15	77760	77750	77750			
16	76710	76710	76710			
17	75670	75670	75660			

A tabela 6.7 apresenta os valores de relação de transformação, teórico e simulado, e a diferença percentual entre eles. A qual corresponde ao maior valor obtido em cada fase, no mesmo tap do comutador.

Tabela 6.7 – Relação de transformação e diferença percentual.

Tap	Relação Teórica	Relação Obtida na Simulação			Diferença Percentual da Relação de Transformação (%)
		Fase A	Fase B	Fase C	
1	11,600	11,592	11,589	11,588	-0,11
2	11,470	11,460	11,458	11,457	-0,11
3	11,340	11,329	11,328	11,327	-0,12
4	11,200	11,199	11,196	11,196	-0,04
5	11,070	11,068	11,066	11,066	-0,04
6	10,940	10,938	10,935	10,934	-0,06
7	10,810	10,806	10,804	10,803	-0,06
8	10,670	10,675	10,674	10,673	0,05
9	10,540	10,545	10,542	10,541	0,05
10	10,410	10,414	10,412	10,412	0,04
11	10,280	10,284	10,281	10,280	0,04
12	10,150	10,152	10,151	10,149	0,02
13	10,020	10,021	10,020	10,019	-0,01
14	9,884	9,891	9,888	9,888	0,07
15	9,752	9,760	9,758	9,758	0,08
16	9,620	9,628	9,627	9,627	0,09
17	9,489	9,498	9,497	9,495	0,09

6.3.2 Simulação do Ensaio de Perdas a Vazio e Corrente de Excitação

O circuito magnético é o mesmo tanto para o transformador regulador com o enrolamento de alta tensão ligado em estrela como em delta. Com isso, os valores obtidos nesta simulação são praticamente os mesmos em ambas ligações, com uma pequena diferença percentual que pode ser atribuída ao erro matemático que existe no próprio ATP. A tabela 6.8 apresenta os resultados comparativos entre as duas ligações.

Tabela 6.8 – Comparação dos resultados da simulação do ensaio vazio na ligação delta e estrela.

Tensão	Ligação delta		Ligação estrela		Diferença percentual	
	Io (%)	Wo (W)	Io (%)	Wo (W)	Io (%)	Wo (W)
13110	0,065	18608	0,063	18790	0,002	-0,010
13800	0,091	20618	0,088	20820	0,003	-0,010
14490	0,193	22729	0,190	22952	0,003	-0,010

6.3.3 Simulação do Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-circuito

Esta simulação repetiu as condições do ensaio de perdas em carga com o transformador alimentado por uma fonte de tensão trifásica constante, no enrolamento de alta tensão, e com o enrolamento de baixa tensão curto-circuitado. A tabela 6.9 apresenta os valores obtidos e o valor da impedância do transformador em cada posição do comutador.

Tabela 6.9 – Resultado da simulação do ensaio de perdas em carga.

Tap	I (A)	Tensão (V)			Z (V)	Potência (W)				Impedância (%)
		H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1		Wa	Wb	Wc	Wtotal	
1	200,2	18000	18000	18000	18000	38420	48540	43970	130930	21,43
2	202,4	17790	17790	17790	17790	38520	48630	44070	131220	21,18
3	204,8	17590	17590	17590	17590	38680	48800	44240	131720	20,94
4	207,3	17390	17390	17390	17390	38820	48950	44380	132150	20,70
5	209,8	17190	17190	17190	17190	38990	49120	44550	132660	20,46
6	212,3	16980	16980	16980	16980	39100	49230	44660	132990	20,21
7	214,9	16780	16780	16780	16780	39240	49370	44800	133410	19,98
8	217,5	16570	16570	16570	16570	39360	49490	44930	133780	19,73
9	220,2	16370	16370	16370	16370	39500	49630	45070	134200	19,49
10	223,0	16170	16170	16170	16170	40440	50580	46020	137040	19,25
11	225,9	15970	15970	15970	15970	41470	51610	47060	140140	19,01
12	228,8	15770	15770	15770	15770	42490	52630	48080	143200	18,77
13	231,8	15570	15570	15570	15570	43580	53720	49190	146490	18,54
14	234,9	15370	15370	15370	15370	44710	54860	50330	149900	18,30
15	238,1	15160	15160	15160	15160	45890	56030	51520	153440	18,05
16	241,3	14960	14960	14960	14960	47110	57250	52750	157110	17,81
17	244,7	14760	14760	14760	14760	48430	58570	54080	161080	17,57

Realizou-se também uma simulação no tap 09 para a potência de 40 MVA do transformador. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.10, bem como o respectivo valor de impedância do transformador.

Tabela 6.10 – Resultado da simulação do ensaio de perdas em carga no tap 09 na potência de 40 MVA do transformador.

Tap	I (A)	Tensão (V)			Z (V)	Potência (W)				Impedância (%)
		H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1		Wa	Wb	Wc	Wtotal	
9	275,3	20470	20470	20470	20470	61730	77570	70430	209730	24,37

6.3.4 Simulação do Ensaio de Medição da Impedância de Seqüência Zero

Esta simulação repetiu as condições do ensaio de medição da impedância de seqüência zero, com o transformador alimentado por uma fonte monofásica no enrolamento de baixa tensão. O diagrama de ligação para esta simulação é o mesmo apresentado na figura 2.8. A tabela 6.11 apresenta os valores obtidos na referida simulação e o valor da impedância de seqüência zero $Z_o(\%)$.

Tabela 6.11 – Resultado da simulação do ensaio medição da impedância seqüência zero.

Tap	Tensão (V)	Corrente (A)	Z_o (Ω /fase)	Z_o (%)
1	77,09	192,2	1,2033	25,27
9	72,89	181,8	1,2028	25,26
17	69,3	172,7	1,2038	25,29

Observa-se que a corrente de seqüência zero também possui uma forma de onda senoidal, o que mostra a linearidade entre a tensão e a corrente, ou seja, o fluxo de seqüência zero se estabelece pelo ar. A figura 6.3 mostra o oscilograma desta corrente obtida na simulação.

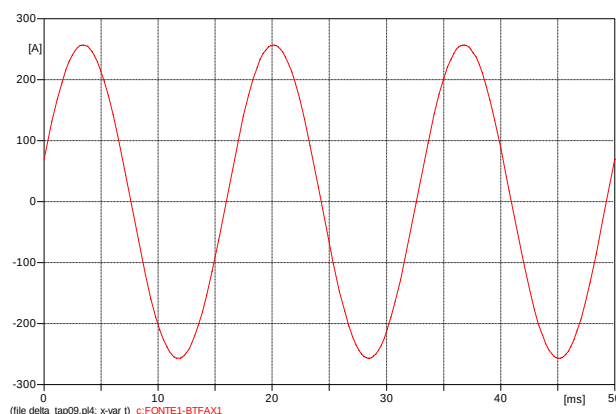


Figura 6.3 – Forma de onda corrente de seqüência zero no enrolamento de baixa tensão.

6.4 Comparação dos Resultados das Simulações com os Ensaios de Fábrica

Com base nos valores obtidos da simulação e comparando-se com os ensaios realizados pelo fabricante, pode-se concluir que as diferenças percentuais encontradas estão de acordo com as normas e recomendações técnicas [15].

6.4.1 Diferença Percentual na Relação de Transformação

Com base nos valores obtidos na simulação computacional em ambas as ligações do transformador, estrela e delta, a relação de transformação medida em relação ao valor calculado ficou na faixa de -0,012 a 0,09 %. Na prática, se aceita um valor máximo de $\pm 0,5\%$, portanto os valores obtidos são satisfatórios. A figura 6.4 mostra os valores máximos obtidos em módulo, de cada tap, da diferença percentual da relação de transformação para a ligação estrela e delta comparado com o ensaio do fabricante.

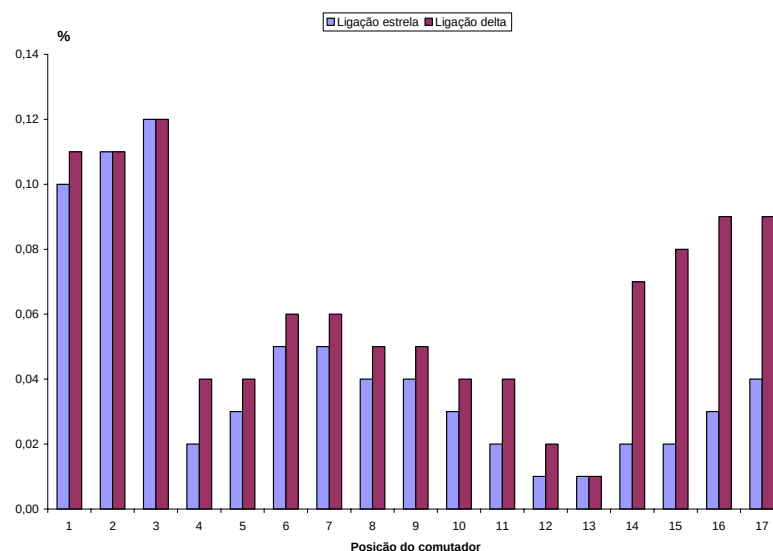


Figura 6.4 – Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação.

As figuras 6.5 e 6.6 mostram as diferenças percentuais entre o valor simulado e o ensaiado em ambas as ligações dos enrolamentos de alta tensão em estrela e delta. Pode-se observar que os taps de menor tensão possuem um erro maior do que os taps de maior tensão, enquanto no ensaio simulado apresentou-se uma condição inversa. Essa diferença se deve à variação do fluxo de

dispersão entre cada enrolamento, a qual existe devido à construção do transformador e aos parâmetros utilizados no modelo matemático.

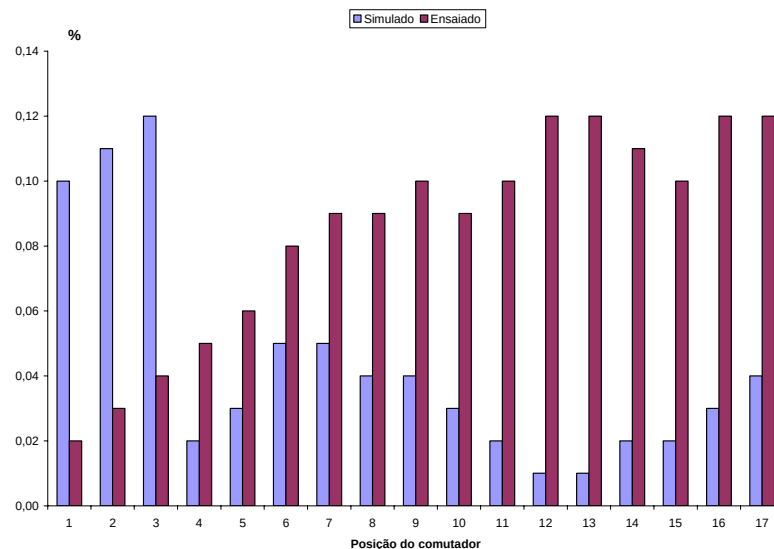


Figura 6.5 – Comparação da diferença percentual da relação de transformação entre simulado e ensaiado para ligação estrela do transformador.

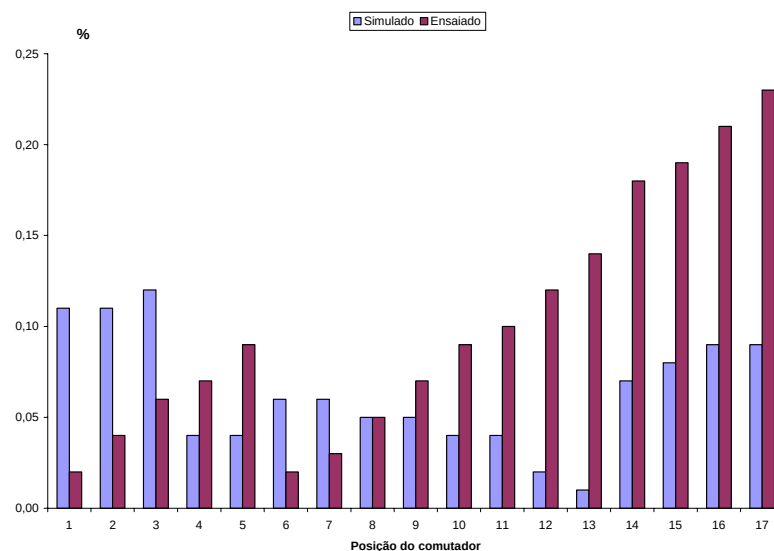


Figura 6.6 – Comparação da diferença percentual da relação de transformação entre simulado e ensaiado para ligação delta do transformador.

6.4.2 Diferença Percentual nas Perdas a Vazio e Corrente de Magnetização

Com base nos valores obtidos da simulação comparando-se com os ensaios realizados pelo fabricante, pode-se obter a diferença percentual entre simulação e ensaio. A tabela 6.12 mostra o resultado da comparação do ensaio do fabricante com a simulação no ATP.

Tabela 6.12 – Resultado da diferença percentual entre ensaio e simulação.

Tensão nominal (pu)	Erro (%)	
	Diferença Percentual Corrente Magnetizante (%)	Diferença Percentual Perdas em Vazio (%)
0,95	0,005	11,51
1,00	-0,009	3,89
1,05	-0,010	-4,53

Os valores obtidos para a corrente de magnetização, nota-se que os valores simulados são bem próximos dos valores de ensaio. Conclui-se que os valores da curva de corrente e fluxo nos reatores saturáveis que representam o material magnético da coluna e da culatra são adequados.

Com base nos valores obtidos, pode-se montar a curva de magnetização do transformador, conforme mostrado na figura 6.7. Comparando esta curva com aquela apresentada no capítulo II figura 2.3, nota-se que existe uma diferença que pode ser entendida pela condição do transformador possuir uma montagem e um corte de chapa para permitir um nível de ruído inferior a 71 dB, enquanto que a curva apresentada no capítulo II é uma curva de um projeto tradicional e nível de ruído conforme norma ABNT.

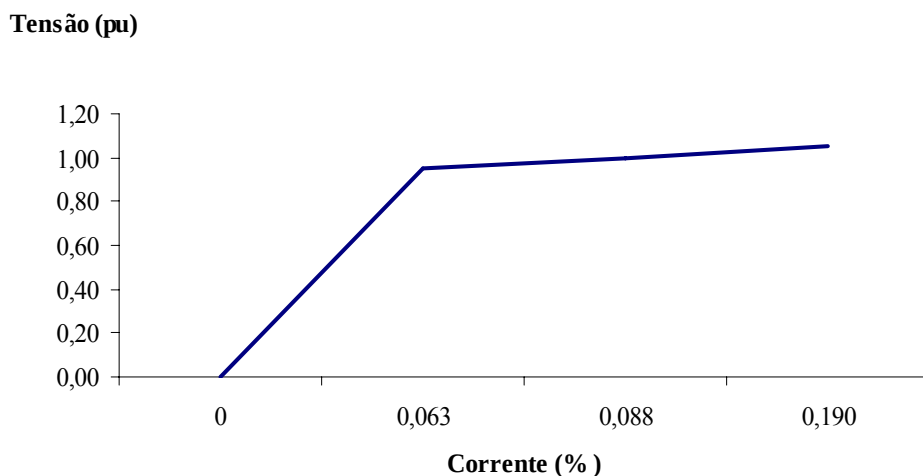


Figura 6.7 – Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação.

Com relação aos resultados obtidos para as perdas em vazio, a perda na condição nominal do transformador teve um valor satisfatório, para os níveis de 95 e 105% da tensão nominal.

6.4.3 Diferença Percentual nas Perdas em Carga e Impedância de Curto-circuito

Com base nos resultados obtidos na simulação computacional em ambas as ligações do transformador, estrela e delta, a diferença percentual da impedância de curto-circuito apresenta-se com valores dentro da faixa de 0,9 a 1,6%. Sendo portanto, satisfatórios. A figura 6.8 apresenta os valores obtidos em cada tap da diferença percentual da impedância de curto-circuito. Observa-se na ligação estrela um equilíbrio entre o tap 1 a 8 e 10 a 17. Lembra-se também, que para os taps de 10 a 17 tem-se a inversão do fluxo no núcleo em relação aos taps 1 a 8. Por outro lado, para a ligação delta tem-se um comportamento crescente da impedância desde o tap 1 até ao 17.

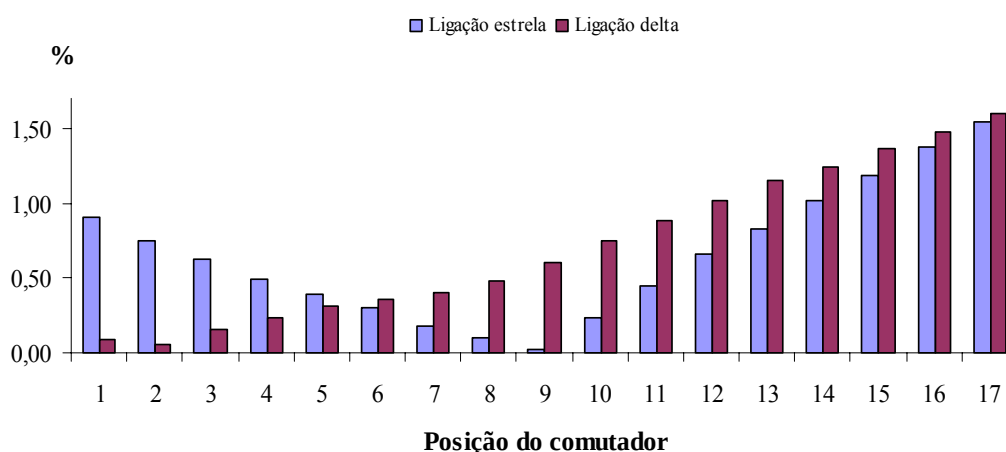


Figura 6.8 – Gráfico comparativo da diferença percentual da impedância curto-circuito do transformador.

Com relação aos valores obtidos para as perdas em carga, os mesmos apresentaram-se abaixo dos valores provenientes do ensaio de fábrica (na ordem de 8,0 %). Esta diferença deve-se ao arredondamento dos valores de tensão e corrente medido nos gráficos, pois no programa ATP não se lê a última casa decimal de um número real, influenciando no valor obtido da potência, e também devido a não representação das perdas adicionais do transformador. Esta diferença não contribuiu

nas simulações dos estudos de casos do capítulo VII. A figura 6.9 apresenta os valores obtidos em cada tap da diferença percentual das perdas em carga.

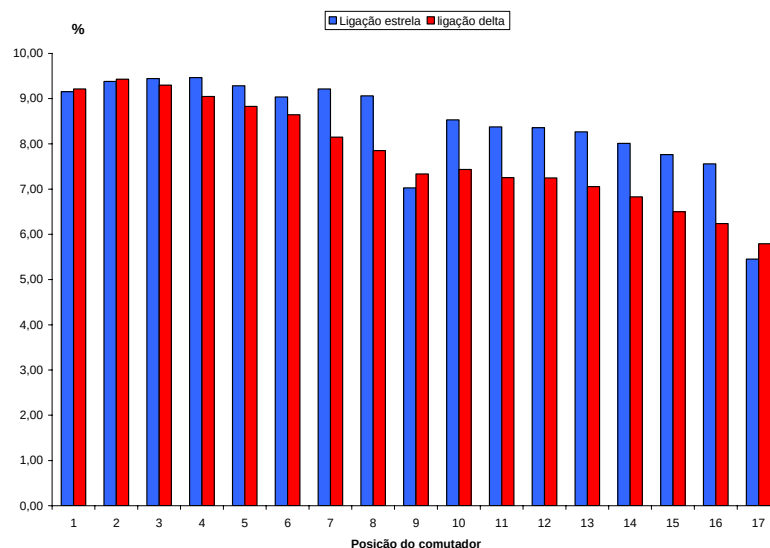


Figura 6.9 – Gráfico comparativo da diferença percentual das perdas em carga do transformador.

6.4.4 Diferença Percentual na Medição da Impedância de Seqüência Zero

Com relação à diferença percentual entre simulação e ensaio, observa-se para a ligação em estrela, que os valores obtidos em cada tap apresentam uma igualdade, sendo bem satisfatórios, enquanto que na ligação delta os valores, para os taps extremos, apresenta-se com uma diferença percentual maior, que não contribuirá nas simulações dos estudos de casos do capítulo VII.

A figura 6.10 apresenta os valores obtidos da diferença percentual nas medições da impedância de seqüência zero.

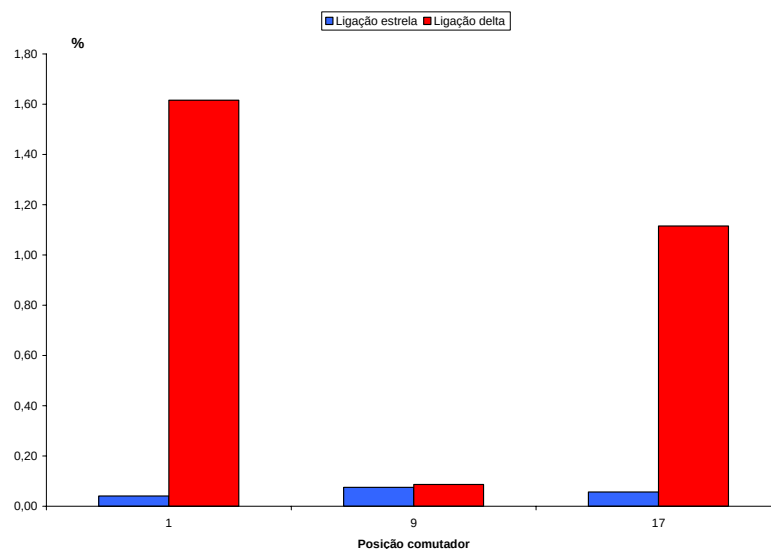


Figura 6.10 – Gráfico comparativo da diferença percentual nas medições da impedância de seqüência zero.

6.5 Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos das simulações computacionais, comparados com os ensaios de fábrica do transformador, conclui-se que o modelo apresentou resultados satisfatórios e adequados para serem utilizados e aplicados em estudos de casos do sistema elétrico de potência, as quais serão desenvolvidas no capítulo VII.

CAPÍTULO VII

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO DO TRANSFORMADOR REGULADOR

7.1 Introdução

Neste capítulo são analisados os fenômenos que ocorrem quando da atuação do sistema de comutação de derivação em carga, no desempenho do modelo do transformador regulador, nos modos operativos de um sistema elétrico de potência.

Os estudos são realizados inserindo o transformador regulador numa subestação transformadora de distribuição típica, conforme diagrama unifilar simplificado ilustrado na figura 7.1, para permitir a simulação dos seguintes estudos:

- Operação a vazio do transformador;
- Operação em carga do transformador;

Os resultados destes estudos têm o objetivo de apresentar informações adicionais para obter-se melhor desempenho do transformador dentro do sistema elétrico no qual o mesmo está inserido.

7.2 Operação da Subestação no Sistema Elétrico de Potência

A figura 7.1 mostra o diagrama unifilar simplificado da subestação onde está inserido o transformador regulador. A subestação possui as seguintes características elétricas:

- Potência instalada: 80 MVA;
- Tensão nominal: 138/88 – 13.8 kV.

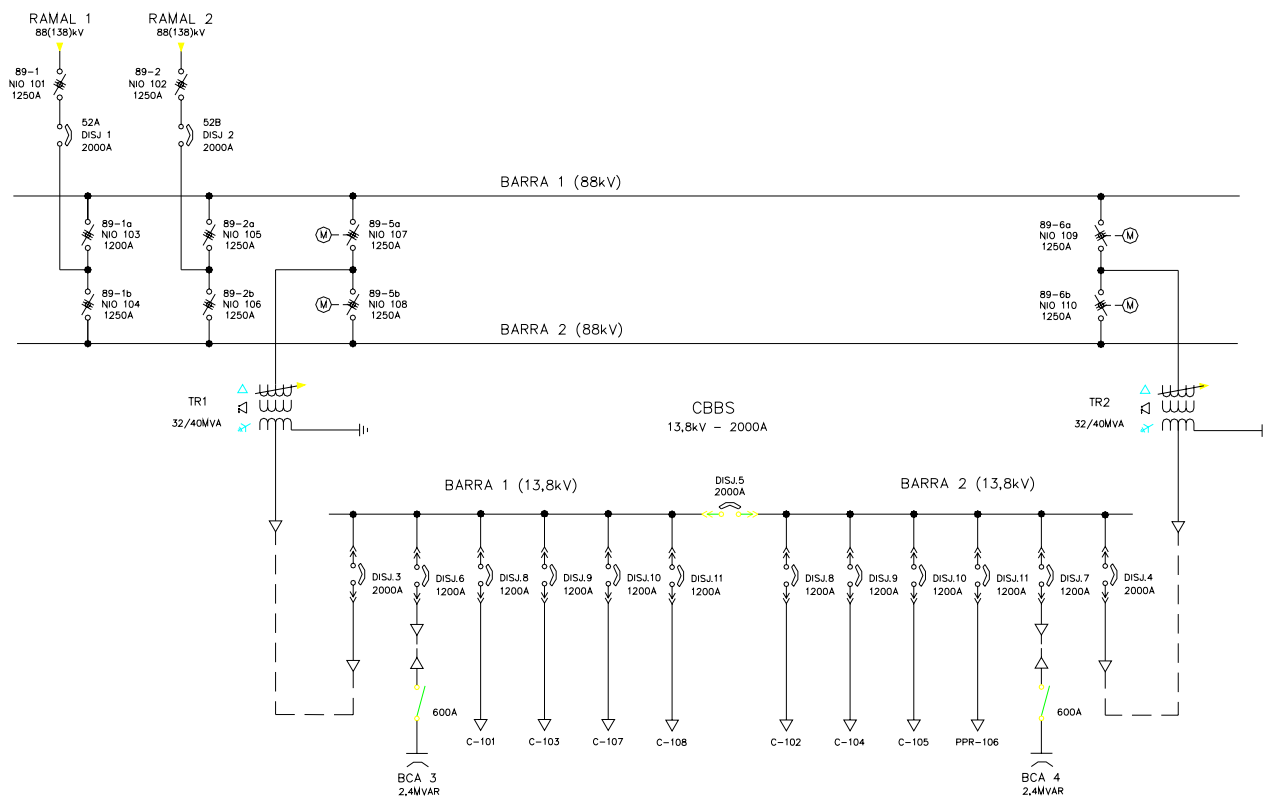


Figura 7.1 – Diagrama unifilar da subestação a ser simulada.

Esta subestação é alimentada por uma linha de subtransmissão, com dois circuitos conectados em dois disjuntores de alta tensão. Um destes disjuntores opera normalmente ligado e o outro está sempre preparado para ligar, em caso de falta de tensão no circuito que está em carga.

Os transformadores não operam em paralelo normalmente, mas somente em casos de manobra através dos disjuntores de interligação na baixa tensão, esse paralelismo é momentâneo, e pode durar até 30 segundos, quando esta manobra é realizada por telecomando individualmente.

Os bancos de capacitores instalados nesta subestação possuem a função de diminuir as perdas elétricas do transformador em carga. Essa diminuição das perdas pode ser realizada através de duas condições operativas, controle horário ou valor de potência reativa no ponto elétrico localizado na bucha de alta tensão do transformador. A correção do fator de potência é realizada ao longo do circuito de distribuição e não na subestação.

Nos estudos realizados, representa-se o sistema elétrico de potência que alimenta esta subestação, por uma fonte de tensão com uma impedância que corresponde à potência de curto-circuito nos disjuntores de alta tensão.

7.3 Operação a Vazio do Transformador

Ao realizar as simulações da operação em vazio do transformador regulador, operando na tensão de 84 kV e 131,6 kV, pode-se analisar o desempenho do modelo nas seguintes condições operativas com a comutação do tap;

- Operação do transformador sem comutação;
- Operação do transformador com uma comutação de elevar tap e baixar a tensão do lado de baixa tensão;
- Operação do transformador com uma comutação de baixar tap e elevar a tensão do lado de baixa tensão.

7.3.1 Processo de Comutação de Tap

Analisou-se, durante o processo de comutação de tap, o comportamento da tensão e da corrente que circula pelos contatos do comutador de derivação em carga. A modelagem desenvolvida não contemplou o arco que ocorre na interrupção dos contatos, o qual provoca erosão do mesmo e a contaminação do óleo isolante. Com isso, a chave corta a corrente quando a mesma passa por zero de corrente.

Para exemplificar a análise, serão apresentados os comportamentos da tensão e corrente que ocorrem na comutação do tap 05 para tap 06 e do tap 06 para tap 05. Na ligação do enrolamento de alta tensão em estrela. Para as demais comutações e ligações do enrolamento de alta tensão, obteve-se os mesmos comportamentos.

A figura 7.2 mostra o comportamento dos contatos do comutador na simulação desta comutação, mostrando os instantes em que o contato está aberto (0) ou fechado (1), sendo que:

- TP05A – representa o contato na posição de tap 05;
- TR05A – representa o contato com resistor de transição;
- TR06A – representa o contato com resistor de transição;
- TP06A – representa o contato na posição de tap 06.

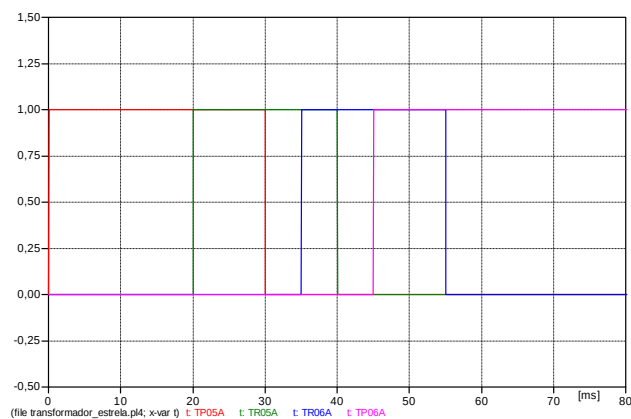


Figura 7.2 – Comportamento dos contatos do comutador de tap.

A figura 7.3 mostra o comportamento da tensão no contato do tap 05. Notando-se que o contato está inicialmente fechado até o tempo de 35 ms de simulação, quando o mesmo abre surgindo uma pequena tensão devido à inserção do resistor de transição do tap 05. A 40 ms de simulação, fecha-se o contato do tap 06 (figura 7.4), com a tensão atingindo 1400 V pico, no tap 05.

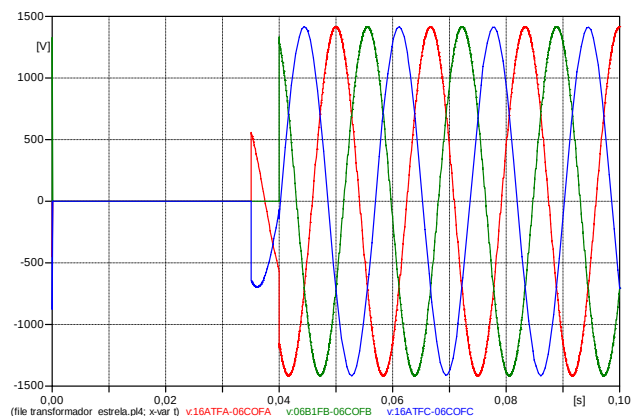


Figura 7.3 – Comportamento da tensão no contato principal do tap 05.

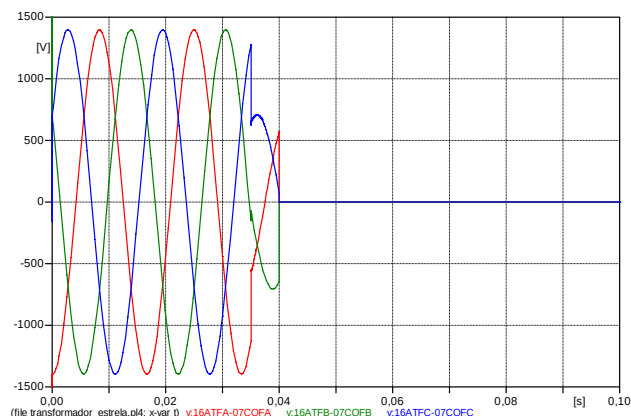


Figura 7.4 – Comportamento da tensão no fechamento do contato principal do tap 06.

Entre o intervalo de tempo de 35 a 40 ms de simulação, a bobina do enrolamento de regulação envolvido na comutação em carga está alimentando os resistores de transição dos dois contatos. Tem-se uma corrente circulante que corresponde ao valor de 130 A de pico, conforme mostram as figuras 7.5 e 7.6.

Nos intervalos 30 a 35 ms e 40 a 45 ms de simulação, em ambas as figuras 7.5 e 7.6, não é visualizado a corrente de magnetização devido ao valor da mesma ser muito menor que a corrente de 130 A de pico, que é visualizada.

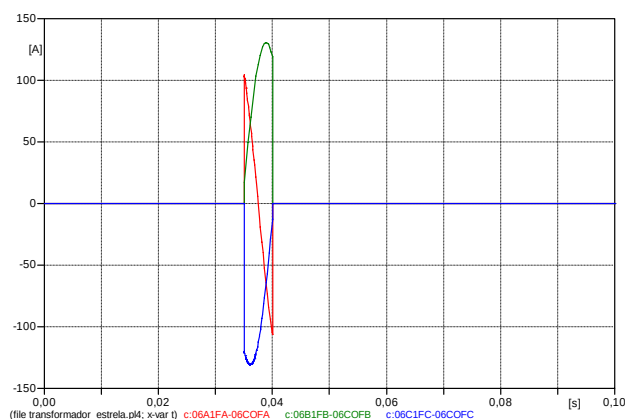


Figura 7.5 – Comportamento da corrente no contato resistor transição do tap 05.

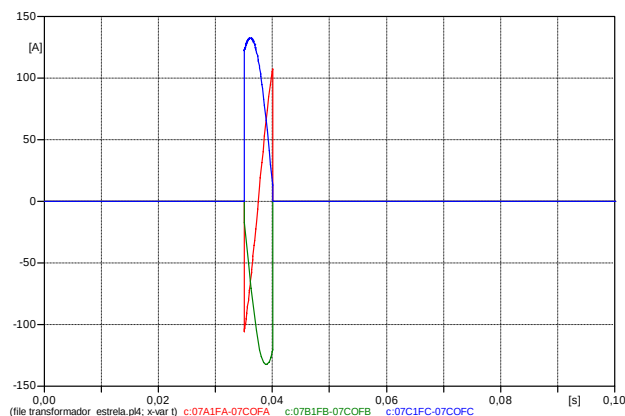


Figura 7.6 – Comportamento da corrente no contato resistor transição do tap 06.

A figura 7.7 mostra o comportamento da tensão no contato do resistor de transição do tap 05. Indicando que o mesmo permanece fechado até o instante de 40 ms de simulação, quando o mesmo abre. Na figura 7.3, este contato na realidade fecha-se a 30 ms de simulação, e no seu gráfico de tensão mostra fechado desde o começo da simulação. A conexão do ponto de medição está em paralelo com o contato principal do tap 05 que está fechado, assim, o nível de tensão é zero volt.

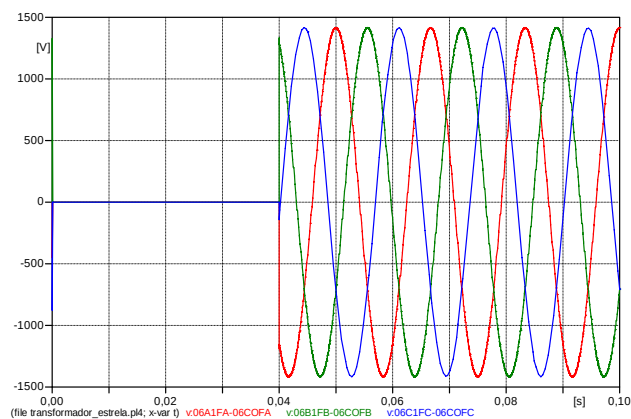


Figura 7.7 – Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 05.

O mesmo fato acontece com o contato do resistor de transição do tap 06, figura 7.8, em sentido contrário ao do tap 05. Inicialmente ele está aberto, mostrando um nível de tensão, fechando-se no instante 35 ms de simulação, e permanecendo fechado por estar sendo medido em paralelo ao contato principal do tap 06.

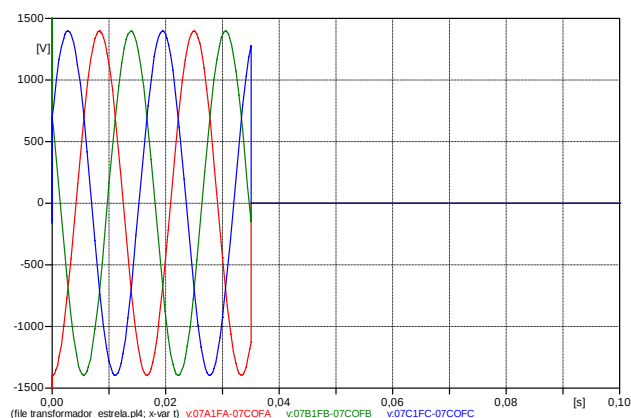


Figura 7.8 – Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 06.

Em relação às correntes nos contatos principais do tap 05 e 06, figuras 7.9 e 7.10, observa-se à existência de corrente de magnetização no tap 05, até sua abertura, a 30 ms de simulação, e a mesma corrente de magnetização a partir de 45 ms de simulação no tap 06. No intervalo de tempo da simulação a corrente circula pelos contatos com resistor de transição.

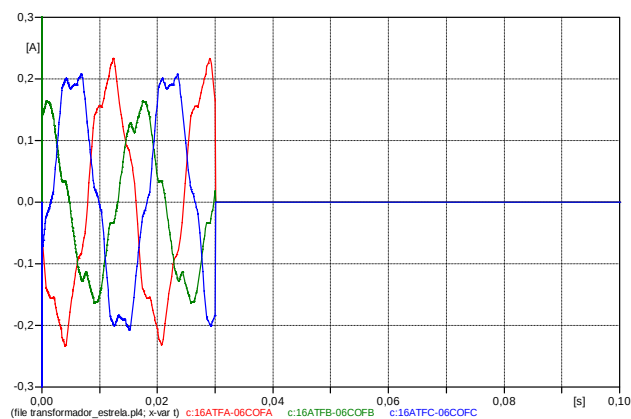


Figura 7.9 – Comportamento da corrente no contato principal do tap 05.

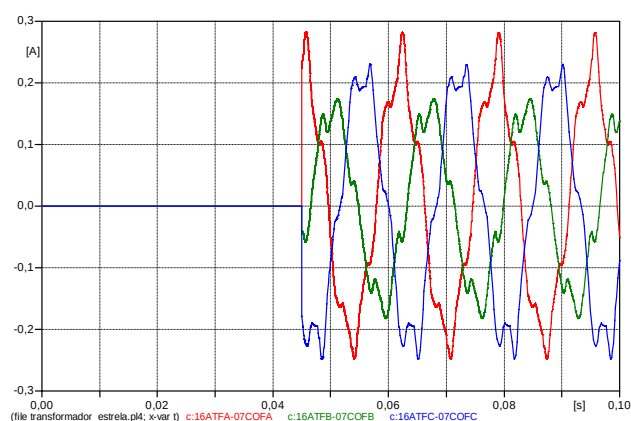


Figura 7.10 – Comportamento da corrente no contato principal do tap 06.

Pode-se observar que, durante o processo de comutação do tap, quando o transformador está operando a vazio, não existe um transitório nas formas de onda da tensão e corrente, que possa contribuir para uma falha do mesmo. Deve-se ter cuidado com relação à corrente no resistor de transição, pois sua eventual queima pode provocar arco elétrico, que contribui para perda das características do meio isolante deste comutador.

7.3.2 Comportamento da Tensão nos Terminais do Transformador

Analisou-se o comportamento da tensão nos terminais do transformador, alta tensão e baixa tensão, buscando encontrar perturbações e flutuação de tensão que ocorram em função da comutação em carga.

A figura 7.11 mostra o comportamento da tensão no terminal de baixa tensão do transformador sem realizar a comutação. Note que não existe variação na tensão com o

transformador operando no tap 05. Em ambas ligações do enrolamento de alta tensão, delta e estrela, tiveram-se o mesmo comportamento.

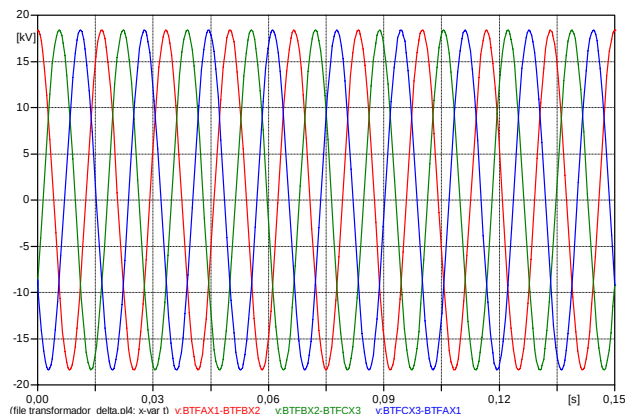


Figura 7.11 – Comportamento da tensão na baixa tensão sem comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

Realizando-se a comutação do tap, elevando-se o tap e baixando-se a tensão ou baixando-se o tap e elevando-se a tensão, não ocorrem grandes perturbações na forma de onda da tensão e a comutação não provoca nenhuma tensão de flutuação excessiva durante o ciclo de chaveamento, conforme mostram as figuras 7.12 e 7.13 (respectivamente para as ligações estrela e delta do enrolamento de alta tensão).

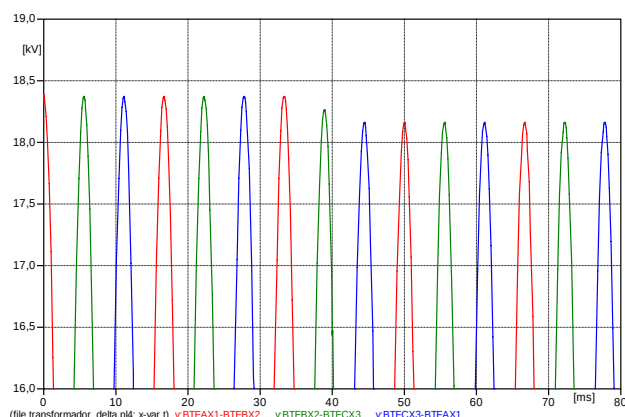


Figura 7.12 – Comportamento da tensão na baixa tensão na comutação de elevar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

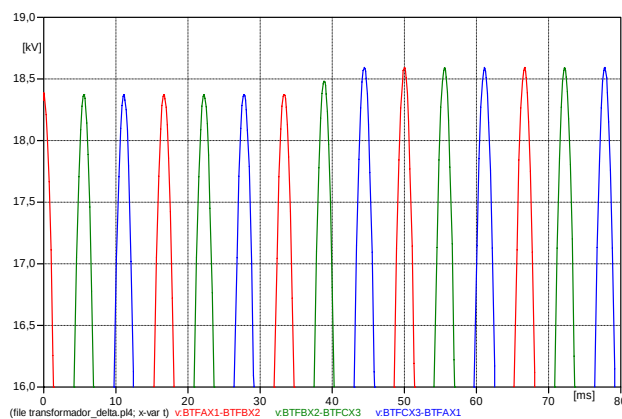


Figura 7.13 – Comportamento da tensão na baixa tensão na comutação de baixar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

Analisando nos pontos de chaveamento do comutador em uma escala de tempo menor,, observa-se que existe uma pequena perturbação na forma de onda da tensão nestes instantes, onde se tem uma corrente circulante nos resistores de transição, como mostram as figuras 7.14 e 7.15.

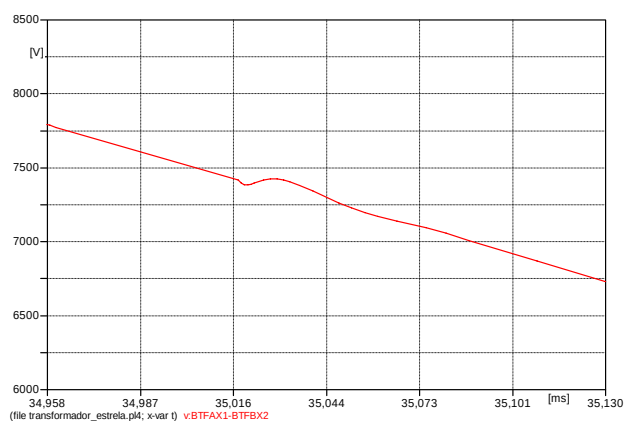


Figura 7.14 – Perturbação na tensão de baixa tensão, comutação de baixar tap, instante $t=35$ ms.

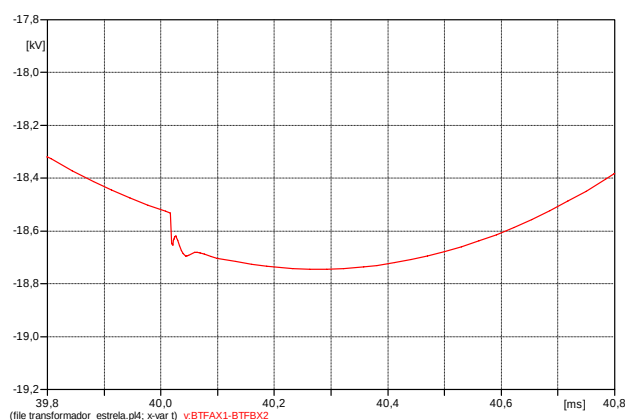


Figura 7.15 – Perturbação na tensão de baixa tensão, comutação de baixar tap, instante $t=40$ ms.

Na comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, quando da mudança de tap 09 para tap 10 ou na mudança de tap 09 para 08, conforme mostra a figura 7.16, tem-se um sinal de alta frequência superposto à forma de onda. Nas demais fases teve-se o mesmo tipo de perturbação, ocorrendo tanto na ligação estrela ou delta do enrolamento de alta tensão.

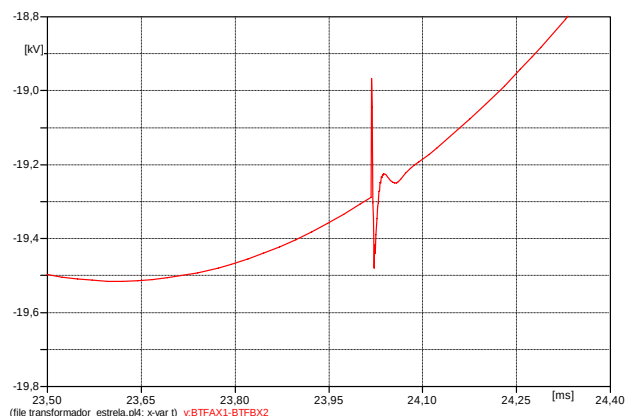


Figura 7.16 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t=24$ ms na comutação da chave seletora.

Esta perturbação ocorre devido à mudança do sentido da corrente no enrolamento de regulação, e conseqüentemente a criação de um fluxo reverso, correspondente ao número de espiras envolvidas em cada tap.

Nos terminais de alta tensão do transformador observa-se uma pequena perturbação na forma de onda da tensão nos instantes de chaveamento, devido a uma corrente circulante nos resistores de transição, conforme mostrado na figura 7.17.

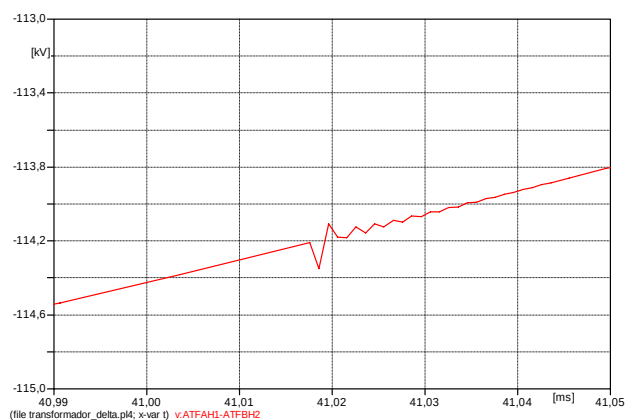


Figura 7.17 – Perturbação na tensão de alta tensão com comutação de tap no instante $t=40$ ms, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.

Na comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, quando da mudança de tap 09 para tap 10 ou na mudança de tapa 09 para 08, conforme mostra a figura 7.18, obteve-se um sinal de alta frequência devido ao mesmo impacto encontrado na figura 7.17. Nas demais fases teve-se o mesmo tipo de perturbação. Essas perturbações ocorrem na ligação delta do enrolamento de alta tensão. Na ligação estrela ocorreu somente a oscilação da comutação da chave seletora.

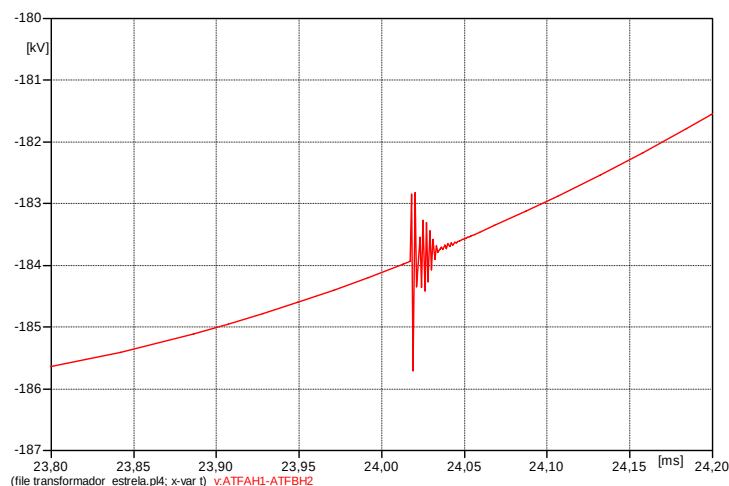


Figura 7.18 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t=24$ ms na comutação da chave seletora.

Realizando uma análise comparativa das tensões nos terminais do transformador, conclui-se que se tem maior impacto do lado de alta do que no lado de baixa tensão do transformador. O impacto na tensão do lado de baixa do transformador é amenizado devido à função de transferência existente entre o enrolamento de alta tensão, núcleo e enrolamento de baixa tensão, isto é, onde se tem força magnetomotriz, fluxo magnético e força eletromotriz, respectivamente.

Nos terminais de alta tensão do transformador não houve flutuação de tensão durante o processo de comutação do comutador.

7.3.3 Comportamento das Correntes no Transformador

Analisou-se o comportamento da corrente que circulam pelo transformador e sua composição harmônica, pois na operação em vazio do transformador tem-se somente a corrente de magnetização.

Pode-se observar, conforme mostra a figura 7.19, que esta corrente tem uma forma de onda não senoidal, imposta pela não linearidade do circuito magnético, observado nos dois tipos de ligação do enrolamento de alta tensão.

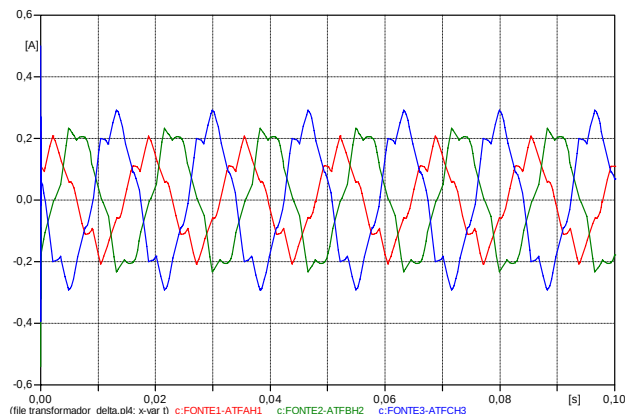


Figura 7.19 – Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

Essa corrente de magnetização, a partir do instante onde se inicia o processo de comutação, elevando-se ou baixando-se o tap, apresenta um transitório que tem a duração referente ao processo de inserção e desinserção do resistor de transição, que permite a comutação em carga do transformador. Com a inserção deste resistor há um aumento no valor da componente resistiva do enrolamento de alta tensão do transformador, e conseqüentemente na impedância do sistema, contribuindo com a existência deste transitório, conforme mostra a figura 7.20. Neste instante, o enrolamento é uma força eletromotriz para uma carga, que são os resistores de transição.

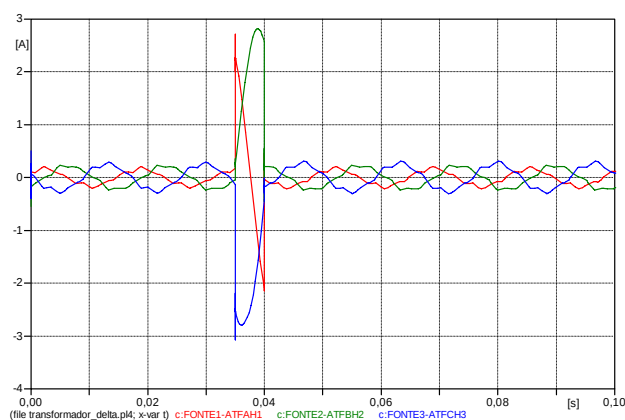


Figura 7.20 – Comportamento da corrente de magnetização com comutação de baixar tap.

Após a comutação do tap, existe um aumento ou diminuição da corrente de magnetização, em relação ao instante anterior à comutação, conforme o sentido que a comutação é realizada. Isto é, baixando-se ou elevando-se o tap, permanecendo neste novo nível de corrente até o final da simulação.

A figura 7.20 mostra que antes e após a comutação de tap, a composição da forma de onda da corrente de magnetização e suas ordens harmônicas são similares e proporcionais. No instante da comutação de tap há um comportamento diferenciado que será detalhado no item 7.3.3.1.

A comutação do tap 09 para o tap 10 ou a comutação do tap 09 para o tap 08, além do transitório comentado anteriormente (quando da inserção e desinserção do resistor de transição), apresenta uma outra perturbação, que surge em função da comutação da chave seletora. Apesar disto não ocorrer em carga. Essa perturbação provoca a variação da corrente de magnetização, invertendo o sentido da corrente neste enrolamento. Conseqüentemente isso altera o valor da impedância do sistema, criando um fluxo em sentido contrário ao dos demais enrolamentos, conforme mostra a figura 7.21.

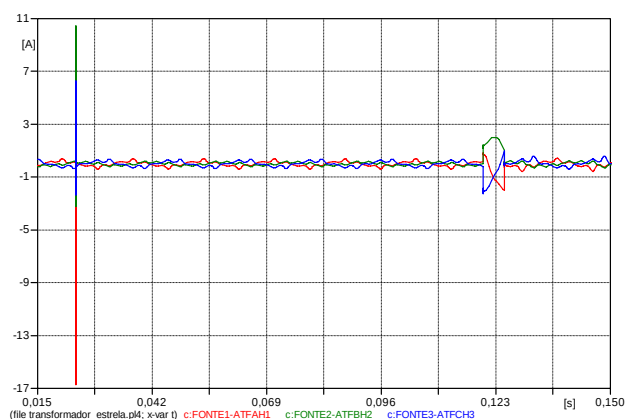


Figura 7.21 – Comportamento da corrente de magnetização com comutação do tap 09 para tap 10.

Conclui-se que na operação em vazio do transformador quando se tem a comutação do tap, sempre haverá um transitório na corrente de magnetização, que interferirá na corrente que circula no enrolamento terciário, o qual será detalhado no item 7.3.3.2.

7.3.3.1 Corrente de Magnetização

Através dos resultados obtidos, analisou-se o comportamento da corrente que circula pelo transformador e sua composição harmônica. Na operação em vazio do transformador temos somente a sua corrente de magnetização do mesmo, que decomposta pela série de Fourier, apresenta componentes de ordem 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, etc. As harmônicas mais significativas são as de ordem 3, 5 e 7 em ambas as ligações do enrolamento de alta tensão, estrela e delta, conforme encontra-se na literatura [14].

A primeira análise realizada é na operação do transformador regulador, na tensão de 84 kV. Neste nível de tensão o transformador possui seus enrolamentos com as seguintes ligações:

- Enrolamento de alta tensão ligado em delta;
- Enrolamento de baixa tensão ligado em estrela aterrado;
- Enrolamento terciário ligado em delta aberto e aterrado em um único terminal.

Nesta operação sem a comutação do tap, notou-se um aumento gradativo da corrente de magnetização, mantendo-se constante o nível de tensão de alimentação do transformador em cada posição de tap. Esse aumento está na ordem de 1280,4% na corrente, em relação ao tap 17 com o tap 01, conforme mostra a figura 7.22.

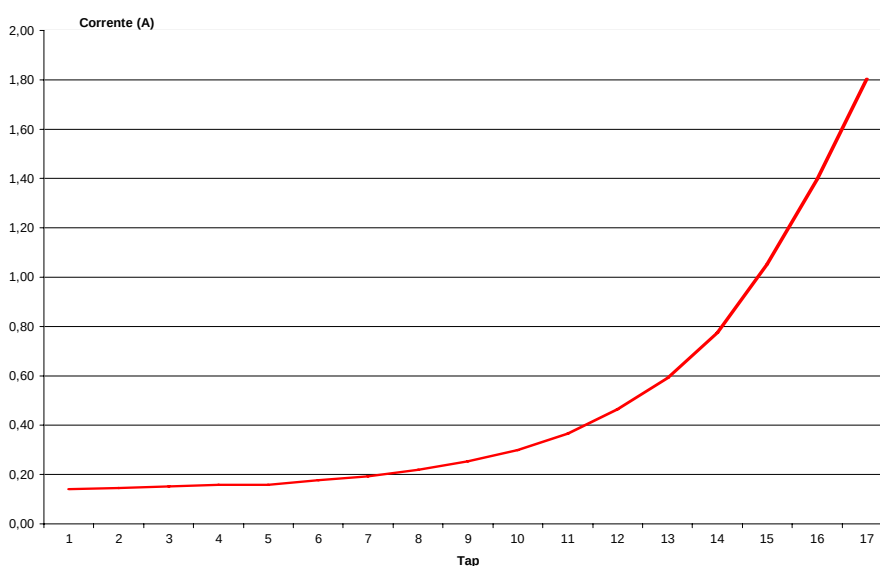


Figura 7.22 – Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap.

O aumento desta corrente está relacionado com o número de espiras envolvidas no enrolamento de alta tensão. O número de espiras diminuiu em cada tap, diminuindo a relação de transformação. Portanto, isso causará uma maior tensão no enrolamento de baixa tensão do transformador. Mantendo-se constante a tensão de alimentação, tem-se um fluxo magnético maior e, portanto, uma indução magnética maior. Assim, ter-se-á tensão maior nos terminais de baixa tensão.

Em relação às componentes harmônicas da corrente de magnetização, as mais significativas são de ordem 3, 5, 7, 9, 13, 17, 19 etc, conforme mostra a figura 7.23. Estas correntes se mantêm numa mesma proporção de composição em cada tap. Observa-se também que o aumento da corrente de magnetização em cada tap, aumentou também a Taxa de Distorção Harmônica (THD), conforme é mostrado na figura 7.24.

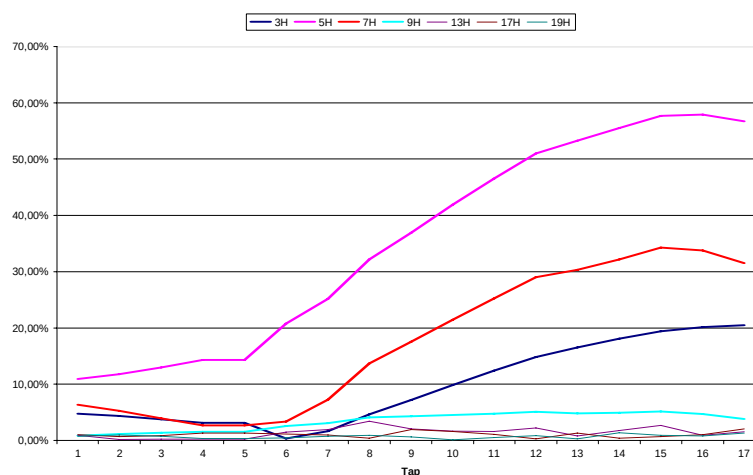


Figura 7.23 – Comportamento das harmônicas da corrente de magnetização sem comutação de tap.

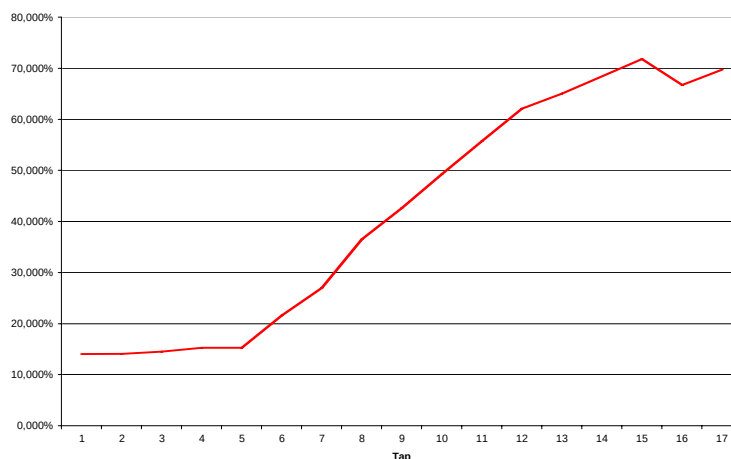


Figura 7.24 – Comportamento da THD corrente de magnetização sem comutação de tap.

As harmônicas de ordem 5 e 7, possuem comportamentos semelhantes às correntes de sequência negativa e positiva, respectivamente, não dependendo de retorno pela terra. Isto se confirma, pois como o enrolamento de alta tensão está ligado em delta, este nível de ordem harmônica teve valores bem mais significativos que os da harmônica de ordem 3, a qual possui comportamento semelhante as correntes de sequência zero (que fica retida dentro do enrolamento de alta tensão que está com ligação em delta).

Com a comutação do tap, elevando e ou baixando o mesmo, analisou-se a janela de tempo da comutação que corresponde a um período referente a 1 ciclo de simulação. Notou-se o mesmo aumento gradativo da corrente de magnetização, mantendo-se constante o nível de tensão de alimentação do transformador em cada posição de tap, conforme mostra a figura 7.25. Os valores de corrente nesta figura são comparados com os valores da corrente do tap antes da comutação. Observa-se que a corrente de magnetização no processo de comutação possui um valor maior do que a corrente de magnetização operando no tap.

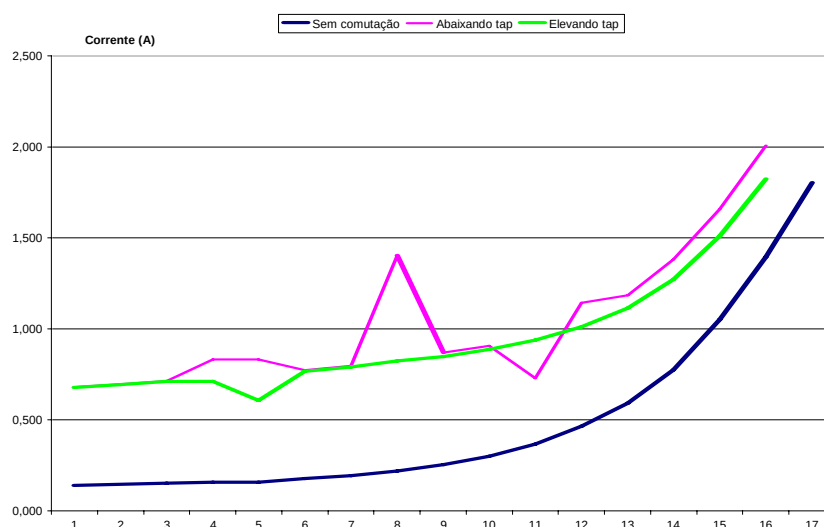


Figura 7.25 – Comportamento da corrente de magnetização sem e com comutação de tap.

Analisando as ordens harmônicas nesta janela de tempo de comutação, nota-se um aumento considerável das ordens harmônicas da corrente de magnetização do transformador, conforme mostram as figuras 7.26 e 7.27. As ordens harmônicas 3, 5 e 7, analisadas anteriormente, sem a

comutação continuam predominantes, e apresentam valores maiores, como esperado. Contudo, neste intervalo de estudo surgiu a corrente de 2ª ordem harmônica, como valor predominante em relação as demais ordens harmônicas, devido à assimetria da componente DC em função da comutação e alteração da indutância do transformador.

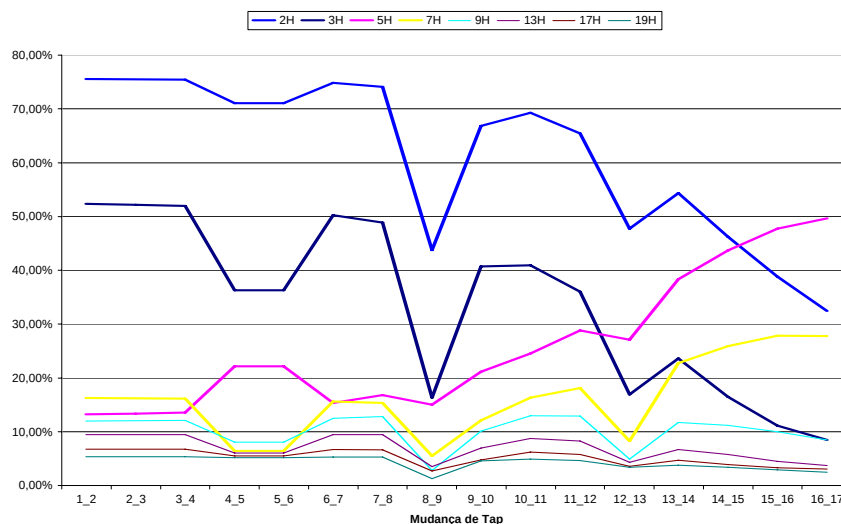


Figura 7.26 – Comportamento das ordens harmônicas da corrente de magnetização em comutação de baixar tap.

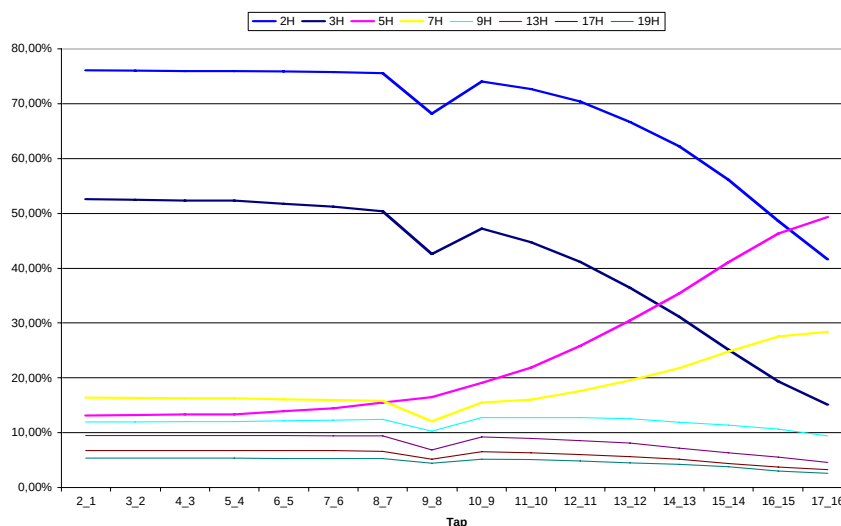


Figura 7.27 – Comportamento das ordens harmônicas da corrente de magnetização em comutação de elevar tap.

A segunda análise realizada é na operação do transformador regulador na tensão de 131,6 kV. Neste nível de tensão o transformador possui seus enrolamentos com as seguintes ligações:

- Enrolamento de alta tensão ligado em estrela isolado;
- Enrolamento de baixa tensão ligado em estrela aterrado;
- Enrolamento terciário ligado em delta fechado e aterrado em um único terminal.

Na operação do transformador sem a comutação do tap notou-se também o mesmo comportamento da ligação do enrolamento de alta tensão em delta, com um aumento gradativo da corrente de magnetização, mantendo-se constante o nível de tensão de alimentação do transformador em cada posição de tap. Esse aumento está na ordem de 2172,33% na corrente, em relação ao tap 17 com o tap 01.

Como as conexões do comutador são nos mesmos pontos elétricos, quando o transformador está com o enrolamento de alta tensão ligado em delta, o aumento desta corrente está relacionado com a diminuição do número de espiras envolvidas no enrolamento de alta tensão. O número de espiras diminuiu em cada tap, diminuindo a relação de transformação, causando uma maior tensão no enrolamento de baixa tensão do transformador. Mantendo-se constante a tensão de alimentação, tem-se um fluxo magnético maior e, portanto, uma indução magnética maior. Isso causará uma tensão maior nos terminais de baixa tensão.

As principais componentes harmônicas da corrente de magnetização são as de ordem 3, 5, 7, 9, 13, 17, 19 etc, mantendo-se numa mesma proporção de composição em cada tap. Observa-se também que à medida que ocorre um aumento da corrente de magnetização em cada tap, aumenta-se a Taxa de Distorção Harmônica (THD).

Pode-se observar através da figura 7.28, que esta similaridade de desempenho do transformador para ambas as ligações, difere somente na questão do valor da corrente de magnetização. A ligação do enrolamento em delta possui uma corrente de magnetização maior do

que na ligação do enrolamento em estrela isolado, pois o primeiro necessita de maior número de espiras para gerar o mesmo fluxo magnético.

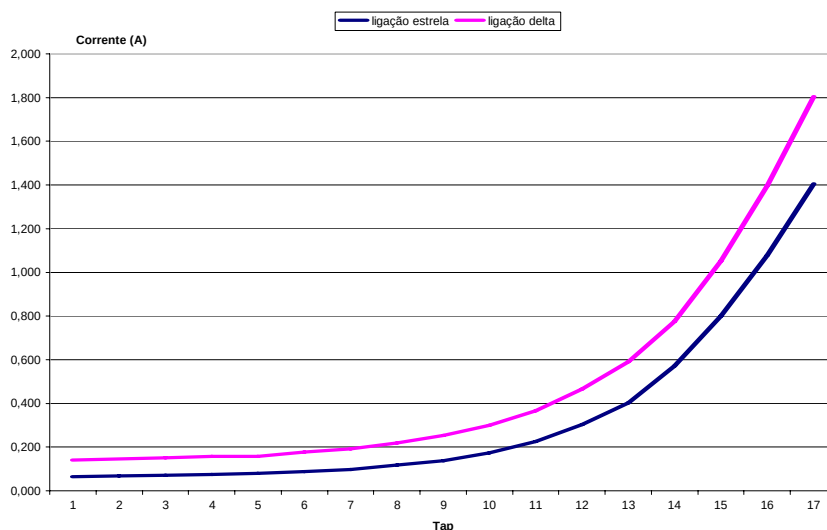


Figura 7.28 – Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap.

Algumas condições operativas do sistema elétrico apresentam uma faixa de tensão maior que a tensão nominal simulada, mas dentro do limite de tensão até 146 kV e 92 kV. Realizou-se, simulação do sistema para esta condição operativa e comparou-se os resultados.

A figura 7.29 mostra o comportamento da corrente de magnetização, na condição de “sem comutação” e com vários níveis de tensão de alimentação. Verifica-se um aumento da corrente de magnetização com o aumento da tensão de alimentação nas ligações do transformador (estrela e delta).

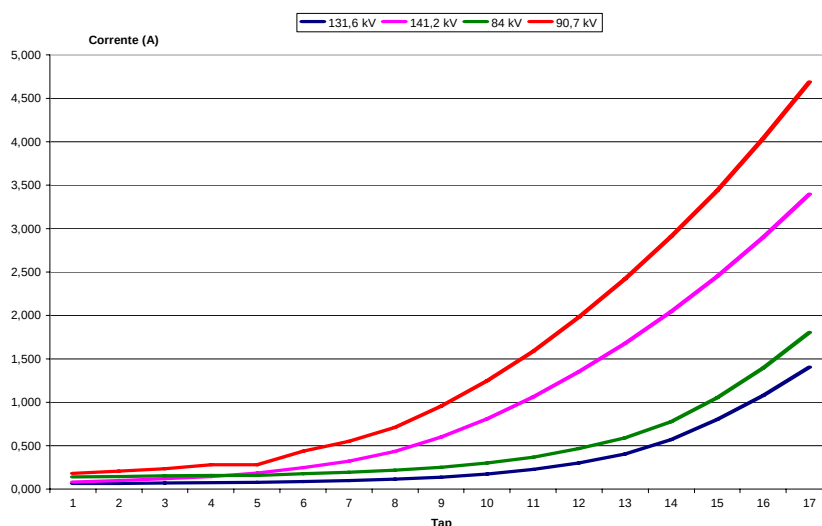


Figura 7.29 – Comportamento da corrente de magnetização sem comutação de tap.

A figura 7.30 mostra o comportamento da corrente harmônica de ordem 5, que é a ordem harmônica mais significativa sem a comutação. Observa-se que esta corrente tem o mesmo comportamento para ambas as ligações do transformador. Isto é, tem-se um valor maior em função do aumento da tensão de alimentação e um valor maior próximo do tap central. Nos demais taps há uma diminuição no valor desta corrente.

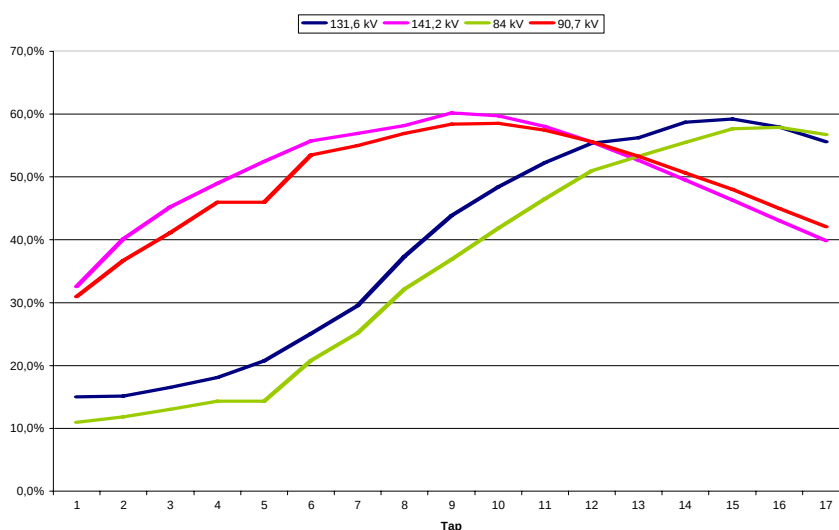


Figura 7.30 – Comportamento da corrente harmônica de ordem 5 sem comutação de tap.

7.3.3.2 Corrente no Enrolamento Terciário

Na análise do comportamento da corrente que circula no enrolamento terciário do transformador, foi observado que, quando se tem a comutação do tap com a inserção e a desinserção do resistor de transição (que permite a comutação em carga do transformador), ocorre perturbação momentânea na corrente que circula pelo enrolamento, conforme mostra a figura 7.31.

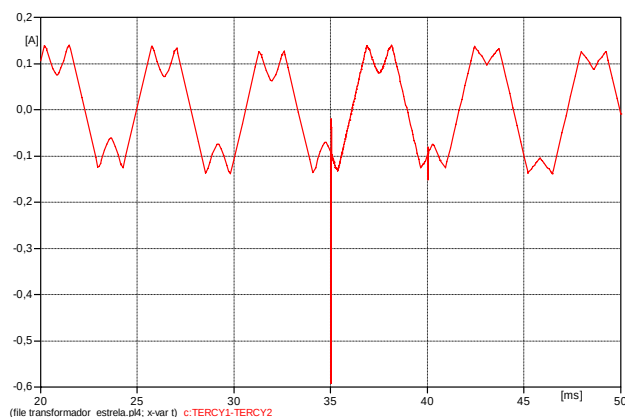


Figura 7.31 – Comportamento corrente no enrolamento terciário com comutação de tap.

Esta perturbação tem um impacto maior na inserção do que na desinserção do resistor de transição. Note que na inserção, figura 7.32, o valor de pico alcança 210 mA e na desinserção, figura 7.33, o valor de pico alcança 96 mA. Isto ocorre em função da variação da corrente de magnetização do transformador, quando tem-se a bobina do enrolamento de regulação da alta tensão alimentando os resistores de transição dos taps envolvidos.

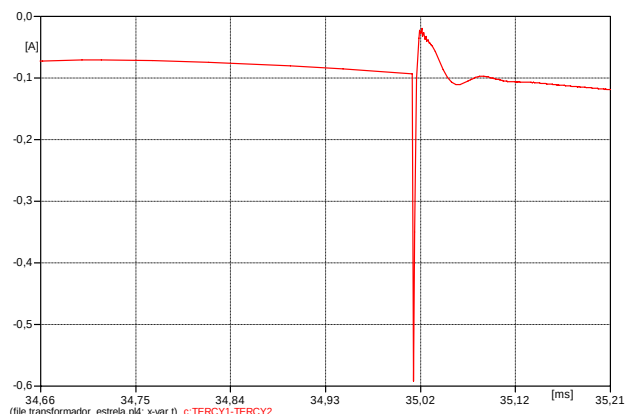


Figura 7.32 – Detalhe da primeira perturbação na corrente no enrolamento terciário com a comutação de tap referente à figura 7.31.

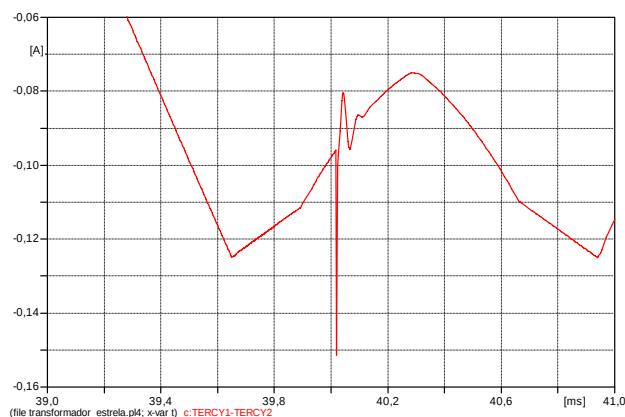


Figura 7.33 – Detalhe da segunda perturbação na corrente no enrolamento terciário com a comutação de tap referente à figura 7.31.

Através das figuras 7.34 e 7.35, conclui-se que a composição da ordem harmônica da corrente que circula no enrolamento terciário, tem comportamento semelhante à corrente de seqüência zero, apresentando as ordens harmônicas 3, 9 etc. Note que o valor da corrente na ordem fundamental é praticamente zero, e as componente de 3ª ordem são de maior impacto, tendo um valor muito semelhante e independente se o transformador está comutando (elevando ou baixando o tap), ou operando sem comutar.

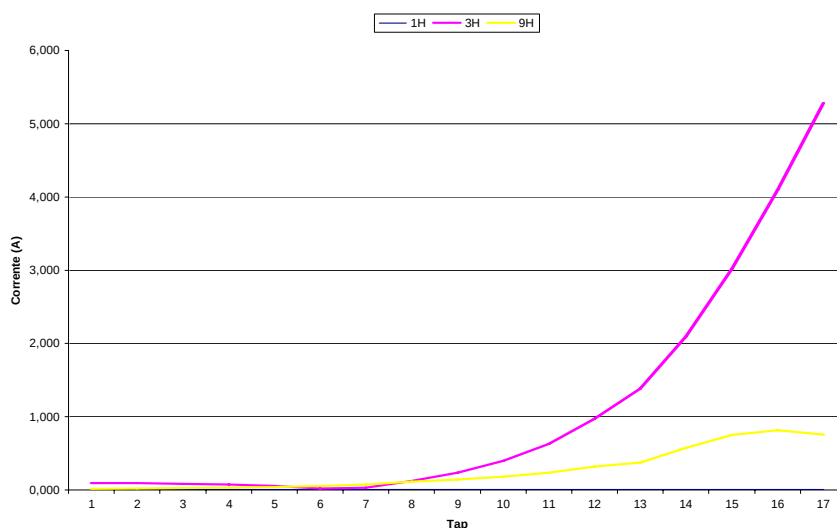


Figura 7.34 – Comportamento das correntes de ordem harmônica no enrolamento terciário sem a comutação de tap.

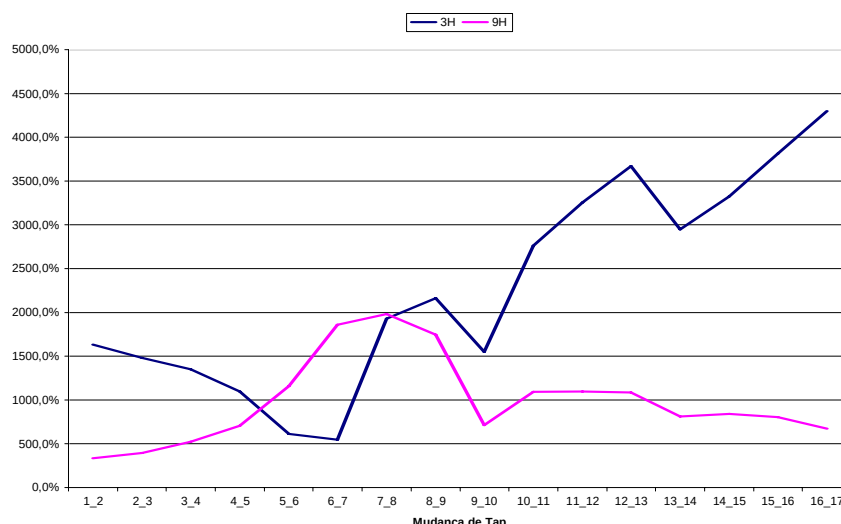


Figura 7.35 – Comportamento das ordens harmônicas da corrente de magnetização em comutação de elevar ou baixar tap.

7.4 Operação em Carga do Transformador

Após a realização das simulações da operação em carga do transformador regulador operando na tensão de 84 kV e 131,6 kV, isto é, transformador com seu enrolamento de alta tensão ligado em delta e estrela respectivamente, pode-se analisar o desempenho do modelo do transformador regulador nas seguintes condições operativas:

- Operação do transformador sem comutação;
- Operação do transformador com uma comutação de elevar tap e baixar a tensão do lado de baixa tensão;
- Operação do transformador com uma comutação de baixar tap e elevar a tensão do lado de baixa tensão.

7.4.1 Processo de Comutação de Tap

Analisou-se no processo de comutação de tap o comportamento da tensão e da corrente, que circula pelos contatos do comutador de derivação em carga. A modelagem desenvolvida não contemplou o arco que ocorre na interrupção dos contatos, o qual provoca erosão do mesmo e a contaminação do óleo isolante. Para exemplificar a análise do desempenho do comutador, será mostrado o comportamento da tensão e corrente, que ocorre na comutação do tap 05 para tap 06 e na

comutação do tap 06 para tap 05, na ligação do enrolamento de alta tensão em estrela. Para as demais comutações e ligações do enrolamento de alta tensão, teve-se o mesmo comportamento.

O comportamento dos contatos do comutador na simulação desta comutação é o mesmo mostrado na figura 7.2, na simulação em operação em vazio do transformador.

A figura 7.36 mostra o comportamento da tensão no contato referente ao tap 05. Observa-se um comportamento similar à operação em vazio do transformador. O contato está inicialmente fechado até o tempo de 35 ms de simulação, quando o mesmo abre surgindo uma pequena tensão. A 45 ms de simulação, quando se abre o contato referente ao resistor de transição do tap 06, a tensão chega a 1400 V de pico, conforme mostra a figura 7.37. A diferença entre a operação em carga e em vazio é que, em carga, a partir do instante da inserção do resistor de transição, referente ao tap 05, surge uma pequena tensão devido à corrente que circula pelo mesmo e assim aumenta gradativamente, conforme se realiza os passos da comutação até chegar na tensão plena, na desinserção do resistor de transição do tap 06.

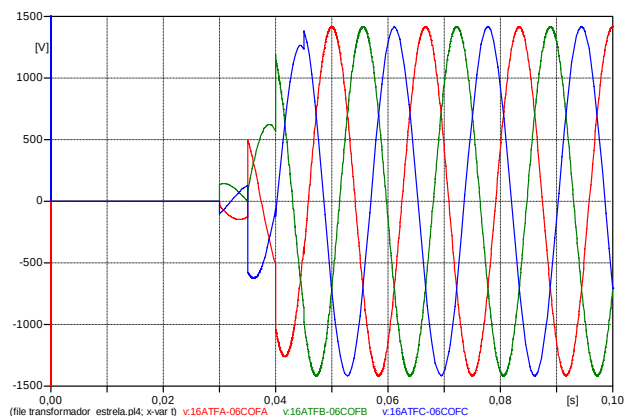


Figura 7.36 – Comportamento da tensão no contato principal do tap 05.

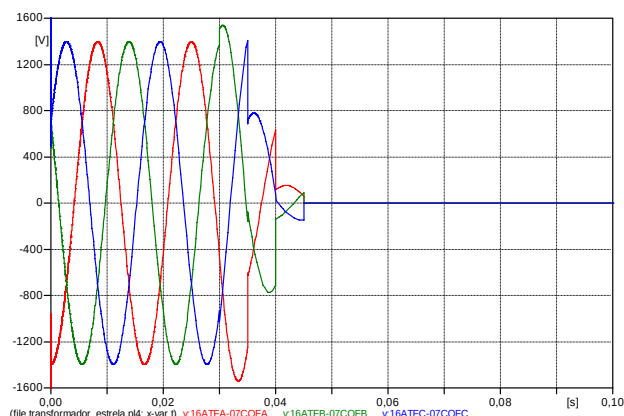


Figura 7.37 – Comportamento da tensão no contato principal do tap 06.

A figura 7.38 mostra o comportamento da tensão no contato referente ao resistor de transição do tap 05. Nota-se que o mesmo permanece fechado até o instante de 40 ms de simulação, quando o mesmo se abre. Tem-se o mesmo comportamento da operação em vazio, com a diferença de que a tensão sobe gradativamente, devido à variação da energia armazenada na indutância do enrolamento de regulação, por estar em carga. Na figura 7.38, observa-se que este contato, na realidade, fecha-se a 30 ms de simulação, e no seu gráfico de tensão apresenta-se fechado desde o começo da simulação. Acontece que o ponto de medição é em paralelo com o contato principal do tap 05 que está fechado. Com isso o nível de tensão é zero volts. O mesmo fato acontece com o contato do resistor de transição do tap 06, figura 7.39. Em sentido contrário ao do tap 05, inicialmente ele está aberto mostrando um nível de tensão, fechando-se no instante 35 ms de simulação e permanecendo fechado por estar sendo medido em paralelo ao contato principal do tap 06. Neste caso existe também uma mudança de energia devido à variação de corrente imposta pela força eletromotriz da respectiva bobina do enrolamento de regulação envolvida.

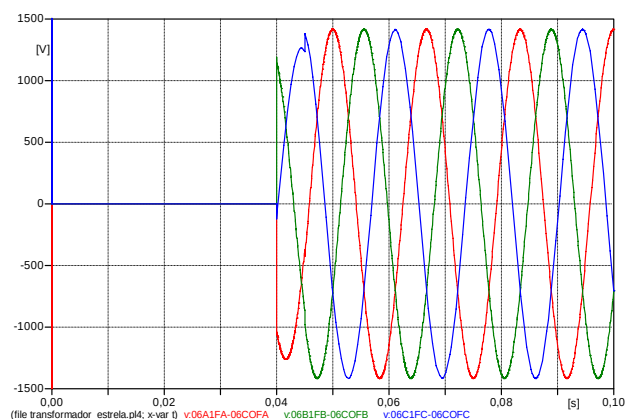


Figura 7.38 – Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 05.

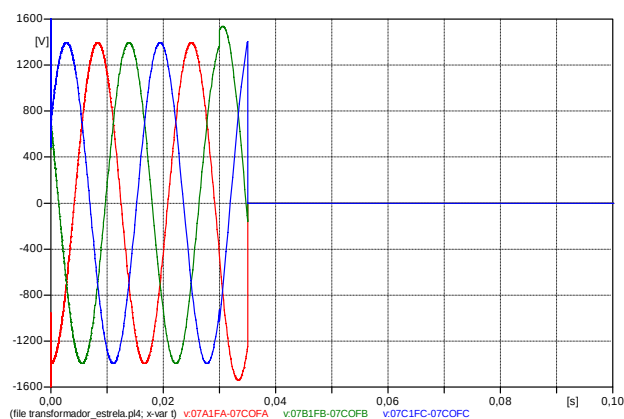


Figura 7.39 – Comportamento da tensão no contato com resistor de transição do tap 06.

Com relação às correntes nos contatos principais, figuras 7.40 e 7.41, existe corrente de carga no tap 05 até sua abertura a 30 ms de simulação e a mesma corrente de carga a partir de 45 ms de simulação no tap 06.

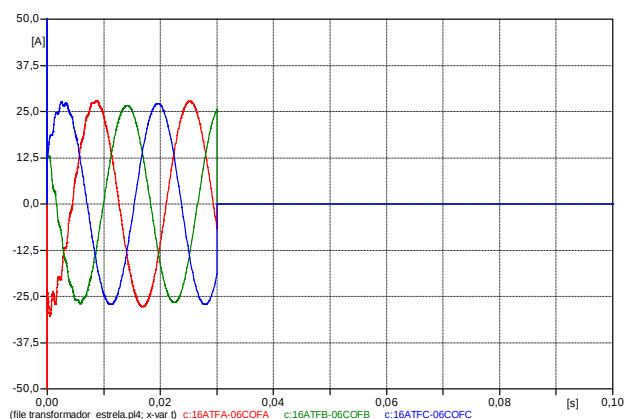


Figura 7.40 – Comportamento da corrente no contato principal do tap 05.

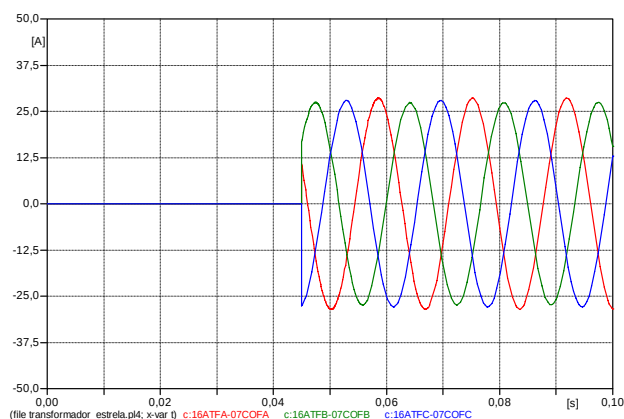


Figura 7.41 – Comportamento da corrente no contato principal do tap 06.

No intervalo de tempo da simulação de 30 a 45 ms, a corrente circula pelos contatos com resistor de transição, figura 7.42 e 7.43. Nota-se que se tem o mesmo comportamento quando da

simulação da operação em vazio, isto é, no intervalo 30 a 35 ms e 40 a 45 ms de simulação. Em ambas as figuras, tem-se a corrente de carga circulando pelo contato. No intervalo de 35 a 40 ms de simulação, além da corrente de carga, há uma corrente que circula entre os resistores de transição, a qual é imposta pela força eletromotriz da bobina existente entre o tap 05 e 06 do enrolamento de regulação. A corrente no resistor de transição do tap 06 é um pouco maior do que a corrente no resistor de transição do tap 05, pelo fato da bobina do tap 06 estar em tensão e mudar sua condição para carga, onde se tem força contra-eletromotriz, que é um produto da indutância do enrolamento e a taxa de variação de corrente.

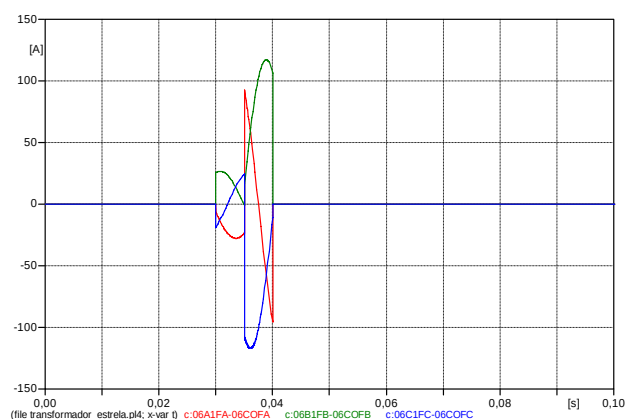


Figura 7.42 – Comportamento da corrente no contato resistor de transição do tap 05.

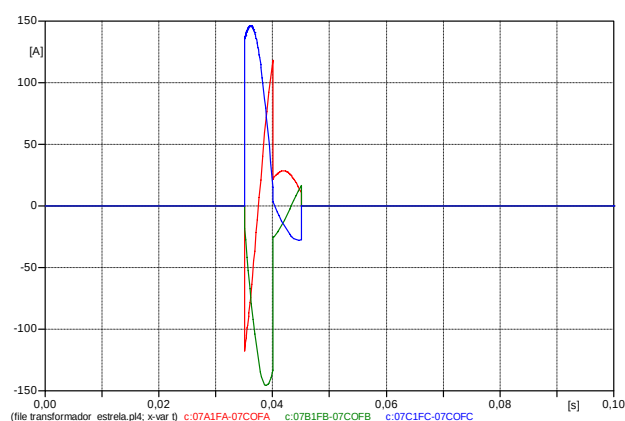


Figura 7.43 – Comportamento da corrente no contato resistor transição do tap 06.

7.4.2 Comportamento da Tensão nos Terminais do Transformador

Analisou-se o comportamento da tensão nos terminais do transformador, do lado de alta tensão e baixa tensão, buscando encontrar perturbações ou flutuação de tensão que ocorra em função da comutação em carga.

A figura 7.44 mostra o comportamento da tensão no terminal de baixa tensão do transformador, sem realizar a comutação em carga. Note que não existe variação na tensão, tendo o mesmo comportamento quando da simulação da operação em vazio.

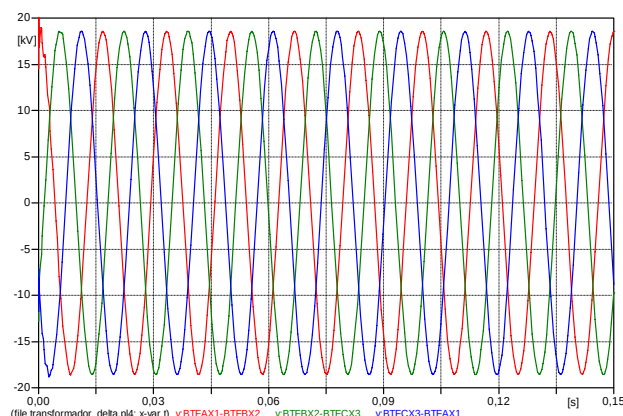


Figura 7.44 – Comportamento da tensão na baixa tensão sem comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

Realizando-se a comutação do tap, elevando-se o tap e baixando-se a tensão ou baixando-se o tap e elevando-se a tensão, não ocorrem grandes perturbações na forma de onda da tensão e a comutação não provoca nenhuma tensão de flutuação excessiva durante o ciclo de chaveamento, conforme mostram as figuras 7.45 e 7.46.

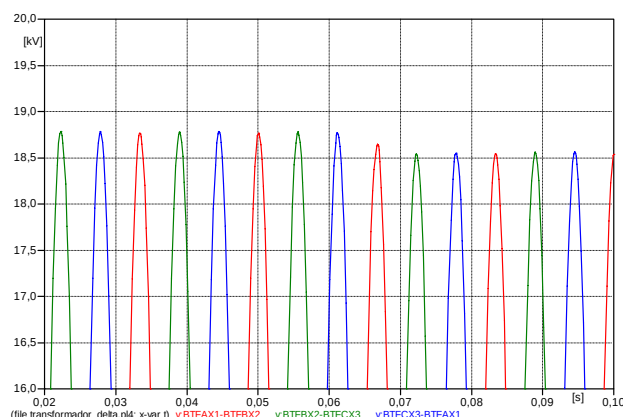


Figura 7.45 – Comportamento da tensão na comutação de elevar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

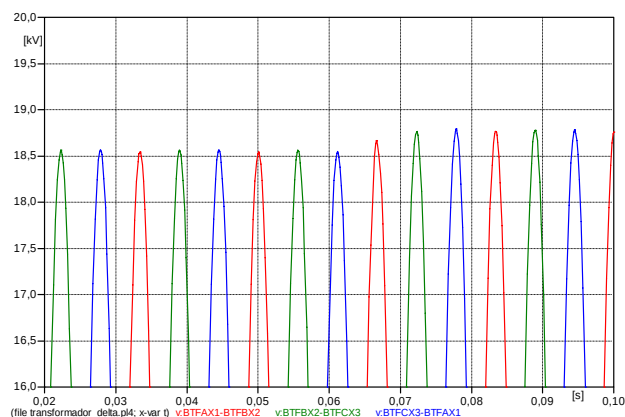


Figura 7.46 – Comportamento da tensão na comutação de baixar tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em delta.

Diferentemente da simulação em vazio do transformador, ocorrem pequenas perturbações na forma de onda da tensão, nos instantes de chaveamento da inserção e desinserção do resistor de transição, como mostrado na figura 7.47. Tem-se uma perturbação na forma de onda na abertura do contato do tap 05 e no fechamento do tap 06, gerando um sinal de alta frequência superposta à forma de onda.

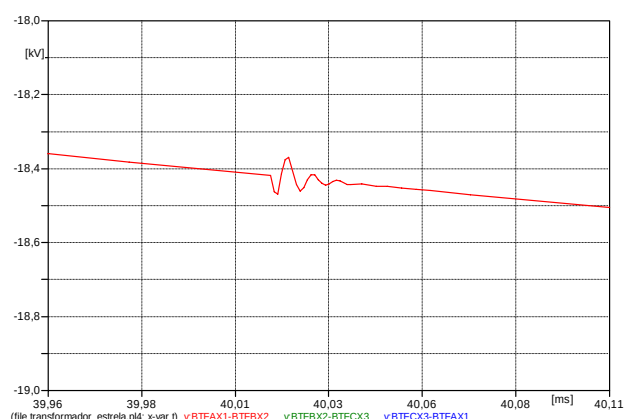


Figura 7.47 – Perturbação na tensão de baixa tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.

Na comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, quando da mudança de tap 09 para tap 10 ou na mudança de tapa 09 para 08, ocorre também uma pequena perturbação na forma de onda gerando um sinal de alta frequência superposta, conforme mostra a figura 7.48. As demais fases tiveram o mesmo tipo de perturbação. As mesmas ocorrem tanto na ligação estrela ou delta do enrolamento de alta tensão.

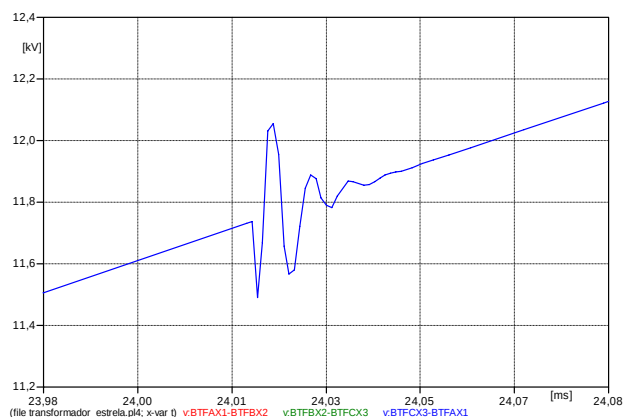


Figura 7.48 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t=24$ ms na comutação da chave seletora.

Nos terminais de alta tensão do transformador apresentou-se o mesmo comportamento da simulação a vazio: uma pequena perturbação na forma de onda da tensão nos instantes de inserção do resistor de transição do tap 05 e uma perturbação na forma de onda gerando, um sinal de alta frequência de impacto menor na desinserção do resistor de transição do tap 06 como mostrado na figura 7.49. Na comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, quando da mudança de tap 09 para tap 10 ou na mudança de tapa 09 para 08, ocorreu uma perturbação na forma de onda gerando um sinal de alta frequência acoplado, conforme mostra a figura 7.50.

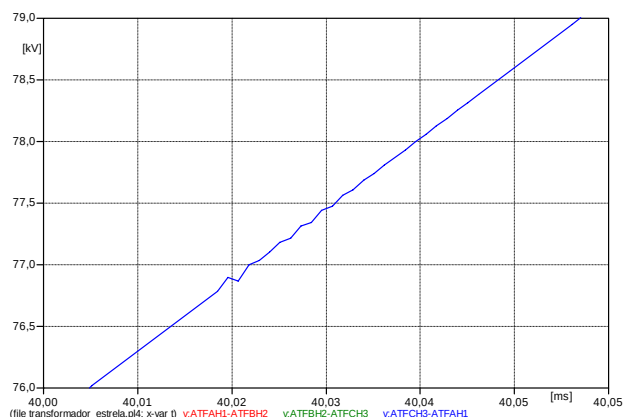


Figura 7.49 – Comportamento da tensão de alta tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.

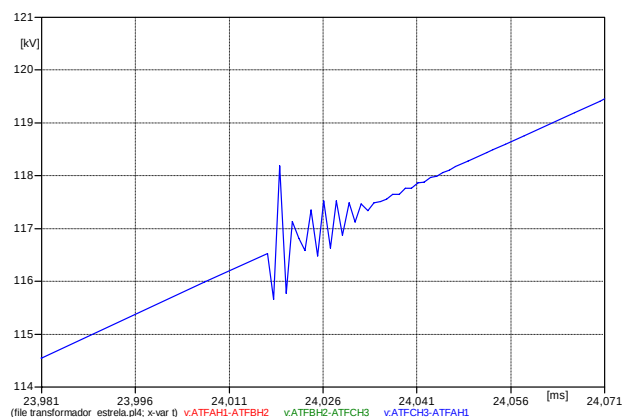


Figura 7.50 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t=24$ ms na comutação da chave seletora.

Nos terminais de alta tensão do transformador não ocorreu flutuação de tensão durante o processo de comutação do comutador do tap.

Analisando o comportamento da tensão nas cargas, notou-se que as perturbações encontradas nos terminais de baixa tensão do transformador propagou-se através da rede elétrica sendo minimizada seu efeito, quando eletricamente encontra-se um banco de capacitor instalado na rede de distribuição.

7.4.2 Comportamento das Correntes no Transformador

Analisou-se o comportamento da corrente de carga que circula no transformador e a corrente que circula no enrolamento terciário.

7.4.3.1 Corrente de Carga

O comportamento da corrente de carga que circula no transformador na alta tensão é mostrado na figura 7.51. Observa-se que se tem algumas perturbações na forma de onda provocadas pelo processo de comutação de tap.

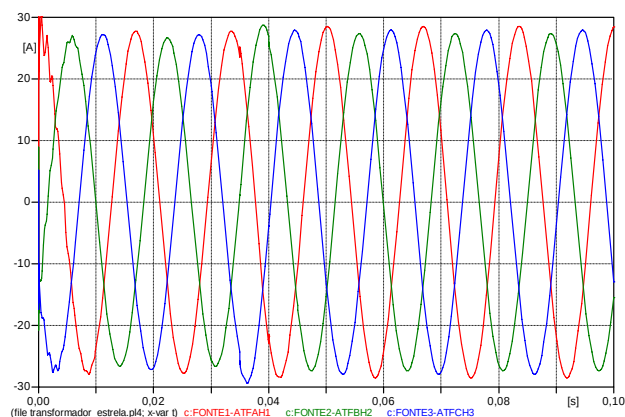


Figura 7.51 – Comportamento da corrente nos terminais de alta tensão.

O impacto destas perturbações é detalhado na figura 7.52. Note que as perturbações nos instantes de $t = 30$ ms e $t = 45$ ms, onde se tem a abertura do contato principal do tap 05 e o fechamento do contato principal do tap 06, respectivamente, são pequenas se comparados com as perturbações que ocorrem nos instantes $t = 35$ ms e $t = 40$ ms. Nestes instantes tem-se perturbação na amplitude, devido ao fato de ter-se, nestes instantes, uma bobina do enrolamento de regulação alimentando os dois resistores de transição dos taps 05 e 06. No instante $t = 35$ ms ocorre a inserção do resistor de transição no tap 06 e no instante $t = 40$ ms a desinserção do mesmo no tap 05.

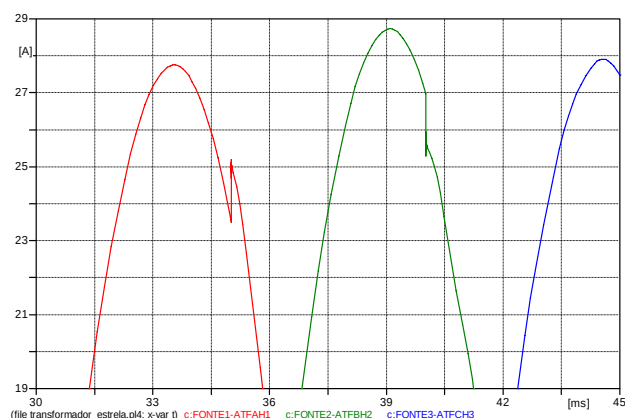


Figura 7.52 – Perturbação na corrente de alta tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.

Na figura 7.53 tem-se a comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, quando da mudança de tap 09 para tap 10 ou na mudança de tapa 09 para 08, obteve-se uma perturbação na forma de onda gerando um sinal de alta frequência acoplado.

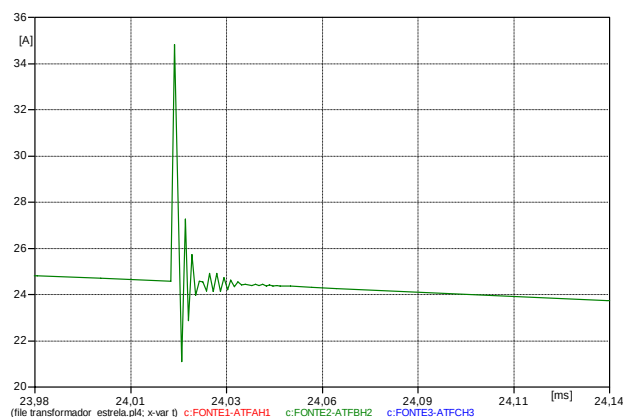


Figura 7.53 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t=24$ ms na comutação da chave seletora.

Analizou-se o comportamento da corrente de carga que circula pelo transformador no lado da baixa tensão, conforme figura 7.54. Observa-se que possuem comportamento similar a corrente do lado de alta tensão, minimizado devido à função de transferência existente entre a alta tensão e a baixa tensão, onde se tem força magnetomotriz, fluxo magnético, força eletromotriz, isto é, enrolamento de alta tensão, núcleo, enrolamento de baixa tensão.

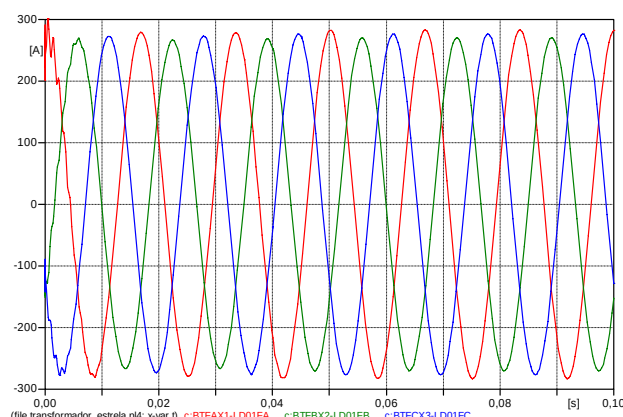


Figura 7.54 – Comportamento da corrente nos terminais de baixa tensão.

O impacto destas perturbações é exemplificado na figura 7.55. Note que as perturbações nos instantes de $t=30$ ms e $t=45$ ms, onde se tem a abertura do contato principal do tap 05 e o fechamento do contato principal do tap 06, respectivamente, são pequenas se comparados com as perturbações que ocorre nos instantes $t=35$ ms e $t=40$ ms, devido ao fato de ter-se nestes instantes a

bobina do enrolamento de regulação alimentando os dois resistores de transição dos tapes 05 e 06. No instante $t = 35$ ms ocorre a inserção do resistor de transição no tap 06 e no instante $t = 40$ ms a desinserção do mesmo no tap 05.

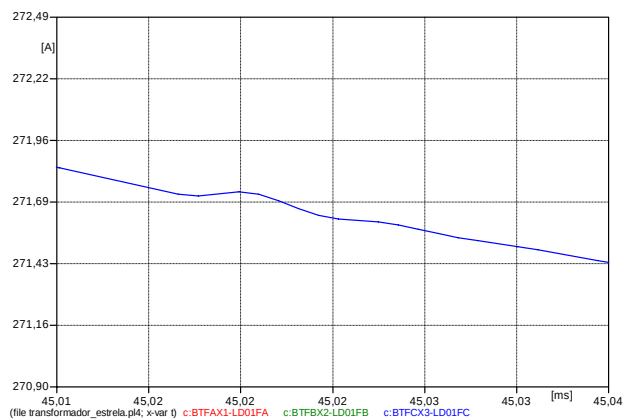


Figura 7.55 – Perturbação na corrente de baixa tensão com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.

Na figura 7.56, tem-se a comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, quando da mudança de tap 09 para tap 10 ou na mudança de tap 09 para tap 08. Observa-se uma perturbação na forma de onda gerando um sinal de alta frequência acoplado.

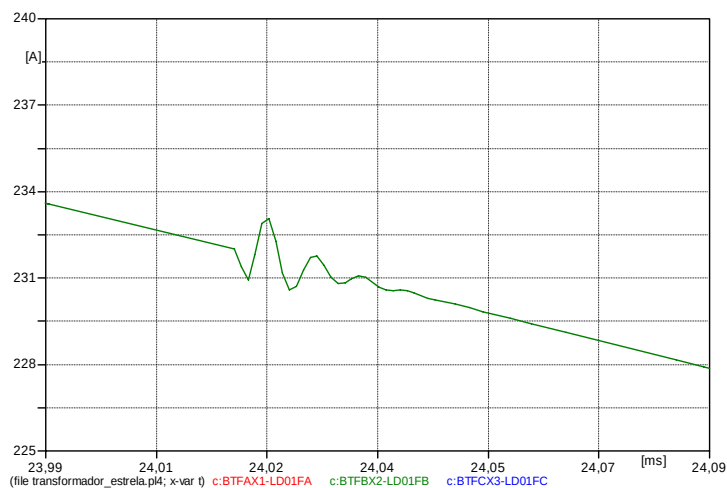


Figura 7.56 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t = 24$ ms na comutação da chave seletora.

Analisando o comportamento da corrente nas cargas, nota-se que esta perturbação encontrada nos terminais de baixa tensão do transformador, não se propagou através da rede elétrica, devido ao filtro existente na rede elétrica composto por indutância e capacitâncias.

7.4.3.2 Corrente no Enrolamento Terciário

Na análise do comportamento da corrente que circula no enrolamento terciário do transformador, observa-se que quando ocorre à comutação do tap, com a inserção e na desinserção do resistor de transição, permitindo a comutação em carga do transformador, ocorrem perturbações na corrente que circula pelo mesmo, conforme mostra a figura 7.57.

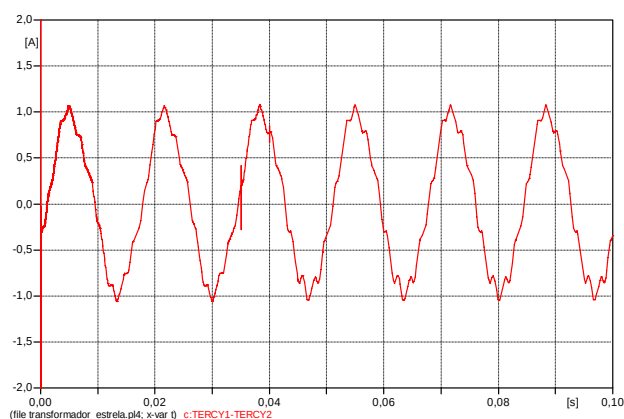


Figura 7.57 – Comportamento da corrente no enrolamento terciário.

O impacto destas perturbações é detalhado na figura 7.58. Note que as perturbações geram sinais de alta frequência acopladas a forma de onda. Nos instantes de $t = 30$ ms e $t = 45$ ms, onde se tem a abertura do contato principal do tap 05 e o fechamento do contato principal do tap 06, respectivamente, apresentam pequenas se comparadas com as que ocorrem nos instantes $t = 35$ ms e $t = 40$ ms, devido ter-se nestes instantes, a bobina do enrolamento de regulação alimentando os dois resistores de transição dos tapes 05 e 06. No instante $t = 35$ ms ocorre à inserção do resistor de transição do tap 06 e no instante $t = 40$ ms a desinserção do mesmo do tap 05.

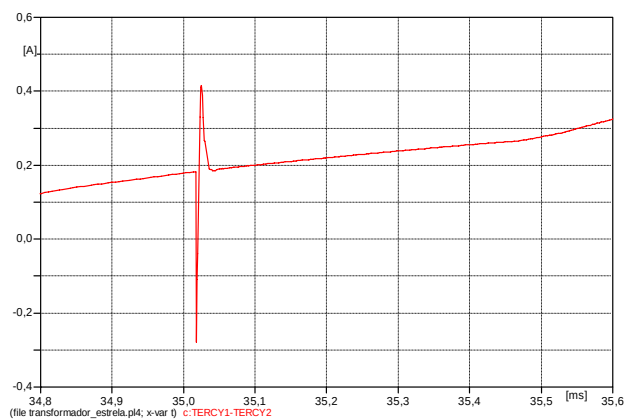


Figura 7.58 – Perturbação na corrente do enrolamento terciário com comutação de tap, transformador com enrolamento de alta tensão ligado em estrela.

Na figura 7.59 tem-se a comutação da chave seletora do enrolamento de regulação, observa-se uma perturbação na forma de onda gerando um sinal de alta frequência acoplado.

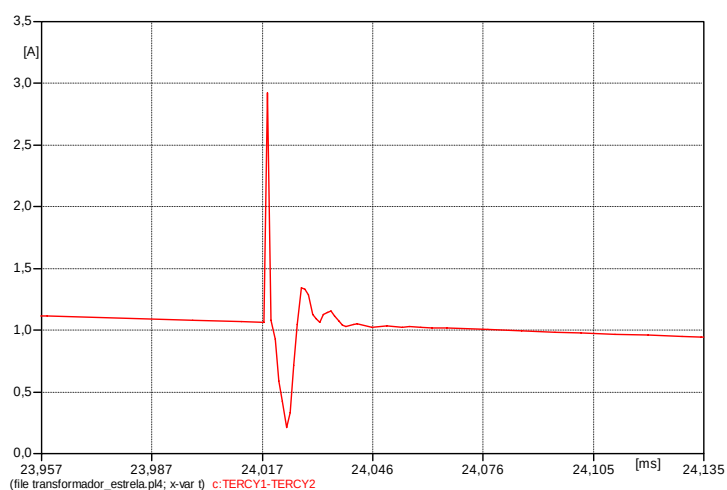


Figura 7.59 – Perturbação na comutação de baixar tap 09 para tap 10 no instante $t=24$ ms na comutação da chave seletora.

Analisando o comportamento das harmônicas presentes no enrolamento terciário, dentro da janela de comutação referente a 1 ciclo de simulação, com e sem a comutação de tap. Obteve-se um aumento na harmônica de 2ª ordem e uma diminuição na harmônica de 3ª ordem, as demais ordens permaneceram inalteradas, conforme mostra a figura 7.60.

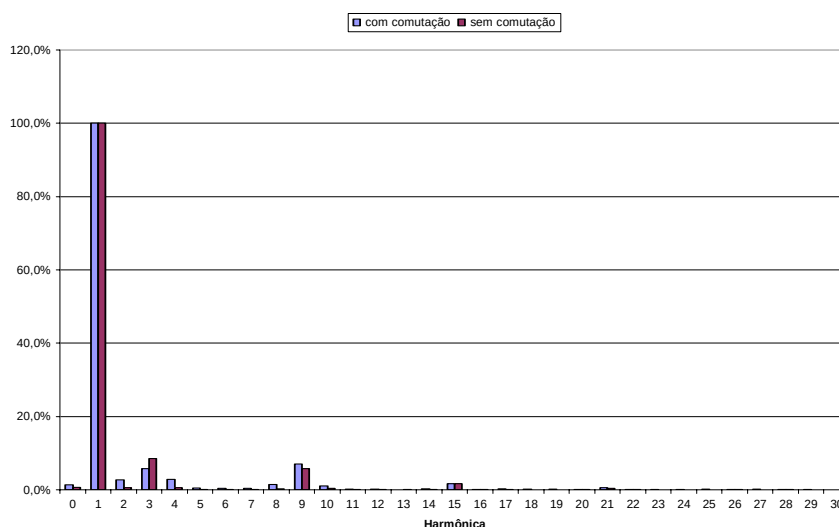


Figura 7.60 – Comportamento das ordens harmônicas correntes do enrolamento terciário.

7.5 Considerações Finais

O modelo do transformador regulador apresentou desempenho adequado nas simulações de operação a vazio e em carga, não provocando algum nível de flutuação de tensão elevado. Surgiram diversas perturbações na forma de onda com a geração de sinal de alta frequência superposto.

Apesar do tempo total de comutação ser 50 ms, através das simulações notou-se que o impacto nas formas de onda de corrente e tensão, não ultrapassam o período de 1 ciclo ou 16,6 ms.

Analisando esta janela de tempo de 1 ciclo na corrente de magnetização, obteve-se o surgimento de uma corrente harmônica de 2ª ordem elevada em relação ao mesmo período sem a comutação.

Observou-se que a comutação do comutador de derivação em carga, tanto na operação em vazio como em carga do transformador regulador, gerou pequenas perturbações na forma de onda da tensão e corrente, do lado de alta tensão e baixa tensão.

Notou-se também, que durante o processo de comutação, tem-se a geração de ordem harmônicas de ordem 3ª e 5ª, principalmente. Teve-se componente de 2ª ordem harmônica proveniente da assimetria da componente DC.

O modelo do comutador implementado não contemplou o arco elétrico que ocorre com a comutação. Essa análise é muito importante para verificar o impacto nas formas de onda da tensão e corrente, determinando o desgaste destes contatos quando ocorre a comutação.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

A metodologia apresentada para determinação dos parâmetros elétricos e magnéticos do modelo do transformador regulador é uma continuidade das pesquisas apresentadas nas referências [4] e [5], que utiliza os resultados dos ensaios de tipo e rotina do comissionamento do transformador, em conjunto com os dados geométricos do equipamento e a característica de magnetização do material magnético que compõe o núcleo do mesmo. Este modelo que representa um transformador de forma mas realista, apresentou resultados satisfatórios para a realização de simulações nas diversas condições operativas de um sistema elétrico onde o mesmo é instalado, permitindo atender uma necessidade das empresas concessionárias de energia, a operar um sistema em condições mais restritivas conforme as resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) comparando com resultados de simulações que utilizam modelos mais conservadores.

Sob o aspecto dos resultados referentes às perdas no cobre e as perdas no ferro, Folcault e Histerese, obtidos nos ensaios de simulação do modelo conforme norma ABNT, ocorreram uma diferença percentual acima do esperado. Isto devido à não representação das perdas adicionais no modelo implementado, bem como a uma limitação do valor medido dado pelo próprio programa ATP, e também na questão da representação dos fluxos de dispersão do enrolamento de regulação, em função do tipo construtivo do mesmo, porque este é composto de 8 (oito) bobinas, e o sentido da corrente que circula por estas bobinas é condicionado pela posição da chave seletora de comutação (sentido direto ou reverso). Isso conseqüentemente interfere no sentido do fluxo magnético.

Apesar desta diferença percentual, os resultados das simulações não são comprometidos nas condições operativas estudadas e são valores proporcionais aos encontrados no comissionamento de fábrica destes equipamentos.

A modelagem do comutador de tap apresentou também resultados satisfatórios nas condições operativas estudadas. Para as simulações em regime permanente a modelagem teve um desempenho que não compromete o resultado. Para as condições de simulação de transitórios de curta duração, devido às condições iniciais do sistema de comutação de tap, o mesmo não teve o mesmo desempenho com relação aos comportamentos dinâmicos nos contatos do comutador, exigindo com isso um aprimoramento do modelo para este tipo de estudo específico.

Portanto, a ferramenta desenvolvida permite a continuidade de estudos em uma lacuna ainda não pesquisada detalhadamente, principalmente com relação aos impactos na qualidade de energia que estas comutações apresentam nas formas de onda de corrente e tensão.

Pode-se, por exemplo, verificar o comportamento das harmônicas na corrente de magnetização do transformador em função da forma construtiva do equipamento, como também o impacto na mesma, quando da realização da comutação e o nível harmônico que a forma de onda possui naquela janela de tempo verificada.

A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento e a implementação desta ferramenta de estudo, na modelagem do transformador regulador de três colunas baseado nas características do circuito magnético do núcleo com comutação.

Sugere-se como tema para trabalhos futuros, a realização de estudos que permita a verificação do comportamento do transformador ao longo de sua vida útil, com o aprimoramento do modelo aqui desenvolvido. Este tipo de análise é muito importante para adequar a expectativa de vida do equipamento, bem como na busca de medidas para permitir a aplicação da manutenção preditiva em relação a uma manutenção preventiva (que é realizada atualmente), necessitando de desligamento e um grande número de horas trabalhadas para sua realização.

Sugere-se também a realização de investigações para aprimorar a representação dos fluxos de dispersão existentes no transformador, para se obter um modelo mais preciso, e com isso permitir uma melhor interpretação dos efeitos dos fenômenos existentes internamente no transformador.

REFERÊNCIA

BIBLIOGRAFICA

- [1] BREMERMAN, L. E., FEIJÓ J., W. F., LEMOS, F.A.B. – *“Análise e Simulação de um Modelo Discreto de Transformador com Mudança de Tap Sob Carga utilizando MATLAB/SIMULINK®”* – Grupo de Sistemas de Energia Elétrica DEE – PUCRS.
- [2] SILVA, F. L. – *“Modelagem de Transformadores Trifásicos de Distribuição para Estudos de Fluxo de Potência”* – Dissertação de Mestrado – UFJF, Setembro/2004.
- [3] AZEVEDO, A. C., REZENDE, I., DELAIBA, A. C., OLIVEIRA, J. C., CARVALHO, B. C., BRONZEADO, H. S. – *“Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curto - Circuitos Externos: Investigação Utilizando FEM”* – SBQEE, 2006.
- [4] FANDI, J. C. O. – *“Modelagem de Transformadores de Três Colunas para Estudos de Corrente de Energização”* – Dissertação de Mestrado – UFU, 2003.
- [5] SARAIVA, E., CHAVES, M. L. R., BRONZEADO, H. S. – *“Proposta de Metodologia para Implementação do Ciclo de Histerese no Modelo de Transformadores Trifásicos no Programa ATP”* – SNPTEE, 2005.
- [6] LEUVEN EMTP CENTER (LEC) – *“Alternative Transients Program (ATP)”* – Rule Book, Julho, 1987.
- [7] *“Manual de Instruções de Operação e Manutenção do Transformador 32/40 MVA”* – Siemens, 2005.
- [8] MARTIGNONI, A.- *“Transformadores”* – Editora Globo 1983, Porto Alegre.
- [9] FEINBERG, R. – *“Modern Power Transformer Practice”* – The Macmillan Press LTD, 1979.

-
- [10] CHERRY, E. C. – “*The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits*” – Proc. Of the Physical Society, V. (B) 62, pages 101-111, February, 1949.
- [11] “*Manual de Montagem, Operação e Manutenção do Comutador XBR 100*” – ASEA BROWN BOVERI, 1986.
- [12] CASTRO J., C. A., TANAKA, M.R. – “*Circuitos de Corrente Alternada um Curso Introdutório*” – UNICAMP, 1972.
- [13] MONTICELLI, A., GARCIA, A. – “*Introdução a Sistemas de Energia Elétrica*” – UNICAMP, 1999.
- [14] ZANETTA J., L. C. – “*Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*” – USP, 2003.
- [15] “*NBR 5380 – Transformador de Potência – Método de Ensaio*” – ABNT, Maio, 1993.
- [16] “*Curso de Qualidade de Potência na Distribuidora*” - Comissão de Integração Energética Regional, 2004.

ANEXO A

PRINCÍPIO DA DUALIDADE

A.1 Introdução

Uma maneira encontrada para analisar o comportamento de um sistema complexo é desenvolver um circuito elétrico equivalente, no qual são colocados parâmetros capazes de representar o sistema [10]. Assim, o circuito equivalente nada mais é do que um modelo matemático simplificado do sistema real. Depois do circuito equivalente ter sido desenvolvido são empregadas técnicas conhecidas de análise de circuito elétrico para determinar o seu comportamento. Portanto, quanto mais preciso o circuito elétrico, mais preciso será o estudo.

Para máquinas, transformadores e outros equipamentos elétricos que utilizam relações magnéticos, primeiro deve ser determinado o circuito magnético equivalente, e a partir deste é obtido o circuito elétrico equivalente.

A.2 Histórico do Princípio da Dualidade

Em 1904 Russel deduziu uma relação geométrica entre o circuito inverso, ou dual, de impedâncias elétricas, baseado no intercâmbio dos pontos de junção e as malhas. Trinta anos depois, Cauer demonstrou tais relações e definiu as bases do princípio topológico da dualidade. Em 1948, Cherry mostra que existe uma relação idêntica do modelo entre o circuito magnético do transformador e seu circuito elétrico equivalente.

A.3 Princípio da Dualidade

Sempre que os elementos de um sistema podem ser colocados um a um em correspondência com os elementos de um outro sistema, esta correspondência é denominada *dualidade* [10]. A

dualidade pode, então, existir entre o método dos laços e o método dos nós na análise de redes, um método sendo o dual do outro. Sob o ponto de vista algébrico, duas redes são ditas duais se as equações dos nós de uma são da mesma forma que as equações dos laços da outra. Graficamente, duas redes são ditas duais quando as malhas de uma das redes estão, uma a uma, em correspondência com os nós da outra rede.

A forma de um circuito elétrico pode ser derivada diretamente de um circuito magnético pelo uso do princípio da dualidade. Esta técnica obedece aos seguintes princípios:

- São marcados nós dentro de cada malha do circuito magnético e um nó externo fora do circuito, este último será o nó de referência;
- Tais nós são então unidos por ramificações que passam através de cada elemento do circuito magnético;
- Para cada relutância em uma das malhas do circuito magnético, haverá uma indutância conectada ao nó correspondente no circuito elétrico;
- Quando uma relutância é comum a duas malhas no circuito magnético, a indutância correspondente interligará os nós correspondentes no circuito elétrico.

As relutâncias correspondentes às partes ferromagnéticas do sistema magnético podem representar relações não lineares entre seus fluxos e forças magnetomotrizes. A taxa de variação do número de linhas de fluxos produz a tensão variável no circuito elétrico. As não linearidades do circuito magnético são, portanto, preservadas no circuito elétrico equivalente.

Para uso com tensões alternadas, cada elemento não-linear pode ser representado por um modelo de circuito que consiste de uma reatância indutiva em paralelo com uma resistência representando as perdas por histerese e por correntes parasitas do elemento. A reatância e a resistência são ambas, geralmente, funções não-lineares da tensão através da ramificação.

Desta maneira, o circuito elétrico equivalente de um transformador é derivável de seu circuito magnético pela aplicação do princípio da dualidade. Entretanto, existe a seguinte restrição:

- Se for desejado construir o dual geométrico de uma rede, o gráfico da rede original deve ser passível de representação sobre um plano, isto é, deve ser planar.

A razão disto é que a construção requer que os ramos da rede sejam orientados, um em relação ao outro, de modo a separarem precisamente as malhas, isto é, sem ambigüidade. Um exemplo de circuito não planar é um transformador que possui quatro ou mais enrolamentos com acoplamentos de dispersão.

O circuito elétrico equivalente é desenvolvido com a suposição de que todos os enrolamentos têm N espiras. Uma vez que os números de espiras são, em geral, diferentes nos vários enrolamentos, é necessário adicionar transformadores ideais nos terminais do circuito elétrico equivalente para obter as tensões induzidas reais e as correntes reais nos enrolamentos.

Aplicando o princípio da dualidade no transformador em questão, tem-se que o parâmetro $\Re$ do circuito magnético é substituído pelo parâmetro L da indutância no circuito elétrico equivalente.

Assim para cada relutância do circuito magnético, há uma indutância correspondente no circuito elétrico. Para cada fonte de força magnetomotriz no circuito magnético, há um transformador ideal com relação de transformação adequada.

ANEXO B

EQUIPAMENTOS PARA MUDANÇA DE TAP EM CARGA

B.1 Introdução

Equipamentos para mudança de tap em carga são chamados de comutadores de derivação em carga, são acessórios necessário para os transformadores empregados nos sistema elétrico de potência. O equipamento facilita a mudança de tap de um enrolamento, permitindo variar o número de espiras deste enrolamento, e mudar o nível de tensão de saída do transformador.

Nas usinas de geração onde a tensão de saída do gerador é de até 20 kV, os transformadores são aplicados para elevar a tensão, os comutadores estão localizados entre o neutro e o fim do enrolamento de alta tensão. A faixa de comutação é de aproximadamente de 20% variando de +5% até -15%. Os comutadores são aqui aplicados para o controle grosso da tensão de saída da usina elétrica.

No sistema de transmissão, os auto transformadores geralmente possui uma faixa de comutação de 30%.

Para as subestações de distribuição os transformadores conectados em estrela ou em delta, podem ter comutadores nos enrolamentos de alta tensão. Geralmente a faixa de comutação é de 20% em 16 taps de 1,25% ou em 14 taps de 1,43%.

B.2 Condições Básicas de Operação do Comutador

Eletricamente duas condições básicas têm que ser adequadas na operação dos comutadores de derivação em carga.

- A corrente de carga no enrolamento do transformador não deve ser interrompida durante a mudança de tap;

- A mudança de tap deve ser conduzida sem curto-circuitar à seção do tap no enrolamento.

Estas condições necessitam da introdução de alguma forma, de uma impedância de transição durante a comutação. Assim, uma impedância de transição é utilizada, podendo ser um resistor ou um indutor. O valor da impedância e o método de conexão no circuito são determinados para atender algumas condições:

- Não deve haver tensão de flutuação excessiva durante o ciclo de chaveamento;
- A corrente de circulação entre taps na posição de transição não deve ser excessiva;
- A duração do arco quando ocorre a interrupção de corrente, deve ser mantido o mínimo para minimizar o desgaste do contato e a redução da contaminação do óleo.

O comutador de tap com impedância de transição do tipo resistor, tem a vantagem que a corrente interrompida e a tensão no contato estão em fase. Isto significa que o arco da corrente se extingue no zero e, a tensão não se elevará para o máximo no próximo quarto de ciclo. Os comutadores modernos com resistores de alta velocidade operam rápido com os resistores de transição, onde o arco persiste por aproximadamente meio ciclo. Conseqüentemente existe o mínimo desgaste do contato e também a mínima contaminação do óleo.

O comutador de tap com impedância de transição do tipo indutor tem a vantagem do tempo, para a alta velocidade do mecanismo de chaveamento, mas a desvantagem que a corrente interrompida e a tensão no contato no instante da operação estão defasadas. Esta condição propicia o desgaste do contato e a contaminação do óleo pelo arco formado durante três ou quatro meio ciclo.

B.3 Resistor de Comutador de Alta Velocidade

Em comutador de alta velocidade moderno com resistor, a mudança de tap acontece em aproximadamente 40 a 70 ms, dependendo do tipo de mecanismo usado para chavear.

A alta velocidade de transferência é obtida usando um sistema acumulador de energia, geralmente na forma de um banco de molas. O mecanismo é tal que, uma vez a energia armazenada

é liberada, a mudança de tap é completada indiferente de qualquer falta de energia. Isto é, um efeito, um mecanismo positivo ir e não ir, com muito baixo risco de falha.

Existem dois tipos de resistores para comutadores de uso comum, ambos usam arranjo de chaveamento de transferência de corrente. Estes podem ser classificados como o ciclo de chaveamento galhardete e ciclo de chaveamento sinalização. Os termos sinalização e galhardete é derivado do aparecimento dos diagramas de fasores, que mostram a mudança da saída de tensão do transformador se movendo de um tap para o próximo.

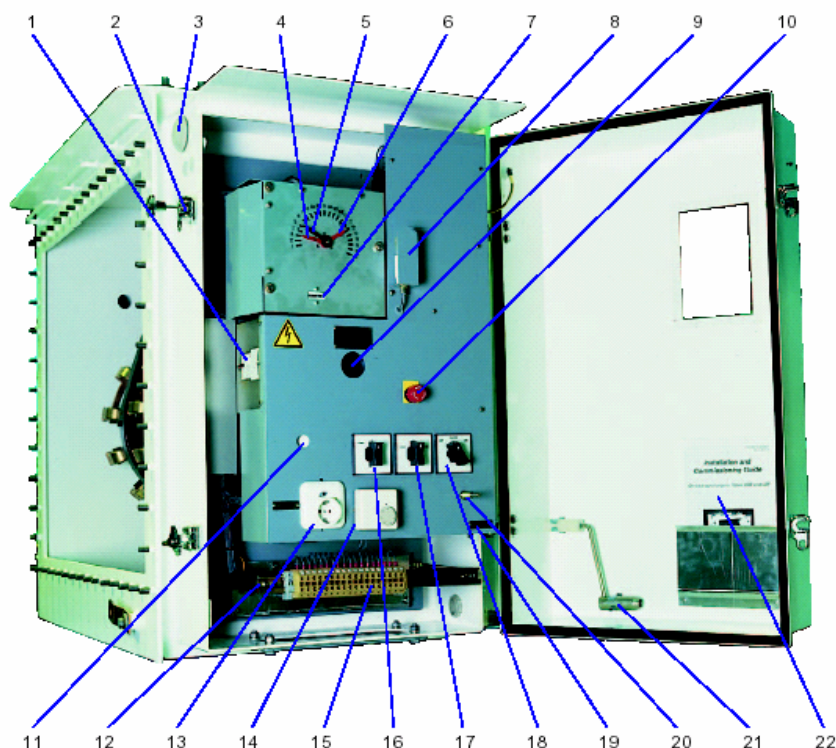
Um comutador de tap do tipo ciclo de chaveamento galhardete usa chave seletora, que combina as funções de seleção de tap e transferência de corrente. Geralmente, um único resistor é usado que dá um ciclo de chaveamento assimétrico. Em uma direção de movimento, uma corrente circulante está passando antes que da interrupção da corrente direta, considerando que na direção inversa da corrente direta ser quebrada antes que a corrente circulante inicia para passar.

Um comutador de tap do tipo ciclo de chaveamento sinalização usa um seletor de tap em conjunto com uma chave separadora. São usados dois resistores para chaveamento simétrico. Com esta seqüência, a corrente direta é quebrada pelo contato principal antes que a circulação corrente iniciar para passar.

B.4 Sistema Elétrico-mecânico de Chaveamento do Comutador

O sistema eletro-mecânico de chaveamento produz o movimento para permitir a operação do seletor derivação e da chave comutadora. A mudança é provida através do motor, uma série de engrenagens e de um dispositivo de molas que armazena energia, que quando esta muda completamente de estado, opera o sistema via uma haste de partida. Esse sistema pode também ser movimentado através de uma manivela manualmente.

A figura B.1 mostra os componentes da caixa do mecanismo eletro-mecânico aplicado no transformador regulador.



- | | |
|--|---|
| 1. Interrupção de proteção do motor | 12. Unidade de aquecimento |
| 2. Dispositivo de bloqueio | 13. Protector de falha de terra |
| 3. Válvula de ar | 14. Termostato ou higróstato |
| 4. Marcador de arrasto de posição mínima | 15. Bloco de terminais |
| 5. Indicador de posição | 16. Chave aumentar/diminuir |
| 6. Marcador de arrasto de posição máxima | 17. Comutador local/remoto |
| 7. Contador | 18. Comutador para unidade de aquecimento |
| 8. Lâmpada | 19. Numero de série |
| 9. Eixo para manivela | 20. Interruptor da lâmpada |
| 10. Paragem de emergência | 21. Manivela |
| 11. Indicador do comutador de derivação | 22. Manual de operação |

Figura B.1 – Caixa do sistema eletromecânico.

B.4.1 Operação do Sistema Eletromecânico

A figura B.2 ilustra os componentes elétricos e mecânicos do mecanismo motorizado e mostra também os intertravamentos mecânico na operação do mecanismo.

Como mostrado na figura, o motor transmite através de um sistema de engrenagens que movimenta a chaveta do volante ressaltado, fazendo com que o dispositivo de molas que armazenam energia é carregado por esta chaveta.

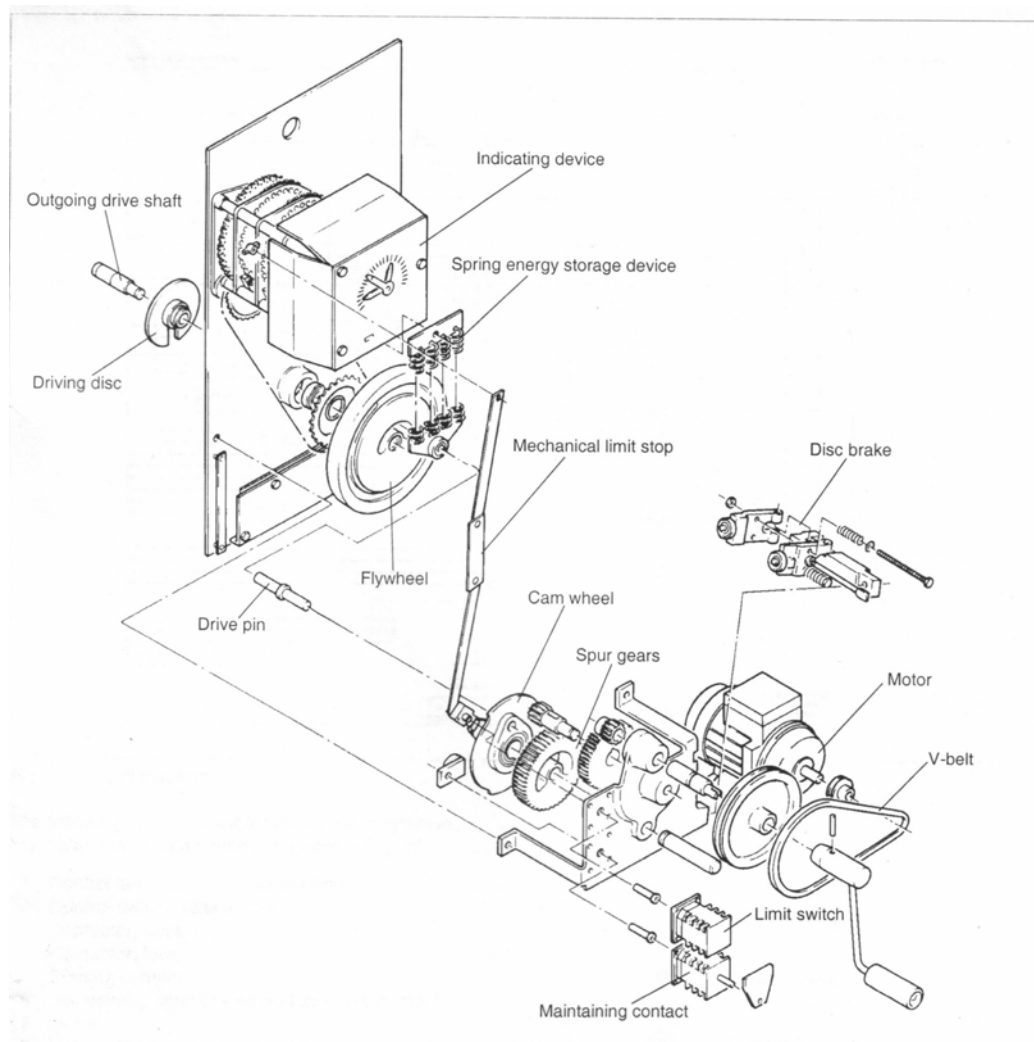


Figura B.2 – Componentes elétrico e mecânico do mecanismo motorizado.

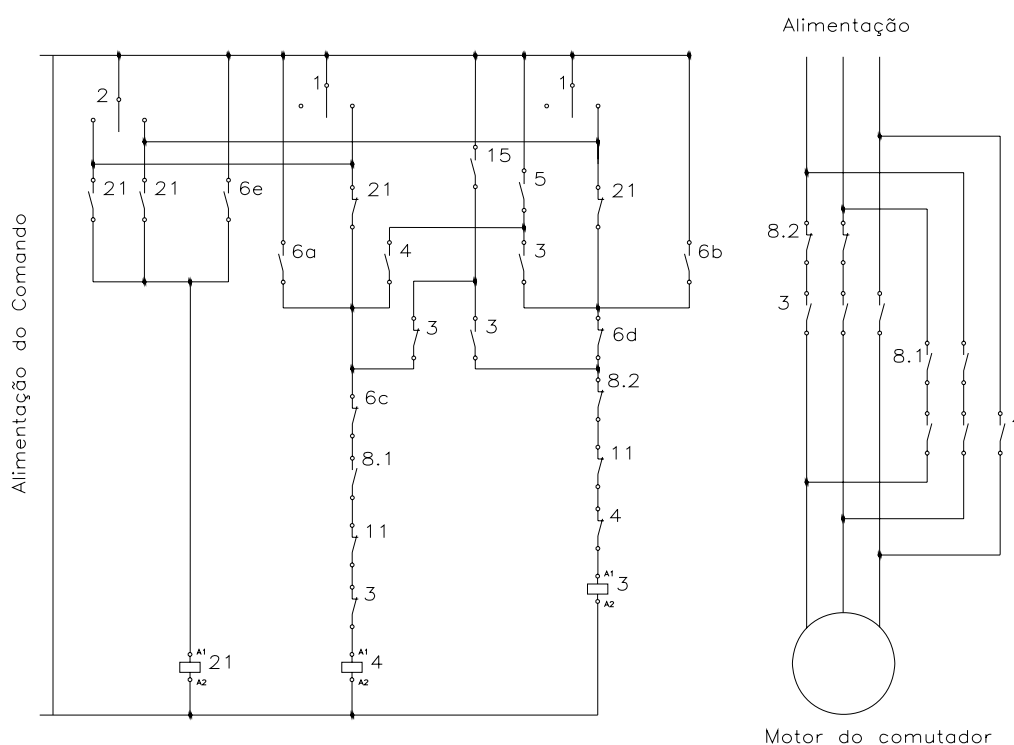
Durante a rotação da chaveta do volante ressaltado tenciona as molas. Quando a chaveta atinge sua menor posição sobre o volante ressaltada, as molas são desacatradas e com a assistência do pêndulo, faz a energia ser transmitida para a haste de partida e o disco dirigido.

O disco dirigido movimenta a engrenagem Geneva que está no comutador, o pêndulo é parado pelo disco de freio que também é operado pelo contato de partida.

A haste de partida, através de uma corrente de transmissão mecânica, movimenta a engrenagem Geneva do indicador de posição, que indica a posição mecânica, operação elétrica e mecânica do fim de curso, e do indicador de posição.

B.4.2 Diagrama de Comando

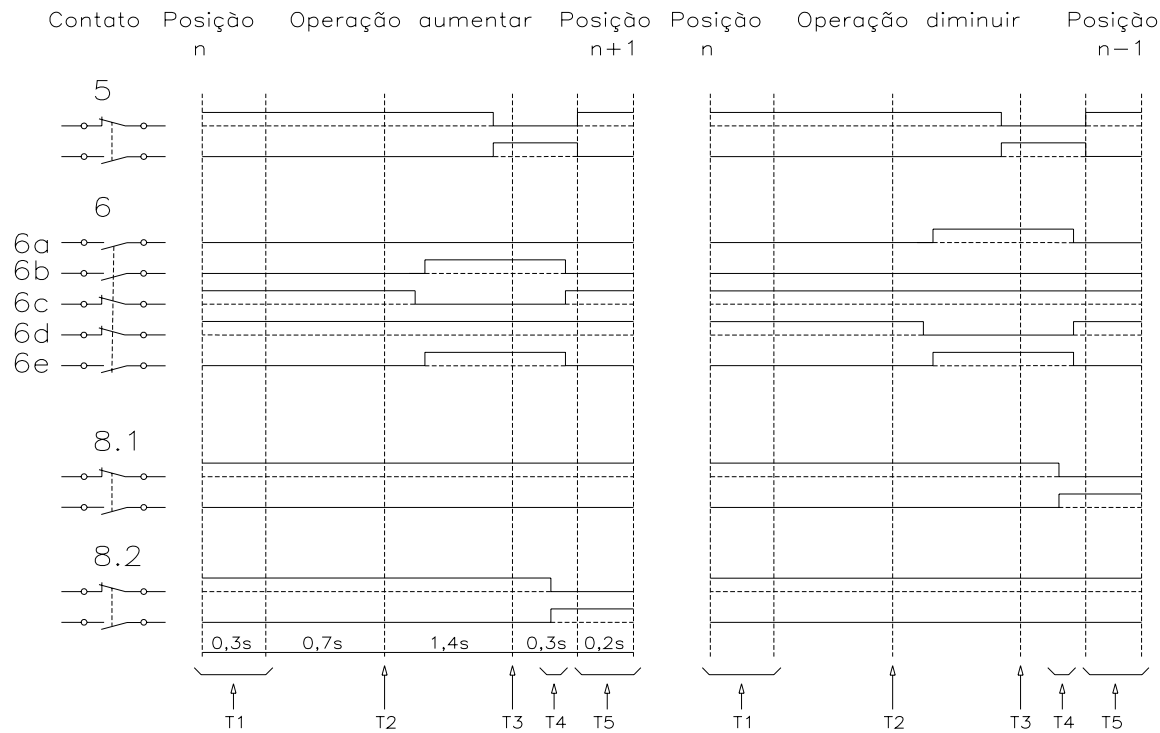
A figura B.3 mostra o esquema de controle e comando do sistema eletromecânico do comutador descrito no item anterior. Analisando o esquema observa-se que os contatores 3 e 4 realizam a operação de elevar e baixar o tap respectivamente, podendo ser acionado por um comando local ou remoto, sendo este remoto por um telecomando através da sala de controle ou por um comando através de um sistema automático de controle.



- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Chave controle: Local / Remoto | 8. Chave fim de curso |
| 2. Chave controle: Elevar / Abaixar | 8.1 Posição tap inferior |
| 3. Contator: Elevar | 8.2 Posição tap superior |
| 4. Contator: Abaixar | 11. Chave de intertravamento |
| 5. Contato início | 15. Contato de selo |
| 6. Contato auxiliar | 21. Contator, operação tap por tap |

Figura B.3 – Comando do sistema eletro-mecânico.

Os contatos do tipo 5, 6 e 8 são contatos que representam o movimento do sistema mecanizado do comutador. Sua condição de operação depende se o comutador está na operação de aumentar ou diminuir o tap. A figura B.4 mostra a condição do estado destes contatos conforme o processo de aumentar ou diminuir tap. Esses contatos atuam diretamente no sistema de comando do sistema motorizado. Os contatos do tipo 8 representa o fim de curso do comutador.



- T1. Partida
- T2. Início carga das molas
- T3. Molas carregadas
- T4. Operação da chave seletora
- T5. Parada

Figura B.4 – Temporização dos contatos auxiliares mecânico.

Como a operação do comutador é tap a tap, o contator 21 representa esta operação passo a passo do comutador, assim somente uma operação do comutador é obtida de cada vez.