



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELOS PARA SURTOS PARA TRANSFORMADORES DE MÉDIA TENSÃO

RENATA BACHEGA JACYSZYN

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof. Manuel Luis B. Martinez, Dr.

Itajubá, Junho de 2006

Dedico a meus pais Alécio Graciano Bachega e Oksana Jacyszyn Bachega, pelo apoio dado em todas as etapas da minha vida, e ao meu filho André.

Agradecimentos

Ao Amigo Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez pela constante orientação e pelas oportunidades oferecidas para meu crescimento profissional.

Aos amigos Credson de Salles, Alessandra Freitas Picanço e Cícero Lefort pela ajuda na elaboração e revisão do texto.

Aos técnicos João Cândido, Celso Martins, Edson Pasqualim, Nilson de Oliveira e Carlos Eduardo Ribas pela ajuda no aprendizado das técnicas de ensaio de Alta Tensão.

Aos meus novos amigos Msc. Eng. Marcelo Antônio Ravaglio e Eng. José Carlos Schaefer pela ajuda na pesquisa bibliográfica e pelos conselhos dados no sentido de enriquecer minha carreira.

Ao Dr. Eng. Gilson Paulilo e ao Eng. José Mário de Moraes pela oportunidade de crescer dentro da engenharia.

Resumo

Atualmente o conceito de confiabilidade do sistema elétrico vem ganhando cada vez mais importância. Este fato torna possível a retirada de qualquer equipamento para a realização de ensaios com o objetivo de determinar seu comportamento frente a solicitações que ocorrem no sistema, tais como curto-circuito, energização, surto transferido, entre outros.

A evolução da informática, possibilitando a resolução cada vez mais rápida até dos cálculos mais complexos, tornou possível a avaliação quase que em tempo real do comportamento do sistema elétrico ou de um de seus componentes.

O desenvolvimento de modelos destes componentes, para que apresentem respostas próximas do real, evita que estes sejam retirados de operação, garantindo assim a confiabilidade do sistema elétrico.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de transformador para estudos em alta frequência – Surtos Transferidos e Função de Transferência. De modo complementar, é proposto um modelo para os enrolamentos do transformador apto a auxiliar a interpretação de certos sinais que aparecem nas formas de corrente durante os ensaios de impulso atmosférico. Simulações são realizadas e comparações com as respostas obtidas experimentalmente são apresentadas.

Abstract

Nowadays, in power systems, the concept of reliability is getting more and more importance. Therefore, it is a tough task to take any equipment out of operation to carry out some tests in order to know its behavior under some phenomena that can occur in the power system (short-circuit, energization, transferred surges, etc.).

The improvement of the computer systems allowed that even the most complex calculations could be ready quickly. Thus, the evaluation of the behavior of the power system equipments can be done almost in a real-time way.

The development of models of these equipments that presents a good attachment with their actual behavior avoids them to be taken out of operation and then, the power system reliability is maintained.

This work aims at getting a model to carry out high frequency studies (Transformer Transfer Function and Transferred Voltage). This work also aims getting at a transformer winding model in order to make it easier the evaluation of some signals that appear in the current wave shape obtained during the lightning impulse tests. Simulations are carried out and comparisons between their results and testing one are presented.

Índice

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE	V
NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – OBJETIVO	1
1.2 – METODOLOGIA	2
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 - MODELOS GERAIS DE TRANSFORMADORES	5
2.1 – MODELO PARA ESTUDOS EM FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL	5
2.2 – MODELOS PARA ESTUDOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS	6
3 - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE A APLICAÇÃO DE SURTOS EM TRANSFORMADORES	13
3.1 – MODELOS PARA ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES	13
3.1.1 – Modelagem dos Enrolamentos ^[6]	13
3.1.2 – Modelagem do Acoplamento dos Enrolamentos ^[7]	16
3.2 – RESULTADOS DE ENSAIOS	22
3.2.1 – Gerador de Surtos Repetitivos	22
3.2.2 – Aplicação de Impulsos Atmosféricos e Distribuição de Tensão nos Enrolamentos	23
3.2.3 – Surtos Transferidos	27
3.3 – PROBLEMAS DE RUÍDOS/DEFEITOS EM ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO	34

4 - PROPOSTAS PARA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES	37
4.1 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	37
4.2 – MODELO GERAL – ADAPTAÇÃO DOS MODELOS PARA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL	39
4.2.1 – Proposta de Modelagem	39
4.2.2 – Obtenção dos Parâmetros	40
4.2.3 – Resultados das Simulações dos Modelos para o Domínio da Frequência	43
4.2.4 – Comparação de Resultados	48
4.2.5 – Comentários	49
4.3 – MODELAGEM PARA SURTOS TRANSFERIDOS	50
4.3.1 – Aplicação do Modelo Simplificado com Capacitâncias	50
4.3.2 – Proposta para Correção do Modelo em Transformadores onde $C_{HL} > C_{LT}$	56
4.3.3 – Comentários	60
5 - MODELO DETALHADO DOS ENROLAMENTOS PARA IMPULSOS	63
5.1 – MODELO PARA RUÍDOS/DEFEITOS	63
5.2 – LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS PARA OS MODELOS	64
5.3 – SUPERFÍCIES E CURVAS CARACTERÍSTICAS DO GERADOR DE IMPULSO PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO	65
5.4 – EXEMPLO DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS	72
5.5 – MODELO DE ENROLAMENTOS	73
5.5.1 – Resultados e Validação dos Modelos	74
5.5.2 – Comparação de Resultados	80
5.6 – COMENTÁRIOS	82
6 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS	85
BIBLIOGRAFIA	87

Nomenclatura e Simbologia

- b – Distância entre enrolamento e núcleo.
- b_1 - Distância entre enrolamento e núcleo do enrolamento primário.
- b_2 - Distância entre enrolamento e núcleo do enrolamento secundário.
- B_a – Gradiente do Campo Magnético entre Tanque e Enrolamento.
- B_i - Gradiente do Campo Magnético entre Enrolamento e Núcleo.
- C – Capacitância do Enrolamento do Transformador.
- C_1 – Capacitância do Enrolamento Primário para a Terra.
- C_2 – Capacitância do Enrolamento Secundário para a Terra.
- C_{12} – Capacitância entre os Enrolamentos Primário e Secundário.
- C_F – Capacitância de Impulso.
- C_{HL} – Capacitância entre os Enrolamentos de Alta e Baixa Tensão.
- C_L, C_{LT} – Capacitância do Enrolamento de Baixa Tensão para a Terra.
- C_P – Capacitância Série (Própria) do Enrolamento.
- CS – Capacitância de Carga do Gerador de Impulsos.
- d – Distância entre tanque e Enrolamento.
- d_1 - Distância entre tanque e Enrolamento Primário.
- d_2 - Distância entre tanque e Enrolamento Secundário.
- D – Distância entre Núcleo e Tanque.
- ϵ - Constante de Rigidez Dielétrica.
- E – Tensão Induzida no Enrolamento.
- E_1 - Tensão Induzida no Enrolamento Primário.
- E_2 - Tensão Induzida no Enrolamento Secundário.
- E_a – Gradiente de Tensão entre Tanque e Enrolamento.
- E_i - Gradiente de Tensão entre Enrolamento e Núcleo.
- Φ - Fluxo Magnético Produzido pela Corrente do Enrolamento.
- Φ_1 - Fluxo Magnético Produzido pela Corrente Primária.
- Φ_2 - Fluxo Magnético Produzido pela Corrente Secundária.
- g – Coeficiente de Potencial Mútuo por Unidade de Comprimento.

G - Coeficiente de Potencial Mútuo.

h – Altura do Núcleo.

Hz – Hertz.

I – Corrente que Circula pelo Enrolamento.

$I_{máx}$ – Corrente que Circula pelo Enrolamento quando a Tensão se Anula.

I_p – Valor da Corrente de Pico.

k – Capacitância para a Terra.

l_1 – Indutância Primária por Unidade de Comprimento.

l_2 – Indutância Secundária por Unidade de Comprimento.

L – Indutância.

L_1 – Indutância do Enrolamento Primário.

L_2 – Indutância do Enrolamento Secundário.

μ - Permeabilidade Magnética.

m – Indutância Mútua por Unidade de Comprimento.

M – Indutância Mútua.

n – Número de Estágios do Modelo.

nH – Número de Espiras do Enrolamento de Alta Tensão.

nL – Número de Espiras do Enrolamento de Baixa Tensão.

N – Número de Espiras.

N_1 – Número de Espiras do Enrolamento Primário.

N_2 – Número de Espiras do Enrolamento Secundário.

p_1 – Coeficiente de Potencial Próprio do Enrolamento Primário por Unidade de Comprimento.

p_2 - Coeficiente de Potencial Próprio do Enrolamento Secundário por Unidade de Comprimento.

P_1 - Coeficiente de Potencial Próprio do Enrolamento Primário.

P_2 - Coeficiente de Potencial Próprio do Enrolamento Secundário.

Q – Carga Acumulada no Enrolamento.

Q_1 - Carga Acumulada no Enrolamento Primário.

Q_2 - Carga Acumulada no Enrolamento Secundário.

R_1 – Resistência do Enrolamento Primário.

R_2 – Resistência do Enrolamento Secundário.

R_C – Resistência de Cauda.

R_{CC} – Resistência de Curto-Circuito.

R_D – Resistência de Frente do Gerador de Impulso.

R_E – Resistência de Cauda do Gerador de Impulso.

R_f – Resistência de Frente.

R_F – Resistência de Falta.
 R_M – Resistência de Magnetização.
 T_{ds} – Tempo de Cruzamento de Zero de Tensão.
 U_H – Tensão do Enrolamento de Alta Tensão.
 U_L – Tensão do Enrolamento de Baixa Tensão.
 v_0 – Velocidade de Propagação da Luz no Vácuo.
 v - Velocidade de Propagação de Onda.
 V_1 – Tensão de Saída do Enrolamento Primário.
 V_2 – Tensão de Saída do Enrolamento Secundário.
 X_1 – Reatância do Enrolamento Primário.
 X_2 – Reatância do Enrolamento Secundário.
 X_M – Reatância de Magnetização.
 w – Comprimento de Uma Espira.
 z – Impedância de Surto por Unidade de Comprimento.
 Z - Impedância de Surto do Enrolamento.
 $Z_{\%}$ - Impedância Percentual.
 $Z_{H\%}$ - Impedância Percentual do Enrolamento de Alta Tensão.
 $Z_{L\%}$ - Impedância Percentual do Enrolamento de Baixa Tensão.
 Z_1 - Impedância de Surto do Enrolamento Primário.
 Z_2 - Impedância de Surto do Enrolamento Secundário.
 Z_{STR} – Impedância de Surto da Bobina.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Circuito Equivalente do Transformador para Freqüência Industrial _____	5
Figura 2.2 – Modelo de Transformador Desenvolvido em [1] _____	6
Figura 2.3 – Modelo de Alta Freqüência do Enrolamento _____	10
Figura 2.4 – Modelo de seção infinitesimal para um transformador de dois enrolamentos, conforme referênci a [3]. _____	10
Figura 2.5 – Modelo de Transformador Utilizado em [4] _____	11
Figura 2.6 – Comparação entre o comportamento observado experimentalmente e por simulação da Figura 2.5 _____	11
Figura 2.7 – Comparação da Resposta Obtida Experimentalmente e por Simulação da Aplicação de um Surto Induzido _____	12
Figura 3.1 – Esquema de um Enrolamento de Transformador _____	14
Figura 3.2 – Esquema de um Enrolamento de Transformador Levando-se em Conta os Acoplamentos _____	17
Figura 3.3 – Esquema dos Enrolamentos de um Transformador e a Distribuição dos Campos Elétrico e Magnético _____	18
Figura 3.4 – Esquema de Enrolamento Tipo Panqueca e seus Acoplamentos _____	22
Figura 3.5 – Gerador de Surtos Repetitivos _____	23
Figura 3.6 – Modelo do Gerador de Surtos utilizado em Simulações _____	23
Figura 3.7 – Impulso pleno reduzido e primeiro impulso pleno especificado aplicados a um transformador trifásico de 75 kVA – NBI 95 kV _____	24
Figura 3.8 – Impulso pleno reduzido e primeiro impulso pleno especificado aplicados em um transformador monofásico de 10 kVA – NBI 125 kV _____	25
Figura 3.9 – Distribuição de Tensão em um Enrolamento de Bobina Contínua _____	26
Figura 3.10 – Distribuição de Tensão em um Enrolamento de Bobinas em Panqueca _____	26
Figura 3.11 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T1 _____	27
Figura 3.12 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T2 _____	28
Figura 3.13 – Impulso de tensão aplicado no transformador T3 _____	28
Figura 3.14 – Impulso de tensão aplicado no transformador T4 _____	28
Figura 3.15 – Impulso de tensão aplicado no transformador T1 _____	29
Figura 3.16 – Impulso de tensão aplicado no transformador T2 _____	30
Figura 3.17 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T3 _____	30

Figura 3.18 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T4	30
Figura 3.19 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T1	31
Figura 3.20 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T2	31
Figura 3.21 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T3	32
Figura 3.22 – Impulso de Tensão Aplicado no Transformador T4	32
Figura 3.23 – Impulso Pleno Reduzido sem sinais	35
Figura 3.24 – Impulso Pleno Reduzido com alguns sinais	35
Figura 4.1 – Função de Transferência – FTT – Transformador T1 – Amplitude	38
Figura 4.2 - Função de Transferência – FTT – Transformador T1 – Fase	38
Figura 4.3 – Função de Transferência – FTT – Transformador T2 – Amplitude	39
Figura 4.4 - Função de Transferência – FTT – Transformador T2 – Fase	39
Figura 4.5 – Modelo de Primeira Ordem para uma Grande Faixa de Frequência	40
Figura 4.6 – Modelo de Segunda Ordem	40
Figura 4.7 – Ponte de “Schering”	42
Figura 4.8 – Esquema de Ensaio de Medição de Capacitância	42
Figura 4.9 – FTT Simulada – Amplitude	43
Figura 4.10 – FTT Simulada – Fase	44
Figura 4.11 – FTT Simulada – Amplitude	45
Figura 4.12 – FTT Simulada – Fase	45
Figura 4.13 – Modelo de Quarta Ordem	46
Figura 4.14 - FTT Simulada – Amplitude	46
Figura 4.15 - FTT Simulada – Fase	47
Figura 4.16 - FTT Simulada – Amplitude	47
Figura 4.17 - FTT Simulada – Fase	48
Figura 4.18 – Comparação – Ensaio & Simulação – FTT – Módulo	49
Figura 4.19 - Comparação – Ensaio & Simulação – FTT – Fase	49
Figura 4.20 – Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos Atmosféricos – Transformador T1	50
Figura 4.21 - Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos Atmosféricos – Transformador T2	51
Figura 4.22 - Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos Atmosféricos – Transformador T3	52
Figura 4.23 - Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos Atmosféricos – Transformador T4	52
Figura 4.24 - Comparação Ensaio X Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T1	53
Figura 4.25 - Comparação Ensaio X Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T2	53
Figura 4.26 - Comparação Ensaio X Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T3	54
Figura 4.27 – Comparação Ensaio X Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T4	54
Figura 4.28 - Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos de Manobra – Transformador T1	55
Figura 4.29 - Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos de Manobra – Transformador T2	55
Figura 4.30 – Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos de Manobra – Transformador T3	56
Figura 4.31 - Comparação Ensaio X Simulação para Impulsos de Manobra – Transformador T4	56
Figura 4.32 – Correção proposta para Transformadores com $CHL > CLT$	57

Figura 4.33 - Comparação Ensaio x Simulação para Impulso Atmosférico – Transformador T2	57
Figura 4.34 - Comparação Ensaio x Simulação para Impulso Atmosférico – Transformador T3	58
Figura 4.35 - Comparação Ensaio x Simulação para Impulso Atmosférico – Transformador T4	58
Figura 4.36 - Comparação Ensaio X Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T2	59
Figura 4.37 - Comparação Ensaio X Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T3	59
Figura 4.38 - Comparação entre Resultado de Ensaio e de Simulação para Surtos Induzidos – Transformador T4	60
Figura 5.1 – Modelo do Enrolamento do Transformador	64
Figura 5.2 – Oscilograma da Aplicação de um Impulso Pleno Reduzido Detalhando a Amplitude Máxima de Corrente	65
Figura 5.3 - Oscilograma da Aplicação do Impulso Pleno Reduzido Detalhando a Amplitude da Corrente para a Cauda do Impulso de Tensão	65
Figura 5.4 – Circuito Utilizado para a Construção da Característica IP x CP	66
Figura 5.5 – Oscilograma: Amplitude Máxima da Corrente	66
Figura 5.6 – Curvas IP X CP para o Gerador na Configuração 2s-3p	67
Figura 5.7 – Curvas IP X CP para o Gerador na Configuração 3s-2p	67
Figura 5.8 – Circuito Utilizado para o Cálculo da Impedância de Surto do Enrolamento	68
Figura 5.9 – Oscilograma: Ponto de Tensão Nula e Valor Máximo da Corrente na Cauda do Impulso	68
Figura 5.10 – Superfície para o Cálculo da Impedância de Surto para o Gerador de Impulsos na Configuração 2s-3p com $R_f = 88 [\Omega]$ e $R_c = 830 [\Omega]$	69
Figura 5.11 - Superfície para o Cálculo da Impedância de Surto para o Gerador de Impulsos na Configuração 2s-3p com $R_f = 76 [\Omega]$ e $R_c = 1300 [\Omega]$	69
Figura 5.12 - Superfície para o Cálculo da Impedância de Surto para o Gerador de Impulsos na Configuração 3s-2p com $R_f = 88 [\Omega]$ e $R_c = 3000 [\Omega]$	70
Figura 5.13 - Superfície para o Cálculo da Impedância de Surto para o Gerador de Impulsos na Configuração 3s-2p com $R_f = 210 [\Omega]$ e $R_c = 1500 [\Omega]$	70
Figura 5.14 - Superfície para o Cálculo da Impedância de Surto para o Gerador de Impulsos na Configuração 3s-2p com $R_f = 280 [\Omega]$ e $R_c = 1500 [\Omega]$	71
Figura 5.15 – Oscilograma do Impulso Pleno Reduzido	73
Figura 5.16 – Oscilograma do Impulso Pleno Reduzido do Transformador TA	74
Figura 5.17 – Oscilograma Detalhando o Pico de Corrente Inicial para uma Aplicação de Impulso Reduzido de Tensão aplicado ao Transformador TA	75
Figura 5.18 – Esquema de ensaio de um Transformador Triângulo – Estrela	75
Figura 5.19 – Resultado da Simulação do Transformador TA	76
Figura 5.20 – Oscilograma do Impulso Pleno Reduzido do Transformador TB	77
Figura 5.21 – Oscilograma Detalhando o Pico de Corrente Inicial para uma Aplicação de Impulso Reduzido de Tensão aplicado ao Transformador TB	77
Figura 5.22 – Resultado da Simulação do Transformador TB	78

Figura 5.23 – Oscilograma do Impulso Pleno Reduzido do Transformador TC _____	79
Figura 5.24 – Modelo do Enrolamento do Transformador com Defeito_____	79
Figura 5.25 – Resultado da Simulação do Transformador TC _____	80
Figura 5.26 – Comparação entre Resultados de Ensaio e de Simulação para o Transformador TA __	81
Figura 5.27 - Comparação entre Resultados de Ensaio e de Simulação para o Transformador TB __	82
Figura 5.28 - Comparação entre Resultados de Ensaio e de Simulação para o Transformador TC __	82

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Modelo de Transformador Desenvolvido em [1] Grupo I _____	7
Tabela 2.2 – Modelo de Transformador Desenvolvido em [1] Grupo II _____	7
Tabela 2.3 – Modelo de Transformador Desenvolvido em [1] Grupo III _____	8
Tabela 2.4 – Modelo de Transformador Desenvolvido em [1] Grupo IV _____	8
Tabela 2.5 – Modelo de Transformador Desenvolvido em [1] – A importância de cada grupo__	9
Tabela 3.1 – Velocidade de Propagação e Impedância de Surto obtidas através de Ensaio de Enrolamentos de Transformadores. _____	16
Tabela 3.2 – Pico da Tensão Transferida Segundo Equações (3.20), (3.222) e (3.23). _____	34
Tabela 4.1 – Principais Parâmetros dos Transformadores Utilizados Neste Estudo _____	61
Tabela 5.1 – Parâmetros do Modelo do Transformador TA _____	76
Tabela 5.2 – Parâmetros do Modelo do Transformador TB _____	78
Tabela 5.3 – Parâmetros do Modelo do Transformador TC _____	80

CAPÍTULO 1

Introdução

A modelagem de componentes do sistema elétrico é uma ferramenta importante na engenharia, pois permite conhecer o comportamento destes no sistema sem a necessidade de retirá-los de operação para a realização de ensaios, o que iria contra a manutenção de bons índices de confiabilidade. Além disto, alguns estudos exigiriam ensaios de grande complexidade.

Nas últimas décadas a tecnologia proporcionou o advento de processadores mais eficientes e, com eles, começaram a surgir programas para simular fenômenos transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, entre outras aplicações para o sistema elétrico. Em tais programas podem ser citados: o EMTP (Electromagnetic Transient Program), que simula transitórios eletromagnéticos, e o ANATEM, programa que realiza estudos de estabilidade angular.

Os modelos dos componentes desenvolvidos, além de viabilizar a “previsão” do comportamento destes frente a alguns fenômenos que ocorrem no sistema, podem ajudar o engenheiro na análise dos resultados de ensaios, evitando, assim, laudos errôneos.

1.1 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos de transformador através de ensaios de recebimento (perdas a vazio e em curto, medição de resistências e capacitâncias) e ensaios de impulso para estudo de Função de Transferência, Surtos Transferidos e um modelo que reproduza o comportamento do transformador durante um ensaio de impulso atmosférico. Os modelos são simulados pelo programa EMTP e os resultados da simulação são comparados com os resultados experimentais.

1.2 – Metodologia

a) Função de Transferência do Transformador

Do ensaio a vazio são obtidas a resistência e indutância de magnetização. Do ensaio de perdas em curto-circuito obtêm-se as indutâncias de dispersão. Medem-se as resistências dos enrolamentos e as capacitâncias do transformador.

Com uma fonte de tensão fixa e frequência variável, obtém-se a relação de transformação e a diferença de fase da tensão de entrada e saída do transformador sob várias frequências.

Obtidos os parâmetros, o modelo é simulado e o resultado é comparado com o obtido do ensaio. Se necessário, são realizadas mudanças no modelo que é novamente simulado e novamente comparado com o resultado experimental.

b) Surto Transferido

Surtos de tensão, que vão desde surtos atmosféricos até surtos de manobra, são aplicados em transformadores através de um gerador de surtos repetitivos. Utilizando o modelo desenvolvido no item anterior, simula-se no EMTP os mesmos surtos aplicados no transformador real e comparam-se os resultados obtidos da simulação com os obtidos experimentalmente.

c) Modelo do Enrolamento para Ensaio de Impulso Atmosférico

No capítulo 5 será mostrado que a forma de onda de corrente pode ser dividida em duas componentes: uma de descarga da capacitância série (própria) dada pelo pico inicial de corrente e outra correspondente à onda viajante, dada pela cauda da forma de onda. Simulando no EMTP os circuitos correspondentes a estas parcelas, obtêm-se curvas e superfícies utilizadas na obtenção dos parâmetros deste modelo.

Os dados a serem utilizados nestas curvas e superfícies vêm do oscilograma do impulso pleno normalizado com valor reduzido. Outro parâmetro do modelo é oriundo da medição de capacitância do transformador.

Depois de simulado o impulso aplicado em um transformador real, o resultado desta simulação é comparado com a forma de onda obtida do ensaio. Este modelo também permite a representação de falhas que acontecem no enrolamento durante os ensaios.

1.3 – Estrutura da Dissertação

No capítulo 2 é feito um estado da arte do modelo utilizado em estudos na frequência industrial (60 Hz) e modelos utilizados em estudos em altas frequências. São discutidas suas aplicações e limitações.

No capítulo 3 discute-se a representação dos enrolamentos e seu acoplamento. Neste capítulo são apresentados a distribuição de tensão observada em dois tipos construtivos diferentes de enrolamento e os resultados de ensaios realizados de modo a verificar como se transfere o surto do enrolamento primário para o enrolamento secundário do transformador. Faz-se neste capítulo uma introdução ao problema na análise de ruídos que podem aparecer durante ensaios de impulso atmosférico.

No capítulo 4 são apresentados os modelos desenvolvidos neste trabalho para a resposta em frequência e surtos transferidos. São mostrados os resultados obtidos da simulação dos modelos e as comparações feitas entre os resultados experimentais e de simulação.

No capítulo 5 é apresentado o modelo detalhado do enrolamento do transformador para impulsos. São apresentadas, a proposta de levantamento de parâmetros utilizados, as simulações feitas e as comparações entre os resultados experimentais e de simulação. No final é apresentada uma conclusão parcial.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Modelos Gerais de Transformadores

Neste capítulo são apresentados os modelos normalmente utilizados nos estudos de transformadores em frequência industrial – entre 50 e 60 Hz – e em alta frequência – como surtos atmosféricos e/ou de manobra. São discutidas também, de forma simplificada, as limitações de cada um dos modelos.

2.1 – Modelo para Estudos em Frequência Fundamental

O modelo para estudos em frequências próximas à industrial é representado pela Figura 2.1, onde são considerados os efeitos das resistências, da dispersão do fluxo magnético dos enrolamentos e da corrente de excitação.

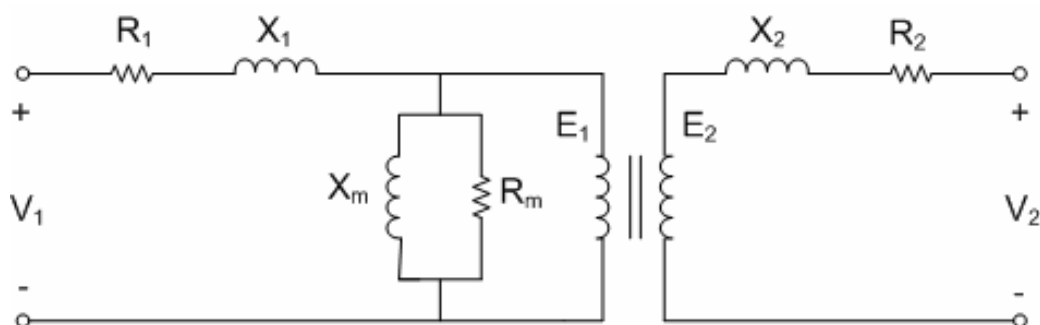


Figura 2.1 – Circuito equivalente do transformador para frequência industrial

No circuito equivalente da Figura 2.1 estão representados:

V1: Tensão no lado de alta tensão – tensão primária;

R1: Resistência do enrolamento primário – resistência do cobre;

X1: Reatância do enrolamento primário (Relativa ao fluxo de dispersão);

Xm: Reatância de magnetização responsável pelo fluxo principal;

- Rm: Resistência de magnetização responsável pelas perdas no núcleo;
- E1: Força eletromotriz do primário;
- E2: Força eletromotriz do secundário;
- X2: Reatância do enrolamento secundário (Relativa ao fluxo de dispersão);
- R2: Resistência do enrolamento secundário;
- V2: Tensão no lado de baixa tensão – tensão secundária..

Os efeitos do fluxo mútuo produzido pela corrente de excitação são representados por R_m em paralelo com X_m . As perdas no núcleo são devidas aos fenômenos de histerese e correntes parasitas de Foucault. Os valores de R_1 , X_1 , R_2 , e X_2 são obtidos dos ensaios em curto e os valores R_m e X_m do ensaio a vazio.

Por não considerar os acoplamentos capacitivos, este modelo não é apropriado para estudos de transferência de surto entre enrolamentos, ou qualquer outro estudo onde possa haver ressonâncias.

2.2 – Modelos para Estudos de Altas Frequências

A modelagem de transformadores para estudos em alta frequência tem sido assunto de amplas discussões.

A Figura 2.2 mostra um modelo de enrolamento para o estudo do desempenho de transformadores frente a surtos atmosféricos [1]. O modelo consiste de uma rede com parâmetros distribuídos onde C , K , L e M representam respectivamente, a capacitância para a terra, capacitância série, indutância própria e indutância mútua, em valores por unidade de comprimento. As perdas magnéticas não são consideradas.

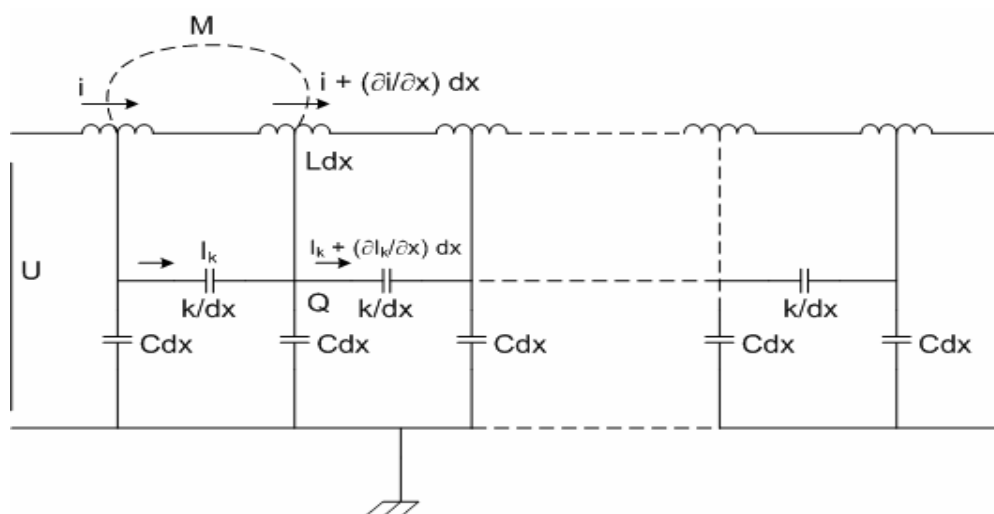


Figura 2.2 – Modelo de transformador desenvolvido em [1]

O “Working Group 33.02”, do “CIGRÉ” – Conselho Internacional para Grandes Sistemas Elétricos propõe alguns modelos de transformadores monofásicos de dois enrolamentos para certas faixas de frequência, onde são observadas as necessidades ou não, de se analisar a transferência de surtos de um enrolamento para outro. Estes modelos e respectivos graus de importância [2] estão representados nas Tabelas 2.1 a 2.5.

Tabela 2.1 – Modelo de transformador desenvolvido em [1] Grupo I


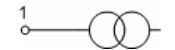
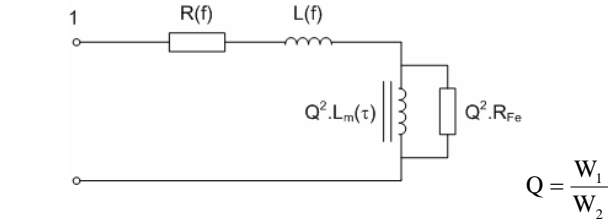
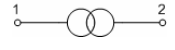
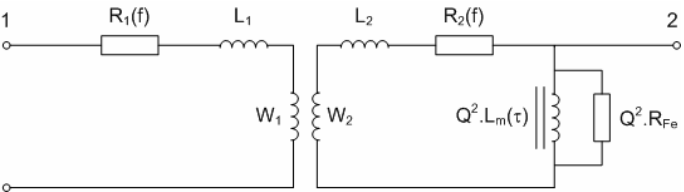
Transformador 	Grupo I – 0,1 Hz ÷ 3 kHz
Sem Transferência de Surto 	 $Q = \frac{W_1}{W_2}$
Com Transferência de Surto 	

Tabela 2.2 – Modelo de transformador desenvolvido em [1] Grupo II


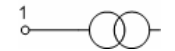
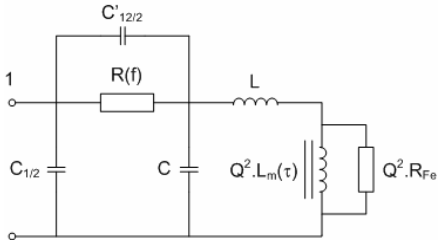

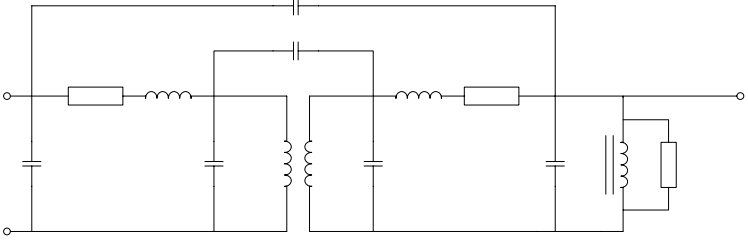
Transformador 	Grupo II – 50/60 Hz ÷ 20 kHz
Sem Transferência de Surto 	 $C \approx C_{1/2} + \frac{C_2}{Q^2} \quad C'_{12} = C_{12}(1 - 1/Q)$
Com Transferência de Surto 	

Tabela 2.3 – Modelo de transformador desenvolvido em [1] Grupo III


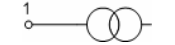
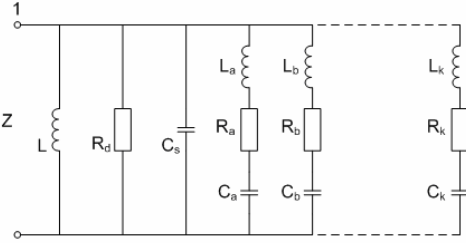

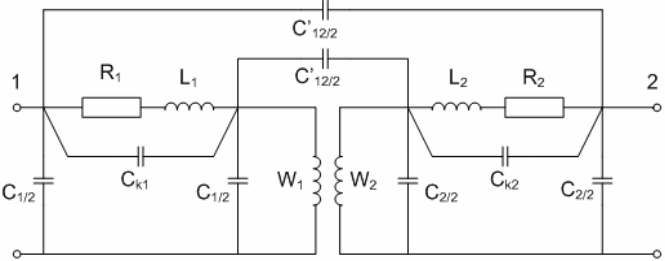
Transformador 	Grupo III – 10 Hz ÷ 3 MHz
Sem Transferência de Surto 	 <p style="text-align: center;"> $Z = Z(f)$ $f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i \cdot C_i}}$ $i = a.....k$ </p>
Com Transferência de Surto 	

Tabela 2.4 – Modelo de transformador desenvolvido em [1] Grupo IV


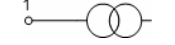
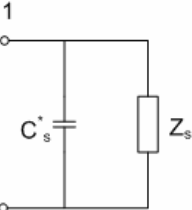

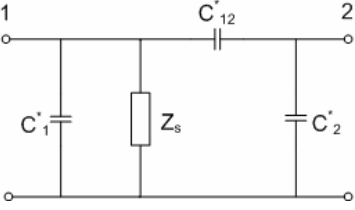
Transformador 	Grupo IV – 100 kHz ÷ 50 MHz
Sem Transferência de Surto 	
Com Transferência de Surto 	 <p style="text-align: right;"> $C_s^* = C_1^* + \frac{C_{12}^* \cdot C_2^*}{C_{12}^* + C_2^*}$ </p>

Tabela 2.5 – Modelo de transformador desenvolvido em [1] – A importância de cada grupo

GRUPO	I	II	III	IV
Impedância de curto circuito	Muito importante	Muito importante	Importante apenas para transferência de surto	Negligenciável
Saturação	Muito importante	Muito importante para energização de transformador e rejeição de carga com aumento da alta tensão. No mais, negligenciável.	Negligenciável	Negligenciável
Perdas série dependente da frequência	Muito importante	Importante	Negligenciável	Negligenciável
Histerese e perdas no ferro	Importante apenas para fenômenos de ressonância	Importante apenas para energização de transformadores	Negligenciável	Negligenciável
Capacitância de acoplamento	Negligenciável	Importante apenas para transferência de surto	Muito importante apenas para transferência de surto	Muito importante apenas para transferência de surto

Nas Tabelas de 2.1 a 2.4:

L: Indutância;

R: Resistência ôhmica;

C: Capacitância;

f: Frequência;

Lm: Indutância de magnetização;

Ψ : Fluxo;

RFe: Replicação de histerese e perdas no ferro;

Z: Impedância medida nos terminais;

Cs: Capacitância de surto;

Zs: Impedância de surto do enrolamento;

Os valores indicados por * são menores que os correspondentes sem *.

Para faixas de frequências mais elevadas (Grupos II a IV), capacitâncias devem ser adicionadas aos parâmetros R-L, nos seguintes locais:

- Entre o núcleo e o enrolamento mais próximo a este;
- Entre os enrolamentos;
- Entre o enrolamento externo e o tanque e

- Entre as indutâncias próprias dos enrolamentos.

Para freqüências muito altas o enrolamento deve ser dividido em várias partes como ilustrado na Figura 2.3. Este procedimento permite representar, com razoável exatidão, os arranjos de enrolamento disco ou cilíndrico.

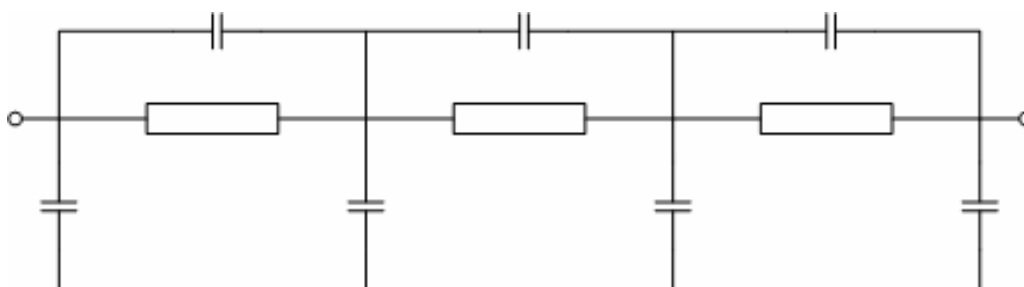


Figura 2.3 – Modelo de alta freqüência do enrolamento

A Figura 2.4 mostra uma seção infinitesimal do modelo com parâmetros distribuídos no domínio da freqüência S , de transformadores monofásicos de dois enrolamentos, utilizado para obter a resposta em freqüência [3]. Este modelo tem como parâmetros a resistência e indutância própria do enrolamento, as capacitâncias para a terra, as capacitâncias entre espiras de cada enrolamento, as indutâncias mútuas e os acoplamentos capacitivos entre os dois enrolamentos.

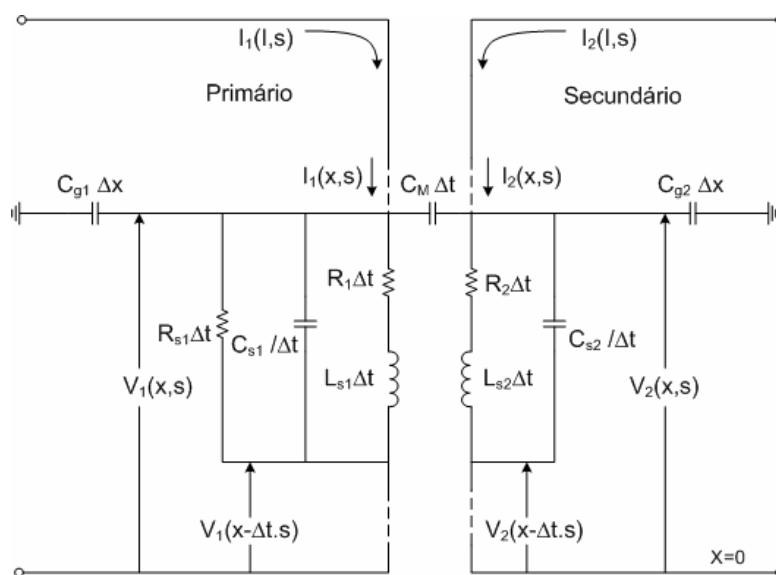


Figura 2.4 – Modelo de seção infinitesimal para um transformador de dois enrolamentos, conforme referencia [3].

A Figura 2.5 mostra o modelo tradicional de transformador para estudo de surtos transferidos. Este modelo e modificações foram analisados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá – LAT-EFEI com base em resultados obtidos em transformadores monofásicos com dois enrolamentos [4]. Os parâmetros

deste modelo são obtidos de ensaios de perdas em vazio, perdas sob carga e medição de resistências e capacitâncias com a Ponte de “Schering”.

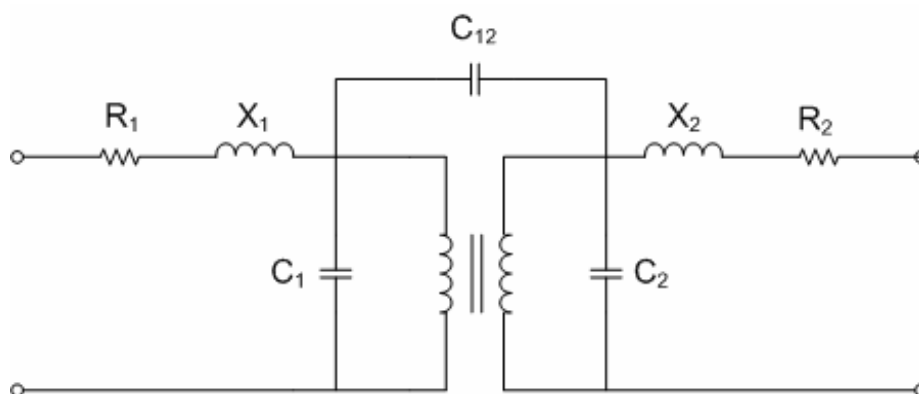


Figura 2.5 – Modelo de transformador utilizado em [4]

A Figura 2.6 mostra a comparação entre um resultado da simulação com o modelo proposto pelo LAT–EFEI e o comportamento verificado experimentalmente.

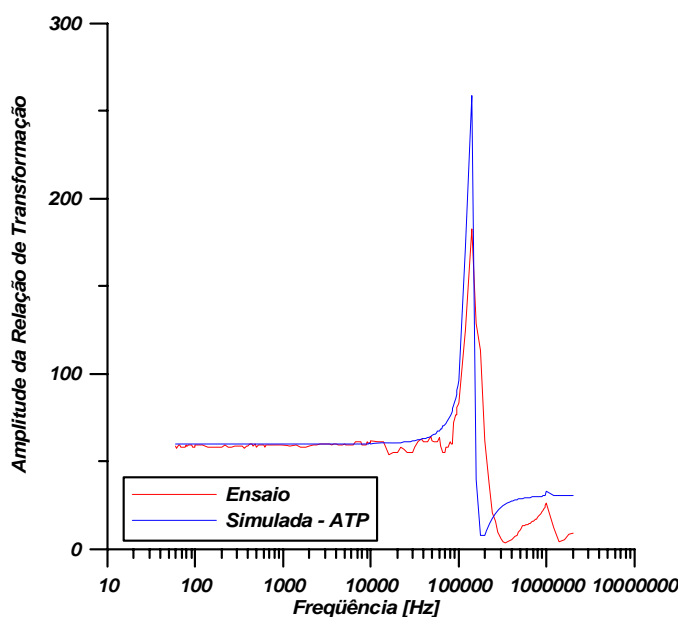


Figura 2.6 – Comparação Ensaio X Simulação do circuito da Figura 2.5

Com base em resultados similares ao mostrado na Figura 2.6, os estudos realizados no LAT–EFEI verificaram que o modelo mostrado Figura 2.5 é um dos mais adequados para o estudo de surtos transferidos, tanto de origem atmosférica quanto de manobra. A comparação entre a resposta deste modelo à aplicação de um surto induzido ($\approx 3,0/10\mu\text{s}$ – tempo de frente/cauda) é mostrada na Figura 2.7.

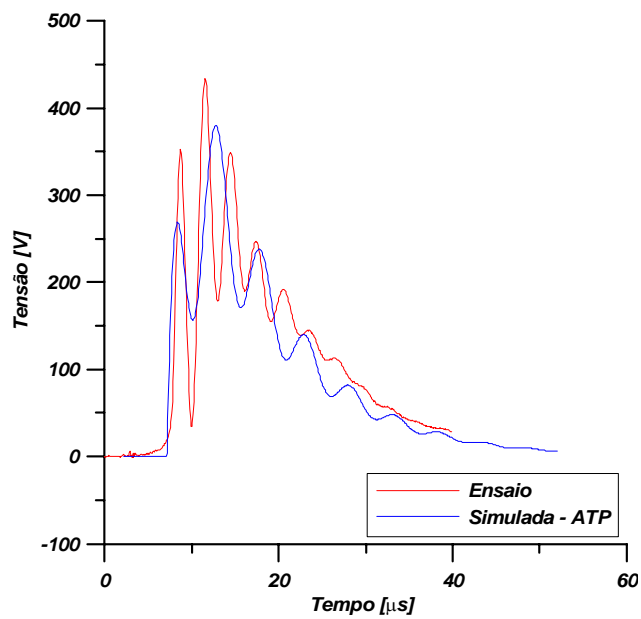


Figura 2.7 – Comparação Ensaio X Simulação da aplicação de um surto induzido

CAPÍTULO 3

Conceitos Básicos sobre a Aplicação de Surtos em Transformadores

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos sobre a modelagem de enrolamentos e o acoplamento de surtos entre os enrolamentos dos transformadores. São discutidos aspectos sobre os resultados dos ensaios, aplicação de impulso atmosférico em transformadores de distribuição, o modo como os impulsos se distribuem ao longo dos enrolamentos, bem como os processos associados aos surtos transferidos. Outro ponto apresentado neste capítulo é a análise de oscilogramas de ensaios de impulso atmosférico em transformadores, onde alguns defeitos correspondentes ao equipamento podem ser confundidos com ruídos presentes no sistema de medição utilizado.

3.1 – Modelos para Enrolamentos de Transformadores

3.1.1 – Modelagem dos Enrolamentos ^[6]

Um surto que se propaga ao longo de uma linha de transmissão ao entrar em um transformador muda significativamente de forma, devido à estrutura não homogênea de seus enrolamentos. Os enrolamentos possuem um comportamento oscilatório e uma frequência natural característica, o que sustenta a hipótese de que a corrente e a tensão podem trafegar em forma de pulsos.

Partindo destas hipóteses, os enrolamentos de um transformador podem ser representados por impedâncias de surto.

Deste modo, seja um enrolamento, em camada única, semelhante ao utilizado em transformadores, como representado na Figura 3.1.

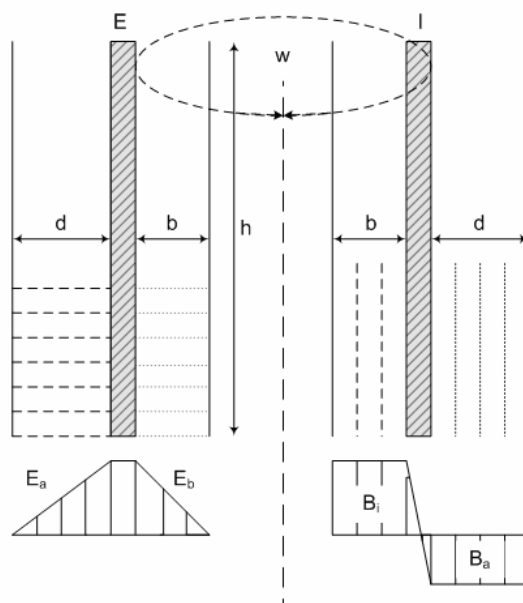


Figura 3.1 – Esquema de um enrolamento de transformador

Neste caso é assumido que o enrolamento possui grande comprimento, bem como a sua distância para o núcleo é muito inferior ao seu diâmetro. Inicialmente, devem ser calculados os valores de capacitância e indutância própria do enrolamento, pois estas são as grandezas básicas para o cálculo da impedância de surto.

Aplicando ao enrolamento uma tensão com amplitude E e sabendo que o comprimento de uma espira é w e h a altura do enrolamento, tem-se que a carga Q acumulada no enrolamento é fornecida pela Equação 3.1:

$$Q = \frac{\epsilon w h}{4\pi v_0^2} E \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{d} \right) \quad (3.1)$$

Onde v_0 é a velocidade da luz no vácuo. Portanto, a capacitância do enrolamento para a terra é:

$$C = \frac{Q}{E} = \frac{\epsilon w h}{4\pi v_0^2} \frac{b+d}{bd} \quad [\cdot 10^9 \text{ Farads}] \quad (3.2)$$

Uma corrente I percorrendo um enrolamento com um número de espiras N produz um fluxo enlaçado dado pela Equação 3.3:

$$\lambda = \frac{4\pi\mu whN^2 I}{b+d} \quad (3.3)$$

Onde μ é a permeabilidade magnética dos espaços isolantes. Portanto, o valor da indutância própria do enrolamento é fornecido pela Equação 3.4:

$$L = \frac{\lambda}{I} = 4\pi\mu \frac{w}{h} N^2 \frac{bd}{b+d} [\cdot 10^9 \text{ em Henrys}] \quad (3.4)$$

Com os valores de capacitância e da indutância própria do enrolamento, conforme Equação 3.5, é obtida a velocidade de propagação dos surtos:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.5)$$

Logo, é possível concluir que a velocidade de propagação depende das propriedades magnéticas e dielétricas do enrolamento. A permeabilidade magnética dos espaços isolantes é unitária ($\mu=1$). Uma vez que em média a constante dielétrica dos óleos isolantes é $\epsilon=3,5$, obtém-se um valor médio de velocidade de propagação de:

$$v = \frac{300}{\sqrt{3.5}} = 160 \text{ m}/\mu\text{s}.$$

A impedância de surto que determina a razão entre a tensão e a corrente dos pulsos trafegantes é determinada a partir das Equações (3.2) e (3.4), conforme a Equação 3.6:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 4\pi v_0 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{N}{h} \frac{bd}{b+d} [\cdot 10^{-9} \text{ em Ohms}] \quad (3.6)$$

Substituindo o valor da constante v_0 :

$$Z = 120\pi \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{N}{h} \frac{b}{1+b/d} [\Omega] \quad (3.7)$$

Considerando valores padrão para a permissividade elétrica e para a permeabilidade magnética, a Equação (3.7) permite concluir que a impedância de

surto depende basicamente das dimensões físicas do enrolamento, principalmente do número de espiras por unidade de comprimento e da distância interna de isolamento. Com respeito à impedância de surto, a distância externa de isolamento atua na forma de um fator de compensação.

A Tabela 3.1 mostra valores medidos e calculados, segundo as equações (3.2), (3.4) e (3.7) para a velocidade de propagação e para a impedância de surto. Os resultados permitem concluir que existe uma concordância razoável entre os resultados obtidos de ensaio e os calculados.

Tabela 3.1 – Velocidade de Propagação e Impedância de Surto obtidas através de Ensaio de Enrolamentos de Transformadores.

	ENROLAMENTO	CALCULADO		MEDIDO	
		v (m/ μ s)	Z (Ω)	v (m/ μ s)	Z (Ω)
<i>STRIGEL</i>	<i>Modelo em Óleo</i>	160	870	155	920
<i>NORIDER</i>	<i>Transformador</i>	160	6530	148	6600
<i>LERSTRUP</i>	<i>Núcleo em Ar</i>	259	9350	260	9020

3.1.2 – Modelagem do Acoplamento dos Enrolamentos [7]

Em um transformador de dois enrolamentos, os enrolamentos primário e secundário possuem uma diferença substancial de número de espiras que estão acopladas magneticamente por sua indutância mútua e eletrostaticamente por sua capacitância mútua. Portanto, para entender a propagação de pulsos é necessário levar em conta os acoplamentos entre os enrolamentos.

A Figura 3.2 mostra um diagrama que leva em consideração as constantes próprias e as mútuas de um transformador monofásico de dois enrolamentos, entre eletrodos aterrados, representando o núcleo e o tanque do transformador.

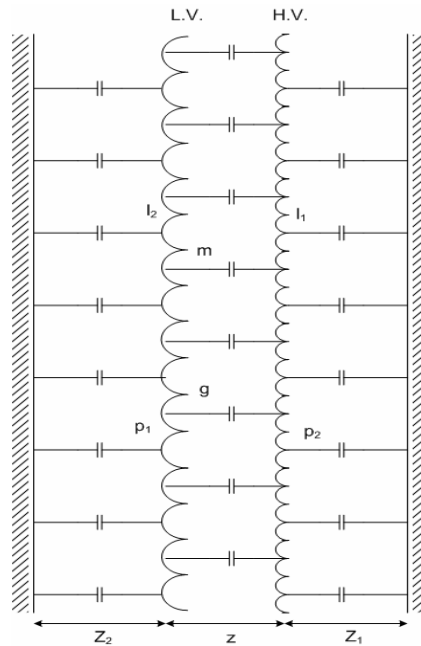


Figura 3.2 – Esquema de um enrolamento de transformador levando-se em conta os acoplamentos – ver Equação 3.10

A solução das equações diferenciais que regem o comportamento de dois enrolamentos mutuamente acoplados permite obter o conjunto de Equações 3.8:

$$\begin{aligned} E_1 &= Z_1 i_1 + z i_2 \\ E_2 &= z i_1 + Z_2 i_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Onde:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{l_1 p_1} \\ z &= \sqrt{m g} \\ Z_2 &= \sqrt{l_2 p_2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Sendo Z_1 impedância de surto do enrolamento de alta tensão, Z_2 impedância de surto do enrolamento de baixa, z impedância de surto mútua e l_1 , p_1 , l_2 , p_2 , m e g constantes por unidade de comprimento dos enrolamentos, onde:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{L_1}{a_1}, l_2 = \frac{L_2}{a_2}, m = \frac{M}{\sqrt{a_1 a_2}} \\ p_1 &= C_1 a_1, p_2 = C_2 a_2, g = G \sqrt{a_1 a_2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Quando se considera um transformador real, como mostrado na Figura 3.3, de forma similar à Equação 3.2, são obtidos os coeficientes de potencial próprios para os enrolamentos, inverso das capacitâncias próprias, conforme mostra a Equação 3.11.

$$p_1 = \frac{E_1}{Q_1} = \frac{4\pi v_0^2}{\epsilon wh} \frac{b_1 d_1}{b_1 + d_1} \cdot 10^{-9} \text{ Farad}^{-1} \quad (3.11)$$

$$p_2 = \frac{E_2}{Q_2} = \frac{4\pi v_0^2}{\epsilon wh} \frac{b_2 d_2}{b_2 + d_2}$$

Na Figura 3.3, a tensão do enrolamento de índice 1 (Alta Tensão) diminui de forma linear até o valor zero junto aos eletrodos aterrados. O enrolamento de índice 2 (Baixa Tensão), por acoplamento eletrostático, apresenta uma tensão definida pela Equação 3.12:

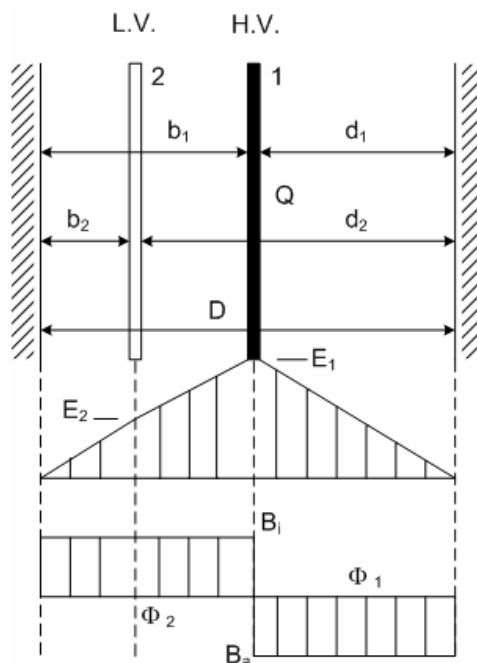


Figura 3.3 – Esquema dos enrolamentos de um transformador e a distribuição dos campos elétricos e magnéticos

$$E_2 = \frac{b_2}{b_1} E_1 = \frac{4\pi v_0^2}{\epsilon wh} \frac{b_2/b_1}{1/b_1 + 1/d_1} Q_1 \quad (3.12)$$

O valor do coeficiente de potencial mútuo é dado pela Equação 3.13:

$$G = \frac{E_2}{Q_1} = \frac{4\pi v_0^2}{\epsilon wh} \frac{b_2 d_1}{b_1 + d_1} \quad 10^{-9} \text{ Farad}^{-1} \quad (3.13)$$

De forma similar à equação (3.4), a indutância própria de cada enrolamento é dada pela Equação 3.14:

$$L_1 = 4\pi\mu \frac{w}{h} N_1^2 \frac{b_1 d_1}{b_1 + d_1} \quad 10^{-9} \text{ Henrys} \quad (3.14)$$

$$L_2 = 4\pi\mu \frac{w}{h} N_2^2 \frac{b_2 d_2}{b_2 + d_2}$$

Onde N_1 e N_2 são o número de espiras dos enrolamentos de AT e BT respectivamente.

A Figura 3.3 mostra campo magnético gerado pelo enrolamento primário, bem como os fluxos enlaçados pelos enrolamentos primário e secundário. O enrolamento secundário envolve somente uma parcela do campo primário, como mostra a Equação 3.15:

$$\lambda_2 = \frac{b_2}{b_1} \lambda_1 = 4\pi\mu w \frac{N_1^2 I_1}{h} \frac{b_2/b_1}{1/b_1 + 1/d_1} \quad (3.15)$$

Portanto, o valor da indutância mútua do enrolamento secundário é dado pela Equação 3.16:

$$M = \frac{\lambda_2}{I_1} = 4\pi\mu \frac{w}{h} N_1 N_2 \frac{b_2 d_1}{b_1 + d_1} \quad 10^{-9} \text{ Henrys} \quad (3.16)$$

Considerando que a velocidade de propagação é constante e introduzindo valores por unidade de comprimento de enrolamento são obtidos os três valores de impedância de surto, conforme mostra o conjunto de Equações 3.17:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 4\pi v_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{N_1}{h} \frac{b_1 d_1}{D}} \\
 Z_2 &= 4\pi v_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{N_2}{h} \frac{b_2 d_2}{D}} \quad 10^{-9} \text{ Ohms} \quad (3.17) \\
 z &= 4\pi v_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\sqrt{N_1 N_2}}{h} \frac{b_2 d_1}{D}}
 \end{aligned}$$

As Equações 3.17 mostram que as impedâncias de surto próprias e mútuas dependem do número de espiras por unidade de comprimento dos enrolamentos e das características físicas dimensionais. A partir destas equações é possível obter a razão entre a impedância de surto mútua e as impedâncias de surto próprias, conforme mostram o conjunto de Equações 3.18.

$$\begin{aligned}
 \frac{z}{Z_1} &= \sqrt{\frac{N_2}{N_1} \frac{b_2}{b_1}} \\
 \frac{z}{Z_2} &= \sqrt{\frac{N_1}{N_2} \frac{d_1}{d_2}}
 \end{aligned} \quad (3.18)$$

A partir das Equações 3.8 e considerando somente surtos aplicados no enrolamento de alta, ou seja, $i_2 = 0$ é possível obter as Equações 3.19.

$$\begin{aligned}
 E_1 &= Z_1 i_1 \\
 E_2 &= z i_1
 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Com o auxílio das Equações 3.18 é obtida a Equação 3.20 relativa ao surto transferido da alta para a baixa tensão e, de modo similar, para o enrolamento de baixa, ou seja, com $i_1 = 0$ a Equação 3.21 relativa ao surto transferido da baixa para a alta tensão.

$$E_2 = \frac{z}{Z_1} E_1 = \sqrt{\frac{N_2}{N_1} \frac{b_2}{b_1}} E_1 \quad (3.20)$$

$$E_1 = \frac{z}{Z_2} E_2 = \sqrt{\frac{N_1}{N_2} \frac{d_2}{d_1}} E_2 \quad (3.21)$$

Nas Equações 3.20 e 3.21 é possível observar que o acoplamento para surtos transferidos é proporcional à raiz quadrada da razão entre o número de espiras dos

enrolamentos – Relação de Transformação. Por sua vez, o acoplamento em regime permanente é diretamente proporcional à razão entre o número de espiras. Considerando que a relação entre os níveis básicos de isolamento frente a impulsos para os enrolamentos de alta e baixa tensão é sempre inferior à relação entre as tensões nominais em frequência industrial destes enrolamentos, não ocorrem problemas quando impulsos são transferidos do enrolamento de alta para o de baixa tensão. No entanto, isto apresenta um problema em potencial quando de impulsos transferidos do enrolamento de baixa para o de alta tensão.

As razões de acoplamento entre espiras nas Equações 3.20 e 3.21 são adicionalmente ponderadas por um fator geométrico associado a distâncias. A razão entre as distâncias internas b é sempre muito inferior à unidade. No entanto, a razão entre as distâncias externas d apresenta um valor pouco inferior à unidade. Deste modo, considerando que a maioria dos surtos atinge o enrolamento de alta tensão, para evitar altas taxas de transmissão de surtos do lado de alta para o lado de baixa tensão, é preferível construir o transformador com o enrolamento interno de baixa e o enrolamento externo de alta, o que é prática usual na construção de transformadores.

Enrolamentos em panqueca intercalados, como o mostrado na Figura 3.4, também satisfazem o diagrama geral de acoplamentos apresentado na Figura 3.2 e podem ser tratados da mesma maneira que os enrolamentos cilíndricos concêntricos. Entretanto, o efeito da subdivisão em seções parciais, é muito mais pronunciado. Logo, as interações mútuas entre os enrolamentos primários e secundários são muito mais intensas, devido à proximidade física do intercalamento. Isto explica porque os transformadores, especialmente os de potência, não são mais construídos com enrolamentos intercalados, pois este tipo de enrolamento apresenta uma alta taxa de transferência de tensão para surtos dos enrolamentos de alta tensão para o enrolamento de baixa.

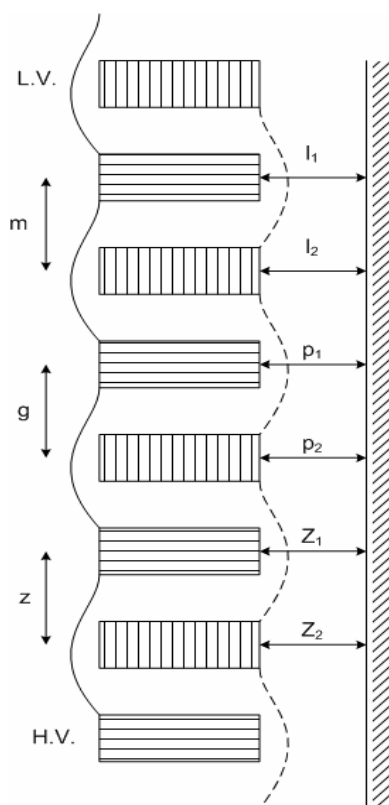


Figura 3.4 – Esquema de enrolamento tipo panqueca e seus acoplamentos

3.2– Resultados de Ensaios

Os fenômenos relativos a propagação de impulsos nos transformadores podem ser investigados com o auxílio de vários equipamentos. No entanto, quando se utilizam de geradores de impulso de alta tensão existe sempre a possibilidade de se impor danos aos enrolamentos. Deste modo, quando se pretende fazer ensaios de forma repetitiva, principalmente para levantamento de parâmetros, surtos transferidos e distribuição de tensão nos enrolamentos são utilizados geradores de surtos repetitivos.

3.2.1 – Gerador de Surtos Repetitivos

O gerador de surtos repetitivos produz surtos de tensão de baixa amplitude, permitindo, de forma rápida e eficiente, variar a frente e a cauda da onda de tensão através de valores de resistências e capacitâncias.

Neste trabalho foi utilizado um gerador de surtos repetitivos Haefely Tipo 48, mostrado na Figura 3.5, para os estudos de distribuição de tensão no enrolamento de alta tensão e de surtos transferidos para o enrolamento de baixa tensão de transformadores monofásicos de dois enrolamentos.



Figura 3.5 – Gerador de surtos repetitivos

O modelo do gerador de surtos utilizado nas simulações deste trabalho é mostrado na Figura 3.6. Onde R_E é a resistência de cauda, R_D a resistência de frente, C_F é a capacitância de impulso e C_S a capacitância de carga do gerador.

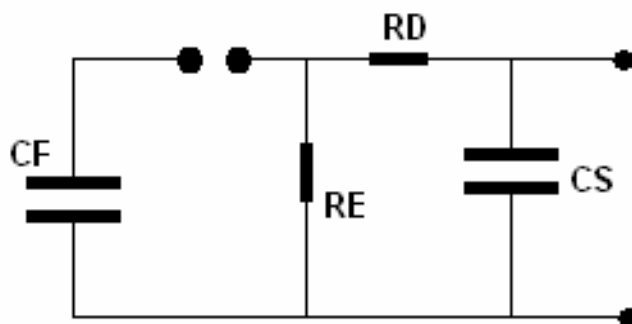


Figura 3.6 – Modelo do gerador de surtos utilizado em simulações

3.2.2 – Aplicação de Impulsos Atmosféricos e Distribuição de Tensão nos Enrolamentos

Os ensaios de impulsos atmosféricos têm como objetivo verificar a integridade física do isolamento de um transformador caso este seja solicitado por surtos de origem atmosférica. Nestes ensaios são aplicados valores de tensão elevados. Caso o enrolamento possua problemas de isolamento devidos à falha na fabricação ou de outra natureza, apresenta, entre outros, rompimento do isolamento entre espiras de um enrolamento ou entre os enrolamentos de alta tensão e de baixa tensão.

As normas de ensaio publicadas pela ABNT estipulam a forma do impulso aplicado – 1,2 μ s de frente e 50 μ s de cauda. Os valores de crista para cada nível de isolamento e a seqüência das aplicações dos impulsos.

A análise do comportamento e desempenho do isolamento do transformador é feita através da comparação dos oscilogramas dos impulsos plenos, cortados e reduzidos. Se for detectada alguma diferença significativa entre os oscilogramas ou se ocorrer alguma evidência nítida de descarga durante o ensaio, o transformador é considerado reprovado.

A Figura 3.7 mostra, da esquerda para direita, os oscilogramas de um impulso pleno reduzido e de um impulso pleno específico, aplicados a um transformador trifásico de 75 kVA e NBI de 95 kV. No canal 1 é registrado o oscilograma de tensão do impulso aplicado e o canal 2 mostra o oscilograma da corrente que passa pelo shunt.

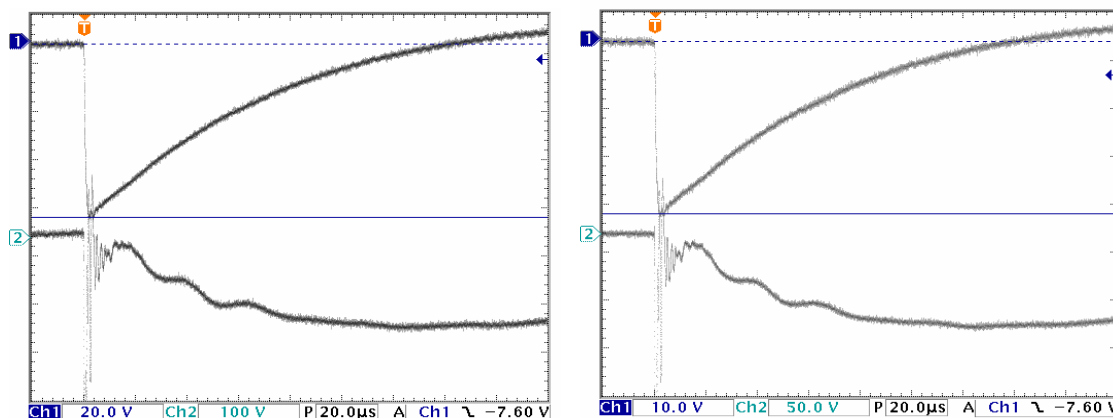


Figura 3.7 – Impulso pleno reduzido e primeiro impulso pleno especificado aplicados a um transformador trifásico de 75 kVA – NBI 95 kV

Comparando estas formas de onda, nota-se que estas duas aplicações não apresentaram diferenças. Logo, este transformador, pelo menos no que tange esta seqüência de ensaios, pode ser considerado como adequado.

Por sua vez, a Figuras 3.8 mostra os oscilogramas de um impulso pleno reduzido e de um impulso pleno específico, aplicados a um transformador monofásico de 10 kVA e NBI 125 kV. Nestes oscilogramas é possível observar que existem sinais no primeiro impulso pleno, provavelmente associados à falhas entre espiras.

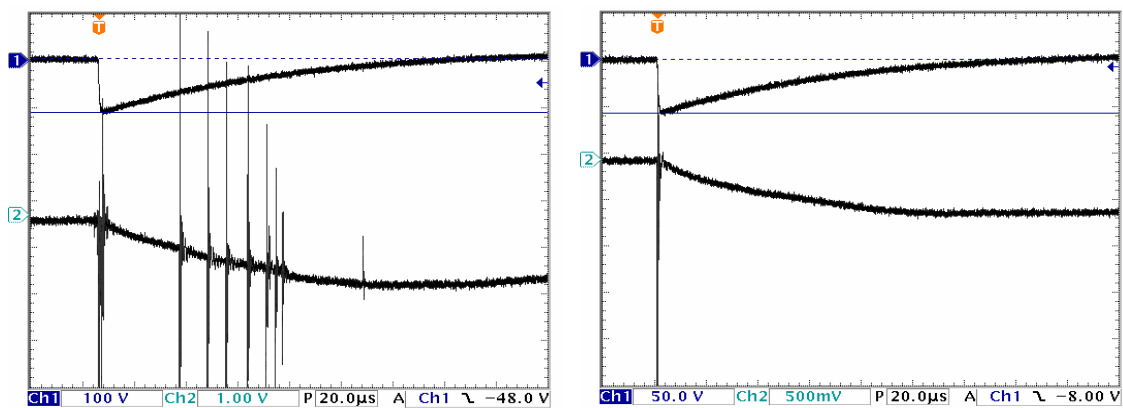


Figura 3.8 – Impulso pleno reduzido e primeiro impulso pleno especificado aplicados em um transformador monofásico de 10 kVA – NBI 125 kV

Como anteriormente mencionado um surto muda de forma ao entrar em um transformador devido à estrutura não homogênea dos enrolamentos. Esta mudança de forma pode ser verificada utilizando um gerador de surtos repetitivos, como o mostrado na Figura 3.5. Nestes casos, é conveniente que os transformadores sejam construídos com um enrolamento de alta com várias derivações de fácil acesso. Uma vez que se trabalha com níveis de tensão reduzidos, da ordem máxima de 1000 Volts é possível registrar as formas de tensão em vários pontos do enrolamento. Na extrapolação e cálculo dos valores das tensões desenvolvidas, quando da aplicação de um impulso com amplitude normalizada considera que os fenômenos observados são lineares.

O objetivo desta análise é verificar, nas fases de projeto, se a distribuição de tensão ao longo dos enrolamentos, que idealmente deve ser linear, não resulta em gradientes de potencial capazes de resultar em falhas dielétricas. De modo complementar os resultados são utilizados para aferir a fidelidade dos modelos utilizados para simulações quando o objetivo é determinar a influência de chaveamentos externos no desempenho dielétrico dos transformadores de potência.

Neste trabalho foram registradas as distribuições de tensão em dois transformadores monofásicos com enrolamentos de tipos construtivos diferentes (bobina contínua e tipo panqueca). As Figuras 3.9 e 3.10 mostram as formas obtidas deste ensaio.

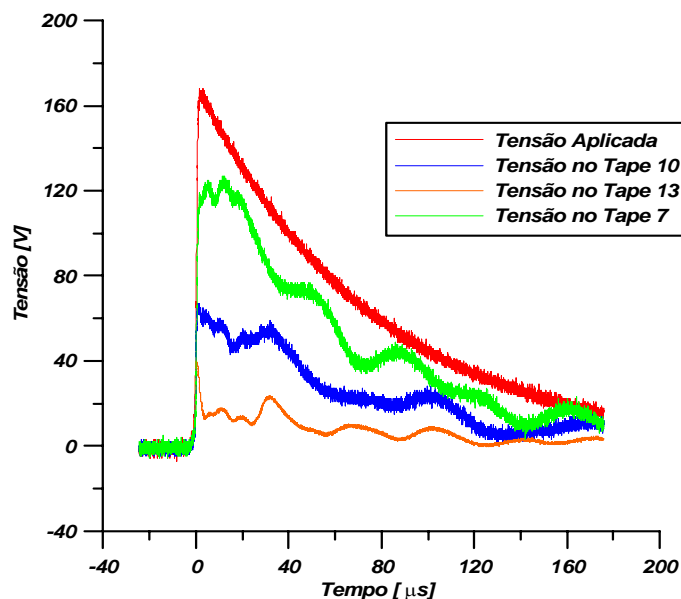


Figura 3.9 – Distribuição de Tensão em um Enrolamento de Bobina Contínua

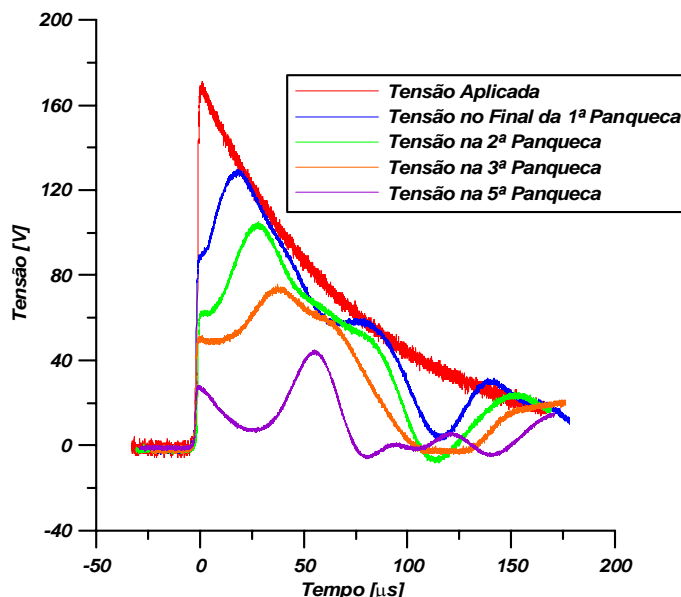


Figura 3.10 – Distribuição de tensão em um enrolamento de bobinas em panqueca

Para uma mesma forma aplicada, um impulso atmosférico, pode-se verificar que nos enrolamentos tipo contínuo ocorre uma atenuação da tensão a medida que o impulso viaja através do enrolamento, enquanto que nos enrolamentos tipo panqueca observa-se atenuação da tensão e fortes oscilações que resultam em um atraso na crista de maneira aproximadamente exponencial. Este atraso é associado a diferença entre as capacitâncias próprias dos enrolamentos que por sua vez implicam em concentração de tensões na entrada dos enrolamentos.

3.2.3 – Surtos Transferidos

Quando uma descarga atmosférica incide diretamente em uma linha de distribuição ou algum ponto em suas proximidades, ou ainda quando um elemento do sistema é manobrado são injetados transitórios de tensão e corrente. Estes transitórios, ao trafegar pelas linhas, podem atingir os transformadores e neste, em específico, são transferidos do enrolamento de alta para o de baixa tensão. Dependendo das características do transformador, este surto pode ou não superar os limites de isolamento dos equipamentos instalados nas redes de baixa tensão o que provoca falha ou desligamento de consumidores.

De modo a prover uma base para a compreensão destes fenômenos foram aplicados impulsos de tensão em transformadores monofásicos registrando-se as respostas nos terminais do enrolamento secundário. Deste modo, foram aplicados: impulsos atmosféricos (1,2/50 μ s), surtos induzidos (\approx 3/10 μ s) e surtos de manobra (\approx 50/100 μ s). Para estas condições são mostrados resultados de surtos transferidos para quatro transformadores monofásicos.

a) Impulso Atmosférico

As Figuras 3.11 a 3.14 mostram a forma do impulso atmosférico aplicado canal 1 e a resposta obtida nos terminais do secundário canal 2.

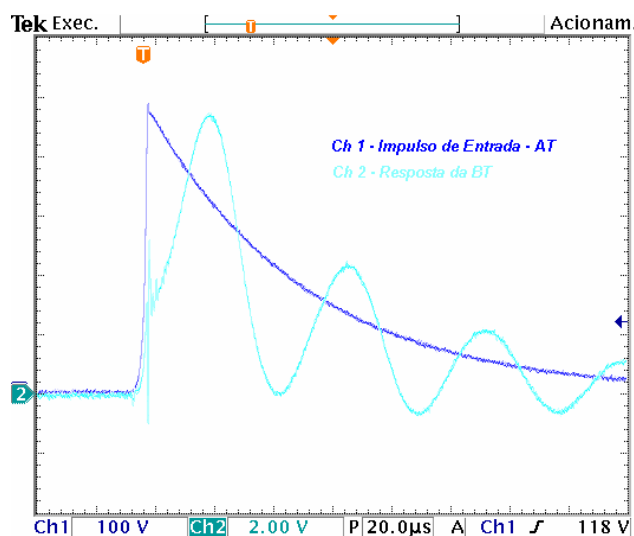


Figura 3.11 – Impulso de tensão aplicado no transformador T1

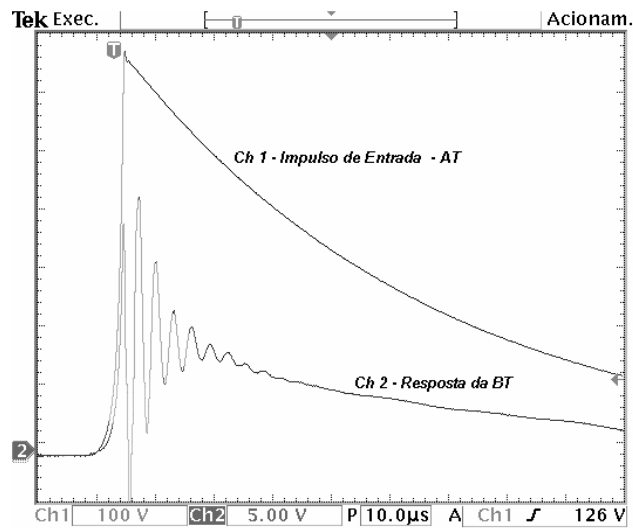


Figura 3.12 – Impulso de tensão aplicado no transformador T2

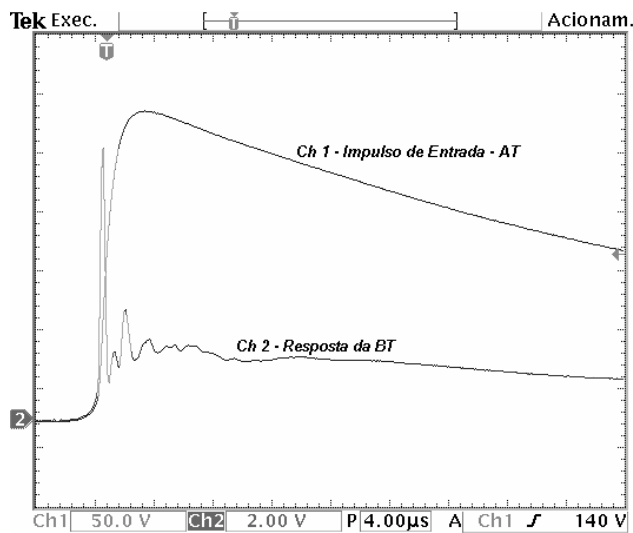


Figura 3.13 – Impulso de tensão aplicado no transformador T3

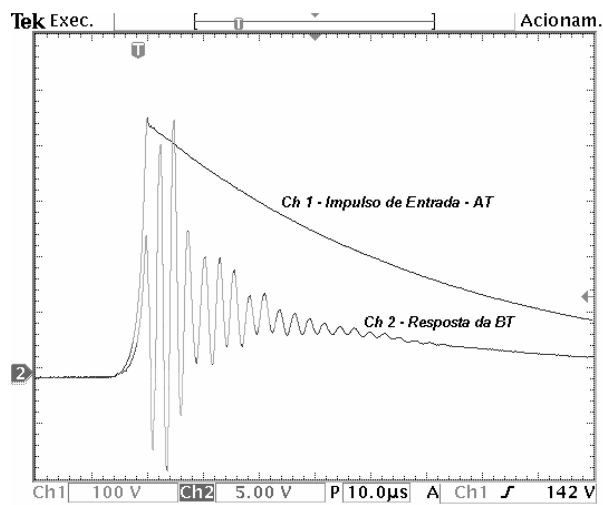


Figura 3.14 – Impulso de tensão aplicado no transformador T4

Nestes casos é possível observar que para impulsos com a frente rápida, como no caso de impulsos atmosféricos, os transformadores T1 e T3 apresentaram surtos transferidos com comportamento similar, mas T3 apresentou oscilações amortecidas com frequência maior do que a observada em T1. Os transformadores T2 e T4 apresentaram surtos transferidos com comportamento diferente dos demais. As razões entre as amplitudes da tensão aplicada e a transferida são: 0,0323; 0,0196; 0,048 e 0,0354 respectivamente.

b) Surtos Induzidos

As Figuras 3.15 a 3.18 mostram impulsos aplicados, representativos de formas de surtos induzidos, e as tensões transferidas nos terminais do enrolamento de baixa tensão para os transformadores T1 a T4. Como pode ser observado nestas Figuras, os transformadores T1 e T3 apresentaram tensões transferidas com comportamentos semelhantes. T1 apresenta um maior amortecimento da tensão e T3 apresenta a maior frequência de oscilação. De maneira similar ao observado para o caso de aplicação de impulsos atmosféricos, T2 e T4 apresentaram tensões transferidas com comportamento diferente dos demais. Nota-se que a tensão transferida no transformador T2 apresenta comportamento oscilatório que se estende ao longo da cauda do impulso de entrada. E o transformador T4 apresenta um forte e rápido amortecimento. As razões entre as amplitudes da tensão aplicada e a transferida são: 0,0245; 0,0021; 0,0272 e 0,0223 respectivamente.

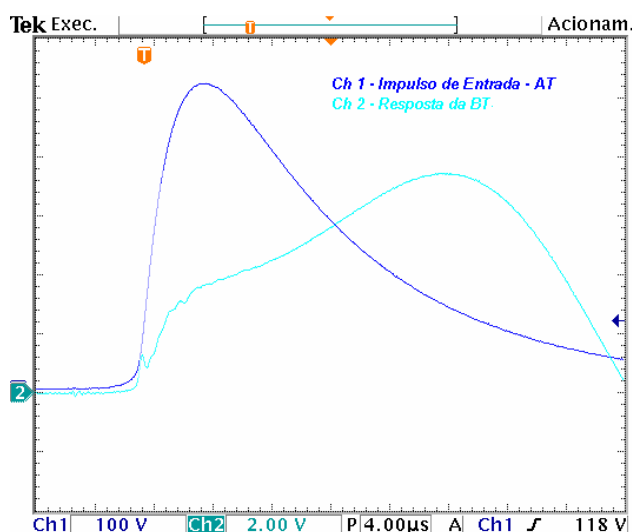


Figura 3.15 – Impulso de tensão aplicado no transformador T1

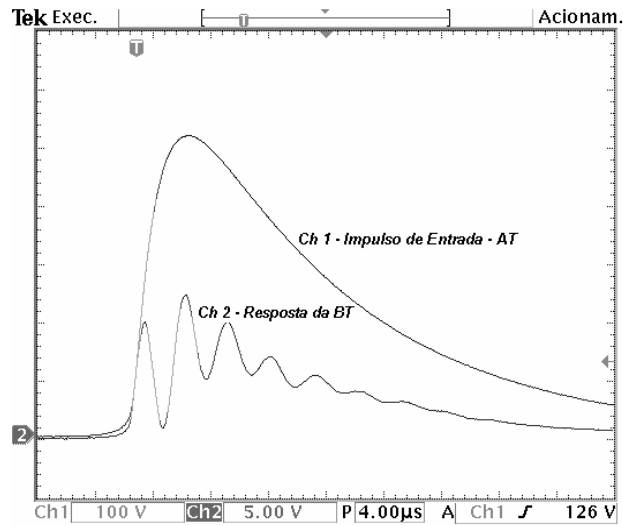


Figura 3.16 – Impulso de tensão aplicado no transformador T2

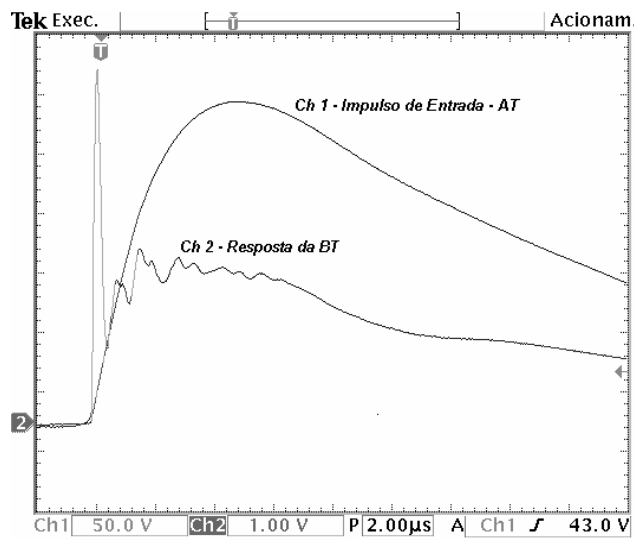


Figura 3.17 – Impulso de tensão aplicado no transformador T3

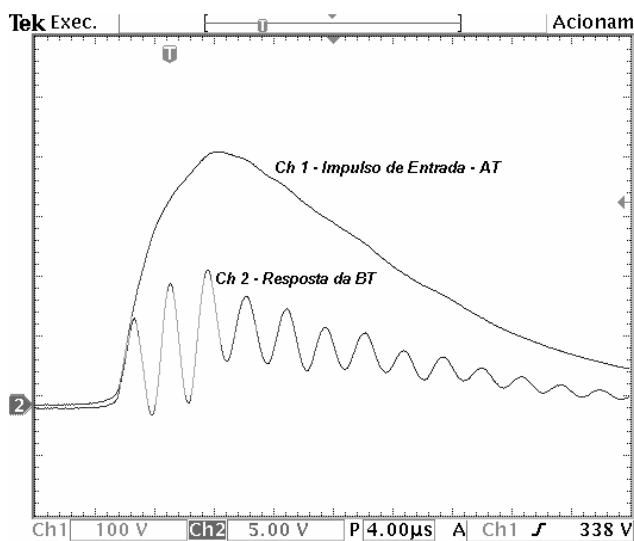


Figura 3.18 – Impulso de tensão aplicado no transformador T4

c) Surtos de Manobra

As Figuras de 3.19 a 3.22 mostram impulsos aplicados, representativos de surtos de manobra e, as tensões transferidas nos terminais do enrolamento de baixa tensão para os transformadores T1 a T4.

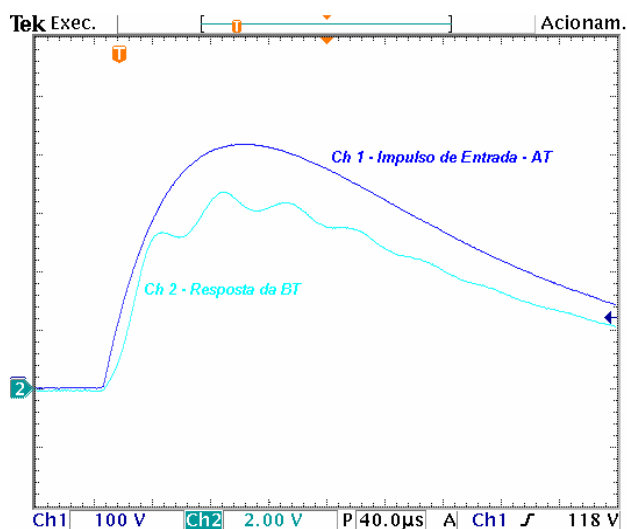


Figura 3.19 – Impulso de tensão aplicado no transformador T1

As observações em termos de amortecimento da tensão transferida para os casos de impulsos atmosféricos e de surtos induzidos são válidas no caso de surtos de manobra. No entanto, estes fenômenos não aparecem nos oscilogramas devido à escala de tempo adotada.

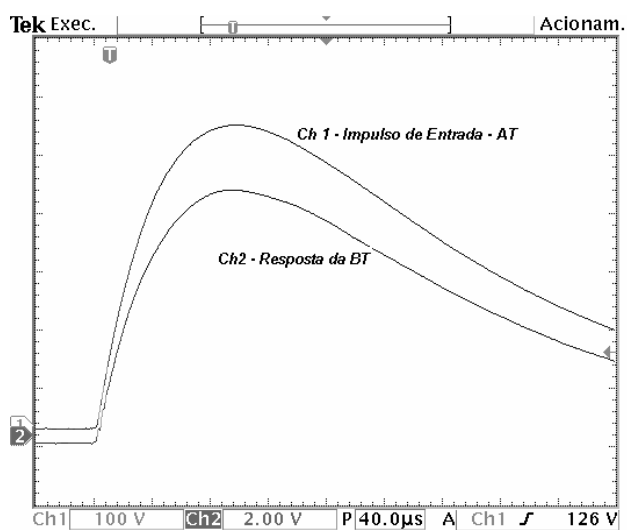


Figura 3.20 – Impulso de tensão aplicado no transformador T2

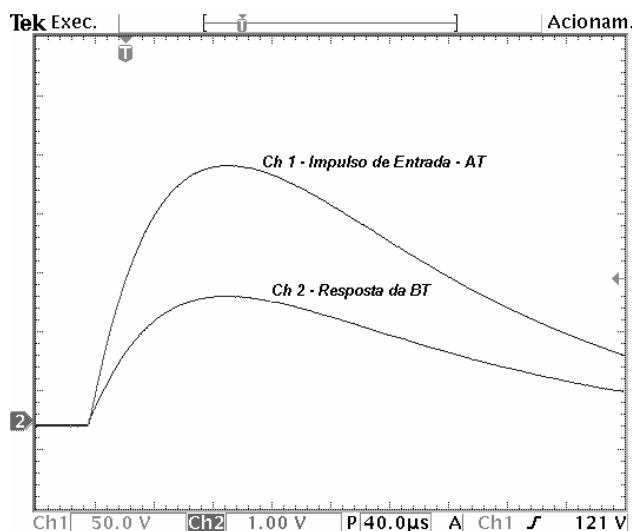


Figura 3.21 – Impulso de tensão aplicado no transformador T3

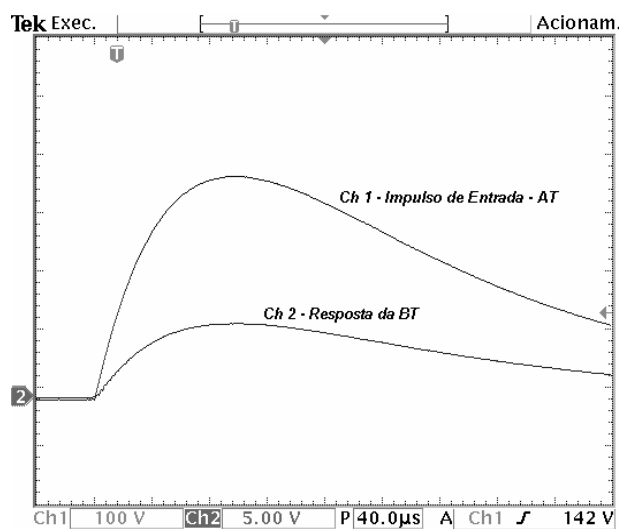


Figura 3.22 – Impulso de tensão aplicado no transformador T4

Também foram observadas oscilações na crista da tensão transferida do transformador T2, mas estas oscilações são rapidamente amortecidas. As razões entre as amplitudes da tensão aplicada e a transferida são: 0,0165; 0,0138; 0,0160 e 0,0100.

d) Comentários Gerais

As Figuras 3.13 a 3.24 mostram que os transformadores T1 e T3 apresentaram comportamentos semelhantes. Entretanto, os transformadores T2 e T4 apresentaram comportamento totalmente diferente. Isto se deve não somente à característica construtiva, mas também às capacitâncias próprias e de acoplamento entre os

enrolamentos dos transformadores. Neste ponto é conveniente ressaltar que os dados construtivos destes transformadores não são conhecidos.

De um modo geral, as equações (3.22) e (3.23) são utilizadas para calcular a amplitude das tensões transferidas para impulsos com frente rápida e surtos de manobra, respectivamente.

$$\frac{U_L}{U_H} = \frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L} \quad (3.22)$$

$$\frac{U_L}{U_H} = \frac{n_L}{n_H} \quad (3.23)$$

Onde: C_{HL} é a capacitância entre enrolamentos, C_L a capacitância entre o enrolamento de baixa tensão e a terra, e $\frac{n_L}{n_H}$ a relação de transformação.

Considerando os dados obtidos durante os ensaios, é possível gerar os dados mostrados na Tabela 3.2.

Pode-se notar que o transformador T2 não apresentou nenhuma concordância entre os resultados de ensaio e os obtidos por cálculo. Com um ajuste adequado da relação entre as distâncias de isolamento do enrolamento de baixa para a terra e o enrolamento de alta alguma das razões de tensão podem ser ajustadas. Os transformadores T3 e T4 obtiveram uma concordância satisfatória para surtos de manobra. Considerando os parâmetros da Equação 3.20 a razão de tensões para surtos induzidos para o transformador T4 pode ser considerada como adequada. Esta afirmativa é razoavelmente válida também para a razão entre as amplitudes das tensões para impulsos atmosféricos. O transformador T1 obteve uma concordância razoável para todos os casos analisados.

Tabela 3.2 – Pico da Tensão Transferida Segundo Equações (3.20), (3.222) e (3.23).

T_1	ATMOSFÉRICO	INDUZIDO	MANOBRA	SURTOS TRANSFERIDOS [#]
MEDIDO	0,0323	0,0245	0,0165	.-
CALCULADO	0,0323	0,0323	0,0166	0,0322
T_2	ATMOSFÉRICO	INDUZIDO	MANOBRA	SURTOS TRANSFERIDOS [#]
MEDIDO	0,0196	0,0021	0,0138	.-
CALCULADO	0,9100	0,9100	0,0307	0,0438
T_3	ATMOSFÉRICO	INDUZIDO	MANOBRA	SURTOS TRANSFERIDOS [#]
MEDIDO	0,0481	0,0272	0,0160	.-
CALCULADO	0,0679	0,0679	0,0172	0,0327
T_4	ATMOSFÉRICO	INDUZIDO	MANOBRA	SURTOS TRANSFERIDOS [#]
MEDIDO	0,0354	0,0223	0,010	.-
CALCULADO	0,897	0,897	0,0092	0,0239

- Na Equação 3.20 foi utilizada, de forma arbitrária, a relação $b_1 = 4 b_2$.

3.3 – Problemas de Ruídos/Defeitos em Ensaios de Impulso Atmosférico

Os ensaios de impulso atmosféricos têm como objetivo verificar a integridade física do isolamento de um transformador caso este seja solicitado por surtos de origem atmosférica. Para esta análise são registrados os oscilogramas de tensão aplicada e corrente que se desenvolve nos enrolamentos sob ensaio. No entanto, estas análises são muitas vezes extremamente subjetivas, pois dependem muito da experiência do analista sendo que normalmente alguns sinais que aparecem nas formas de corrente geram erros na interpretação dos resultados. Os principais pontos de conflito neste caso são associados a como é possível diferenciar a ocorrência de curtos entre espiras, da presença de corona e da existência de ruídos de medida.

As Figuras 3.23 e 3.24 mostram os oscilogramas de ensaio de dois transformadores diferentes. Na Figura 3.23 não há sinais nas formas de tensão e de corrente já Figura 3.24 aparecem alguns sinais em alta frequência. A análise do primeiro oscilograma mostra de forma clara que o transformador não apresenta falhas no enrolamento ensaiado. Ao analisar o segundo oscilograma, um inspetor pode associar estes sinais com oscilações de alta frequência induzidas no sistema de medição. No entanto, um segundo inspetor pode afirmar que os sinais são realmente indícios de falha no transformador.

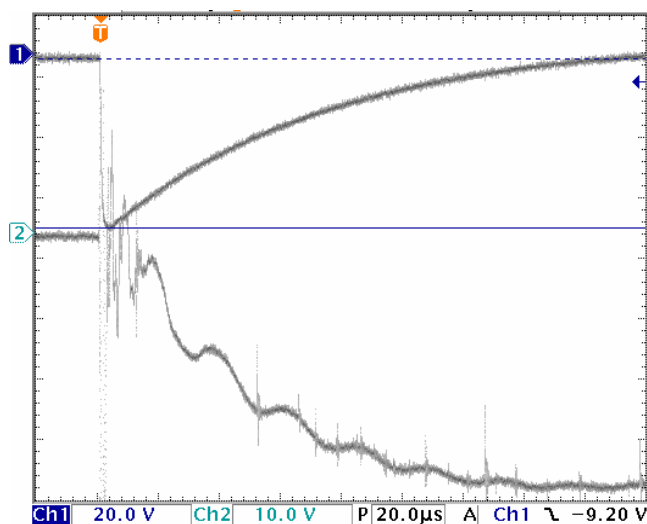


Figura 3.23 – Impulso pleno reduzido sem sinais

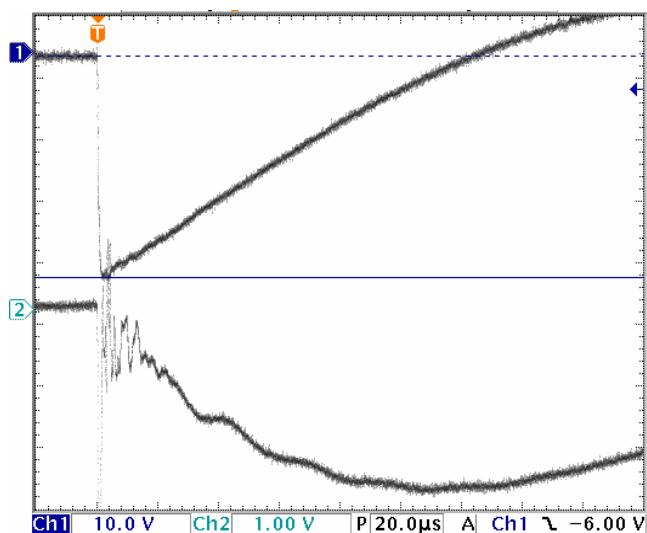


Figura 3.24 – Impulso pleno reduzido com alguns sinais

Os sinais de falha se identificados corretamente indicam para o fabricante o nível de gravidade do defeito, bem como, a sua posição ao longo do enrolamento. Por exemplo, se nos oscilogramas de ondas plenas forem identificadas oscilações de alta freqüência superpostas no traço da corrente, sem modificação da forma, pode ser a indicação de falha no aterramento do núcleo ou ocorrência de descarga parcial nas buchas do transformador [8]. Quando associadas às modificações no modo de oscilação da corrente nos oscilogramas de corrente para impulsos cortados, estas oscilações podem ser atribuídas à presença de curtos entre espiras.

Falhas de aterramento ou imperfeições nas conexões do circuito de ensaio podem ser identificadas por mudanças aleatórias na corrente, indicadas por pequenos pico ou oscilações rápidas. [8]

CAPÍTULO 4

Propostas para Modelagem de Transformadores

Este capítulo discute os modelos de transformadores desenvolvidos como parte do estudo das Funções de Transferência para os Transformadores – FTT e da análise de surtos transferidos. São apresentados os resultados das simulações, bem como as comparações entre os resultados dos ensaios e os das simulações realizadas.

4.1 – Resposta em Frequência

Os estudos sobre respostas em frequência de transformadores foram baseados em ensaios e simulações realizadas em transformadores monofásicos de dois enrolamentos de fabricação e projetos diferentes.

A Função de Transferência do Transformador – FTT, obtida através de ensaios é a variação da relação de transformação, em módulo e fase, com a frequência da tensão aplicada. Deste modo, com uma fonte de frequência variável é aplicada ao transformador sob ensaio uma tensão com módulo constante e frequência variável. No Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá estes ensaios são realizados para uma faixa de frequência entre 60 Hz e 2 MHz com os transformadores com carcaça aterrada.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a FTT em módulo e fase para o transformador T1 e as Figuras 4.3 e 4.4 para o transformador T2.

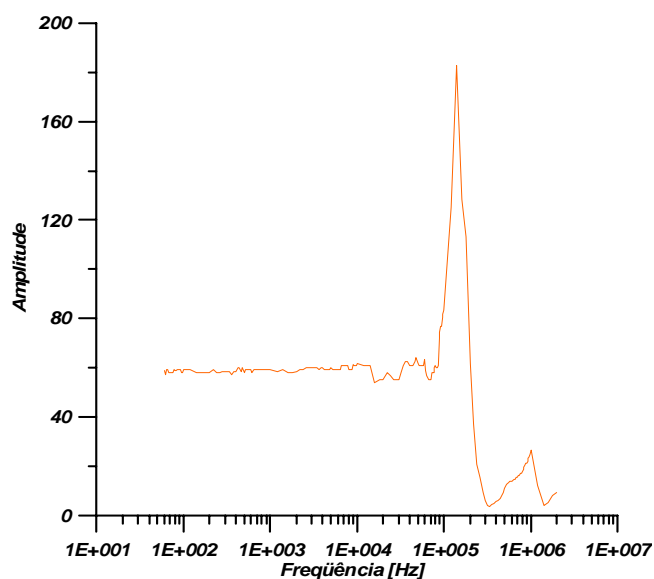


Figura 4.1 – Função de transferência – FTT – Transformador T1 – Amplitude

Conforme mostra a Figura 4.1 ocorre uma “ressonância” para 140 kHz. Neste caso, a relação de transformação atinge seu valor máximo, ou seja, 182,69. No decorrer do ensaio foi notada a presença de distorções harmônicas nos sinais de entrada e saída entre 140 kHz a 1,2 MHz.

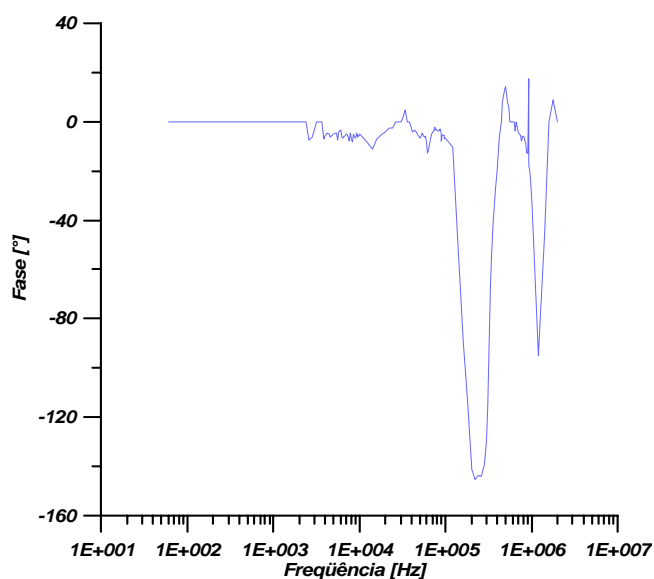


Figura 4.2 - Função de transferência – FTT – Transformador T1 – Fase

Nas Figuras 4.3 e 4.4 foram observados comportamentos não esperados. Não foi observado um pico de ressonância bem definido, bem como ocorreu uma série de oscilações não identificadas na fase da FTT. O comportamento observado pode ser devido a uma falha interna no transformador. A causa destas distorções não foi verificada, pois este trabalho não tem por objetivo associar os modelos desenvolvidos

e estudados com uma determinada característica construtiva de transformador.

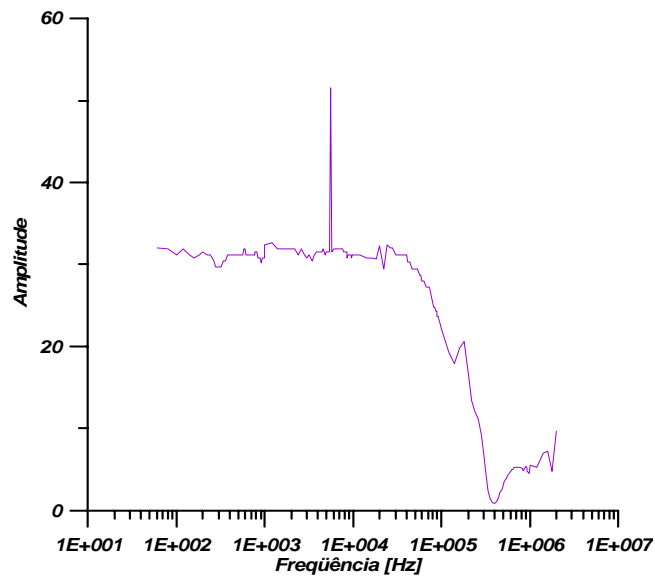


Figura 4.3 – Função de transferência – FTT – Transformador T2 – Amplitude

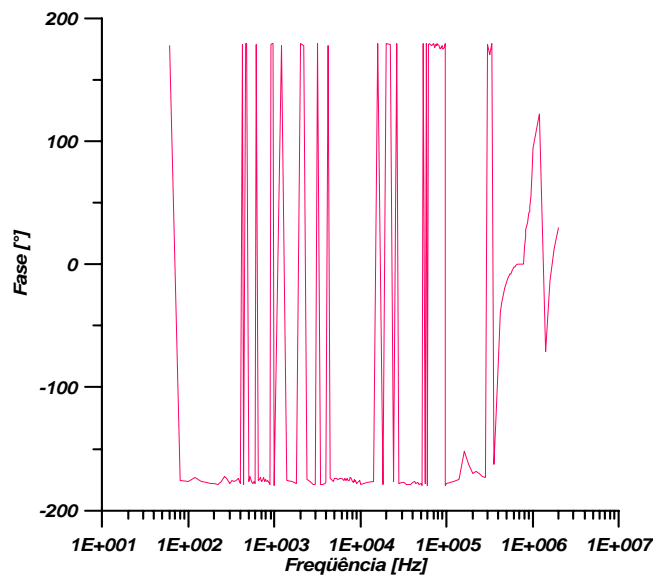


Figura 4.4 - Função de transferência – FTT – Transformador T2 – Fase

4.2 – Modelo Geral – Adaptação dos Modelos para Frequência Industrial

4.2.1 – Proposta de Modelagem

O estudo dos modelos para transformadores é inicialmente baseado na reprodução do comportamento observado nos ensaios de resposta em frequência.

Inicialmente, é estudado o modelo mais simples, que é o normalmente utilizado na maioria dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos. Este modelo, denominado Modelo de Primeira Ordem é mostrado na Figura 4.5; inclui as capacitâncias parasitas

e é considerado como adequado para estudos em grandes faixas de freqüência. Com o Programa ATP (Alternative Transient Program), foi reproduzida a variação da freqüência, para a mesma tensão aplicada no ensaio e, deste modo, é levantada a FTT em módulo e em fase.

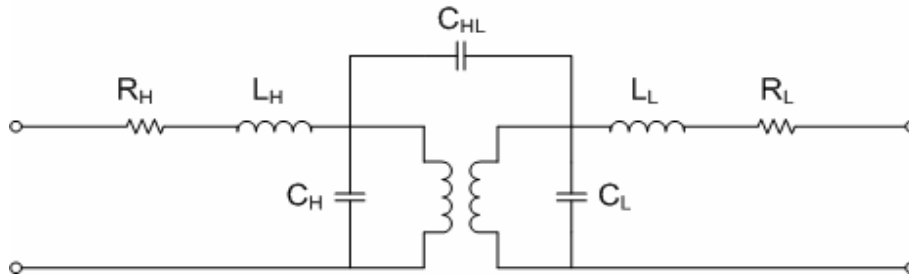


Figura 4.5 – Modelo de primeira ordem para uma grande faixa de freqüência

Posteriormente foram propostos alguns modelos na tentativa de melhorar a concordância entre os resultados de ensaio e de simulação. Uma das propostas foi o modelo de Segunda Ordem, mostrado na Figura 4.6.

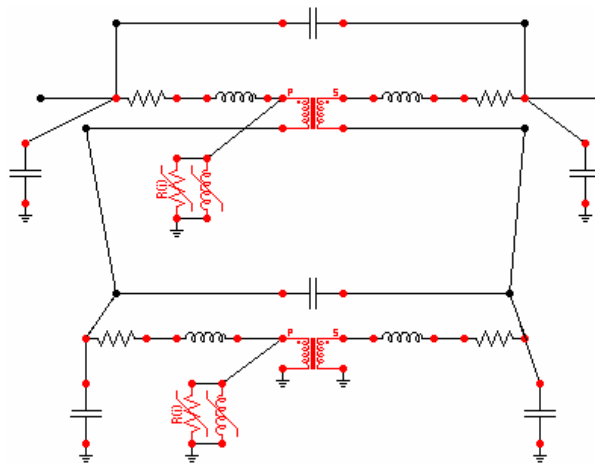


Figura 4.6 – Modelo de segunda ordem

Adicionalmente, foi proposta a divisão do modelo em quatro e em oito partes. Os resultados das simulações com os modelos propostos são apresentados no Item 4.2.3. A comparação entre os resultados dos ensaios e os das simulações é mostrada no Item 4.2.4.

4.2.2 – Obtenção dos Parâmetros

Os parâmetros utilizados nos modelos propostos são obtidos dos ensaios a vazio, em curto circuito (perdas sob carga), medição de resistência e da medição de capacitância. A seguir apresenta-se uma breve descrição de cada ensaio.

a) Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio de transformadores tem como finalidade a determinação das perdas no núcleo – Perdas por “Histerese” e “Foucault”, corrente a vazio – Corrente de Magnetização e relação de transformação. Deste modo, são obtidos os parâmetros do ramo magnetizante dos modelos, na forma de resistência e reatância.

Além dos elementos acima, o ensaio a vazio permite que sejam analisados alguns fenômenos de suma importância para o perfeito entendimento do funcionamento do transformador, por exemplo: o formato não-senoidal da corrente a vazio e a corrente transitória de magnetização.

b) Ensaio de Perdas Sob Carga

O ensaio de curto-circuito tem como objetivo a determinação das perdas no cobre nos enrolamentos primário e secundário, dos parâmetros percentuais, da queda de tensão interna e da característica $U_{cc} = f(I_{cc})$. Portanto, deste ensaio obtém-se a indutância ou sua estimativa, e a resistência a serem utilizadas no modelo. Por exemplo, se por acaso não forem medidas a resistência do transformador, adota-se que a impedância percentual divide-se igualmente entre os lados de alta e de baixa tensão.

c) Medidas de Resistência

Inicialmente, as medidas das resistências utilizadas nos modelos para simulação foram feitas com uma Ponte de “Wheatstone” padrão, método mais utilizado para resistências de valores intermediários. Em uma etapa posterior, as medidas de resistência passaram a ser realizadas com a Ponte de “Kelvin”, método utilizado para e resistência de baixos valores.

d) Medidas de Capacitâncias

As medidas das capacitâncias do transformador foram feitas com uma Ponte de “Schering”, que é uma ponte de tensão alternada de baixa frequência. A ponte utilizada é mostrada na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Ponte de “Schering”

Os modelos propostos e analisados utilizam as capacitâncias entre os enrolamentos de alta e baixa tensão; entre o enrolamento de alta tensão e a carcaça do transformador; e entre o enrolamento de baixa tensão e a carcaça.

Para a execução das medidas de capacitância, as buchas do transformador são curto-circuitadas. Se o transformador ensaiado for trifásico, os valores lidos devem ser divididos por três para obtenção do valor da capacitância por fase. Este modo de medida assume que as capacitâncias do transformador estão distribuídas de acordo com o Modelo “Pi”. A Figura 4.8 mostra o modelo “Pi” das capacitâncias medidas.

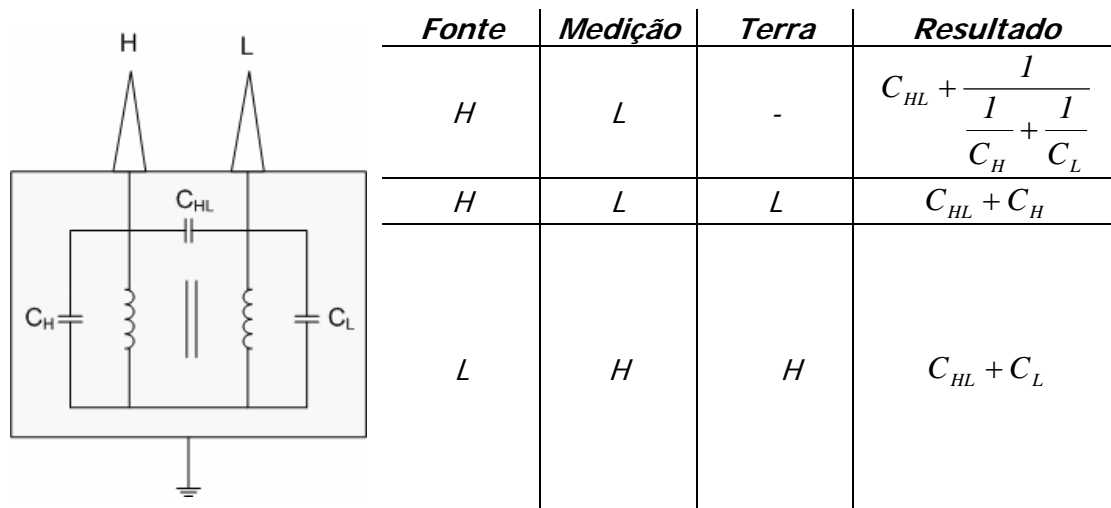


Figura 4.8 – Esquema de ensaio de medição de capacitância

4.2.3 – Resultados das Simulações dos Modelos para o Domínio da Freqüência

A seguir são mostrados os resultados das simulações realizadas com os modelos propostos. São apresentadas as Funções de Transferência do Transformador – FTT em módulo e fase.

Este estudo apresenta os resultados para o transformador T1 uma vez que, como discutido, o transformador T2 apresentou comportamento não padronizado e que as causas deste comportamento não foram investigadas.

a) Modelo de Primeira Ordem.

O Modelo de Primeira Ordem é mostrado na Figura 4.5. Do ensaio de perdas em curto são obtidas as resistências e indutâncias de dispersão dos enrolamentos e, do ensaio em vazio, os valores dos parâmetros do ramo magnetizante. Neste caso a impedância percentual $Z\%$ obtida é dividida igualmente entre os enrolamentos de alta e de baixa tensão, ou seja, $Z_H \% = Z_L \% = 0,5 \cdot Z\%$.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram a FTT em módulo e fase obtida a partir da simulação deste modelo.

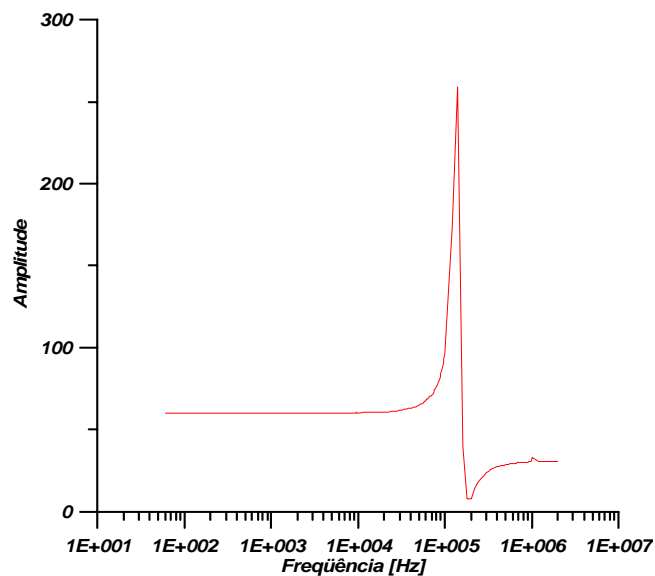


Figura 4.9 – FTT Simulada – Amplitude

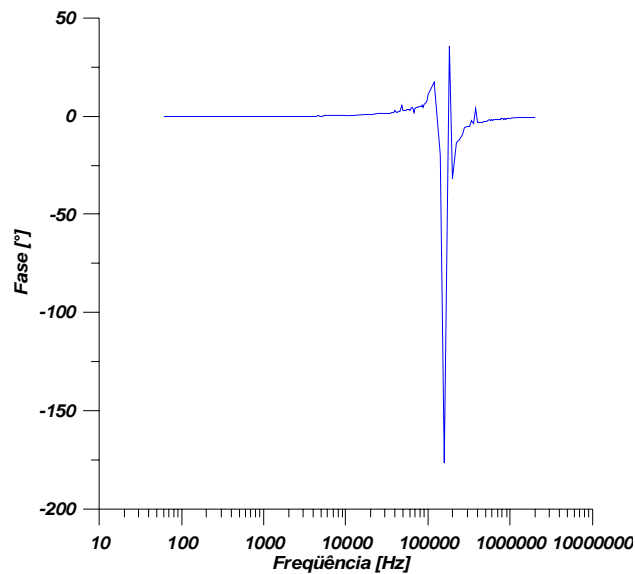


Figura 4.10 – FTT Simulada – Fase

O pico de “ressonância” obtido com este modelo possui amplitude de 259. Em contrapartida o pico obtido no ensaio é de 182,69. A freqüência de ressonância para os dois casos, modelo e ensaio, foi da ordem de 140 kHz.

Para tentar reproduzir a Função de Transferência do transformador, tanto em amplitude e fase, de forma mais aproximada possível foram feitas tentativas de modelar o transformador através de parâmetros distribuídos, ou seja, considerando a divisão do seu enrolamento. Estes modelos são denominados de Modelos de Ordem Superior.

b) Modelo de Segunda Ordem

A Figura 4.6 mostra o Modelo de Segunda Ordem. Neste caso as resistências utilizadas no modelo foram medidas com a Ponte de “Wheatstone”. O parâmetro do ramo magnetizante são os obtidos do ensaio a vazio e as indutâncias são as obtidas do ensaio de perdas em curto.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados obtidos a partir da simulação deste modelo.

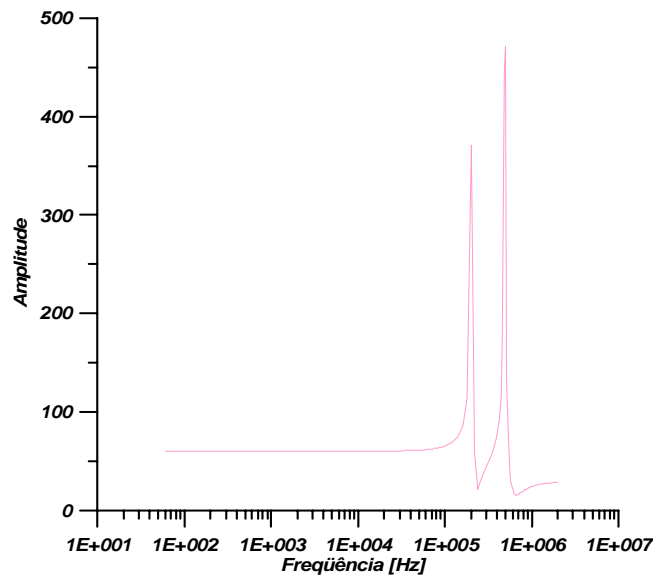


Figura 4.11 – FTT Simulada – Amplitude

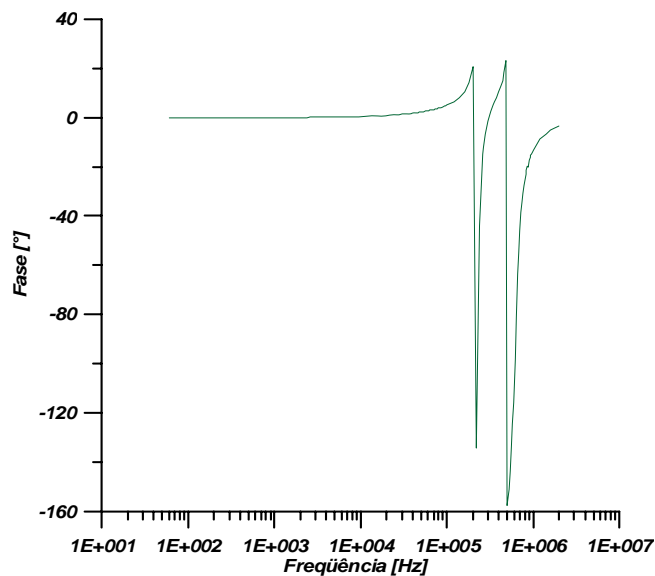


Figura 4.12 – FTT Simulada – Fase

Conforme mostra a Figura 4.11, o módulo da Função de Transferência possui dois picos de ressonância. O primeiro com 370,7 ocorre na freqüência de 200 kHz, o segundo possui 471,7 e ocorre na freqüência de 500 kHz. Por outro lado, como mostrado na Figura 4.12, a fase da Função de Transferência obtida por simulação começa a possuir semelhanças com a fase da Função de Transferência obtida em ensaio.

c) Modelo de Quarta Ordem

Este modelo é mostrado na Figura 4.13. Os parâmetros utilizados nas simulações são os mesmos utilizados anteriormente.

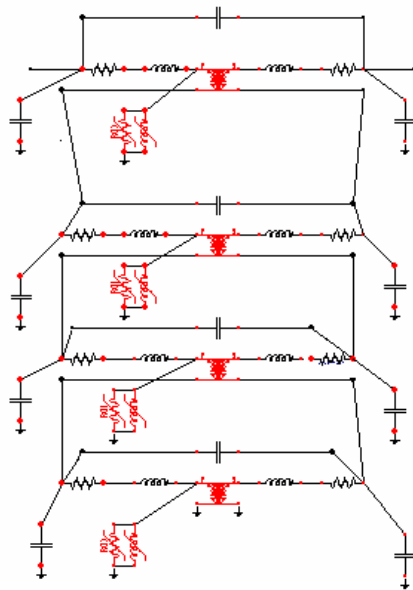


Figura 4.13 – Modelo de Quarta Ordem

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados das simulações com este modelo.

O módulo da Função de Transferência obtido através da simulação com este modelo, para a faixa de frequência estudada, também apresenta dois picos de ressonância. O primeiro pico possui amplitude de 494,3 na frequência de 220 kHz, e o segundo 128,7 na frequência de 680 kHz. Como mostrado pela Figura 4.16, a fase da Função de Transferência obtida por simulação possui boa semelhança com a fase da Função de Transferência obtida em ensaio.

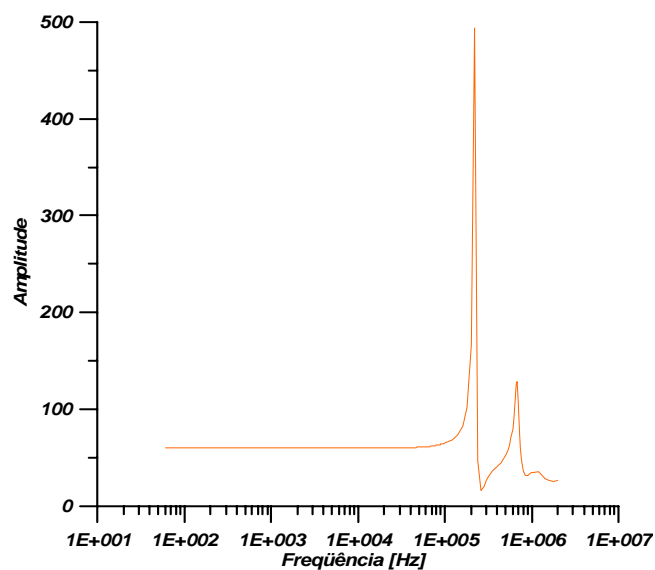


Figura 4.14 - FTT Simulada – Amplitude

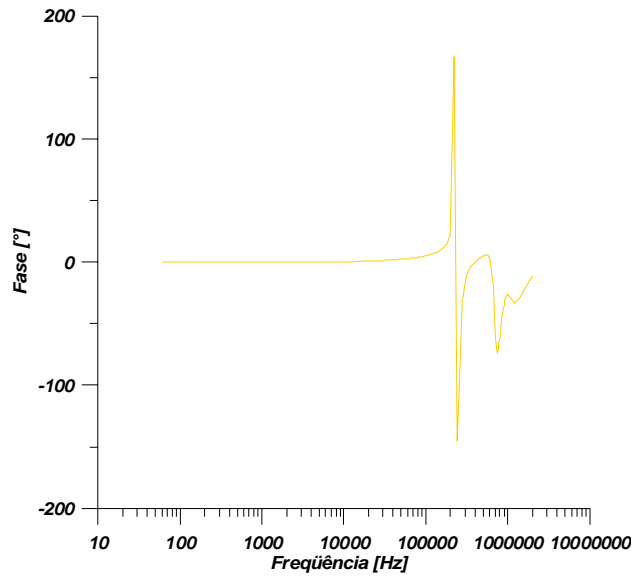


Figura 4.15 - FTT Simulada – Fase

d) Modelo de Oitava Ordem

A representação deste modelo é similar à representação com a divisão do enrolamento em duas e quatro partes. Deste modo, este modelo é composto por oito transformadores monofásicos saturáveis com suas respectivas resistências, indutâncias e capacitâncias de fuga entre enrolamentos e para a terra. Os parâmetros são os mesmos que os utilizados anteriormente, lembrando que este é um modelo de parâmetros distribuídos.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os resultados das simulações com este modelo.

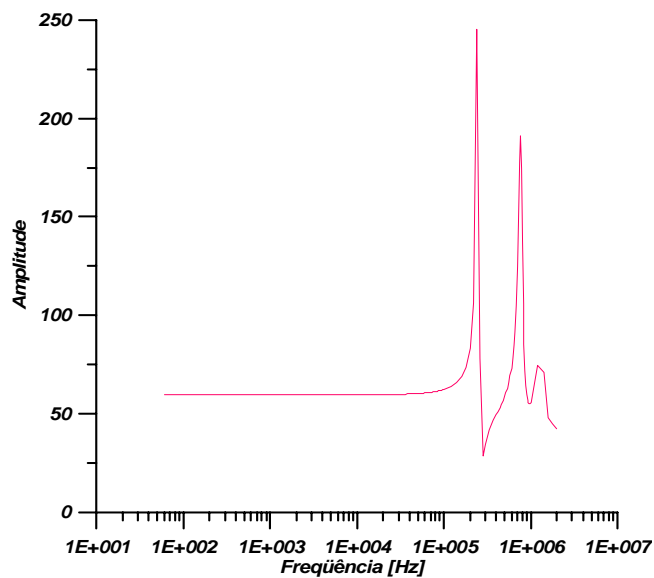


Figura 4.16 - FTT Simulada – Amplitude

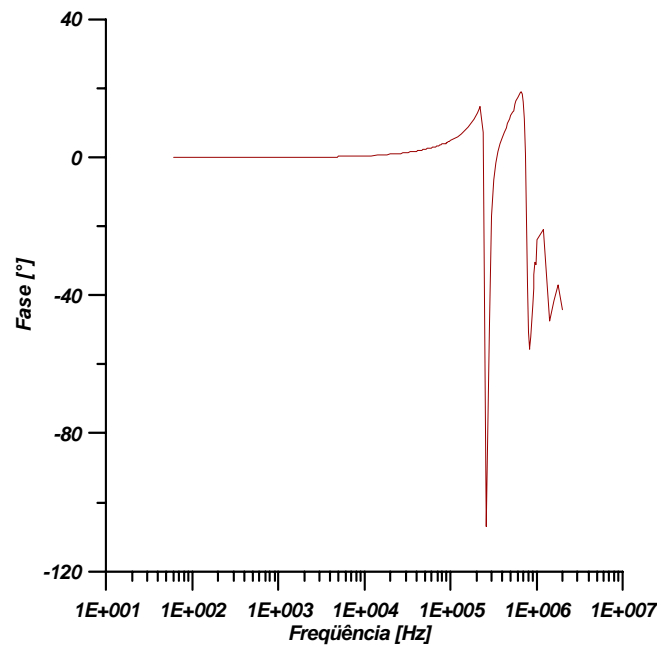


Figura 4.17 - FTT Simulada – Fase

Para este modelo, o módulo da Função de Transferência apresenta três picos de ressonância. No entanto, a Função de Transferência obtida em ensaio apresenta somente dois picos de ressonância para a faixa de freqüência do estudo. O primeiro pico é de 245,6 para a freqüência de 240 kHz, o segundo possui 191,3 para a freqüência de 760 kHz e o terceiro 72,4 para 1,2 MHz. Com respeito à fase da Função de Transferência é possível notar uma maior aproximação do comportamento observado em ensaio.

4.2.4 – Comparação de Resultados

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram as comparações entre os resultados experimentais e de simulação para o módulo e a fase da FTT.

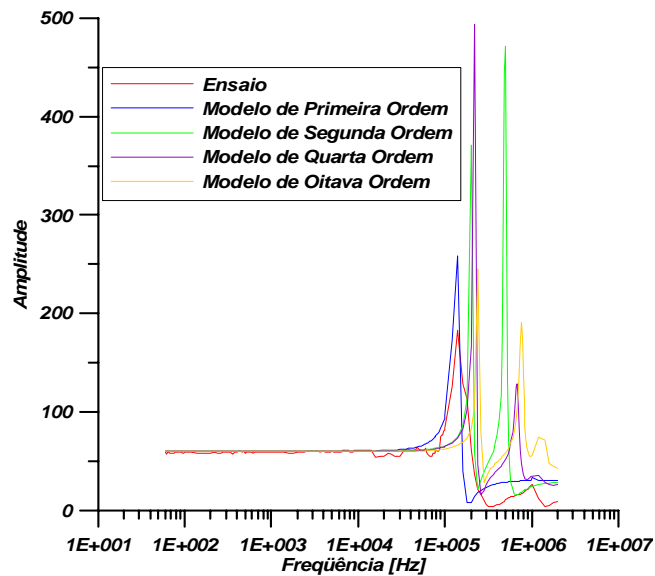


Figura 4.18 – Comparação – Ensaio & Simulação – FTT – Módulo

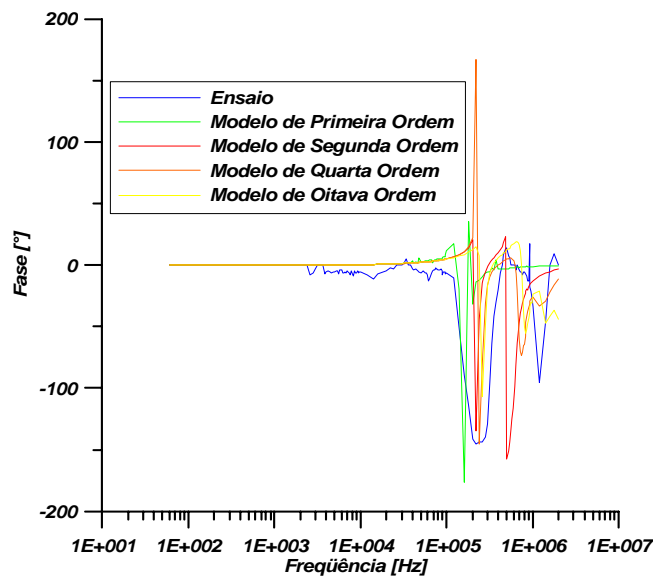


Figura 4.19 - Comparação – Ensaio & Simulação – FTT – Fase

4.2.5 – Comentários

Pode-se observar nas Figuras 4.18 e 4.19 que o Modelo de Primeira Ordem apresenta identidade com o comportamento obtido em ensaio para o módulo da FTT, enquanto que o Modelo de Oitava Ordem apresenta considerável concordância somente para a fase da FTT. Entretanto, considerando o aspecto geral da fase da FFT é possível afirmar que o modelo mais simples – Modelo de Primeira Ordem é mais adequado para representar o comportamento do transformador em uma grande faixa de frequência. Este fato é reconhecido, não de forma explícita, na maioria das simulações de estudos transitórios.

4.3 – Modelagem para Surtos Transferidos

4.3.1 – Aplicação do Modelo Simplificado com Capacitâncias

Como demonstrado o modelo mais simples – Primeira Ordem – é o que representa melhor o comportamento do transformador para frequências superiores à industrial – 60 Hz.

O Item 3.2.3 mostra os resultados de ensaio de quatro transformadores monofásicos onde foram aplicados surtos de tensão atmosférica, induzido e de manobra, e as respostas do secundário foram registradas. De modo a avaliar a escolha do Modelo de Primeira Ordem para o estudo de surtos transferidos são apresentados os resultados das simulações para estes transformadores. Nestes casos foram considerados, como parâmetros de modelo, as resistências e capacitâncias medidas e as indutâncias calculadas a partir do ensaio de perdas a vazio e em curto.

a) Impulsos Atmosféricos

As Figuras 4.20 a 4.23 mostram a comparação da forma da tensão secundária transferida medida e obtida resultado das simulações quando da aplicação de um impulso atmosférico no primário dos transformadores T1 a T4, respectivamente.

A Figura 4.20 mostra que o Transformador T1 possui uma boa concordância entre o comportamento obtido em ensaio e o através de simulações. A diferença que pode ser notada no início da forma da tensão transferida real, que é mais lenta que a da simulação, pode ser devida ao projeto do gerador de surtos.

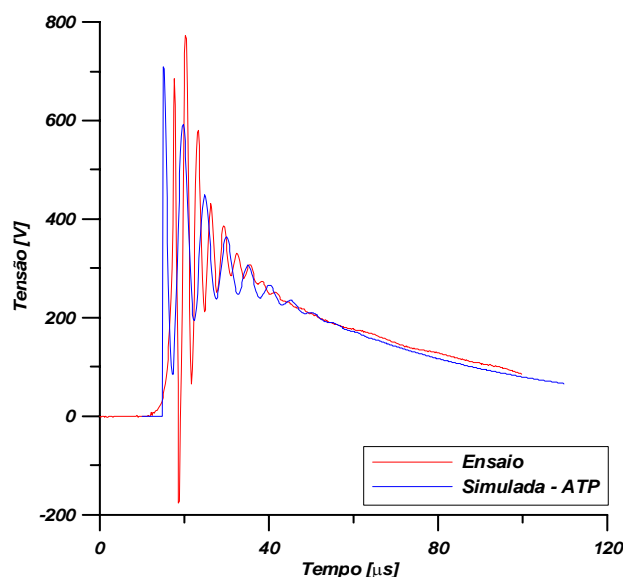


Figura 4.20 – Comparação ensaio X simulação para impulsos atmosféricos – Transformador T1

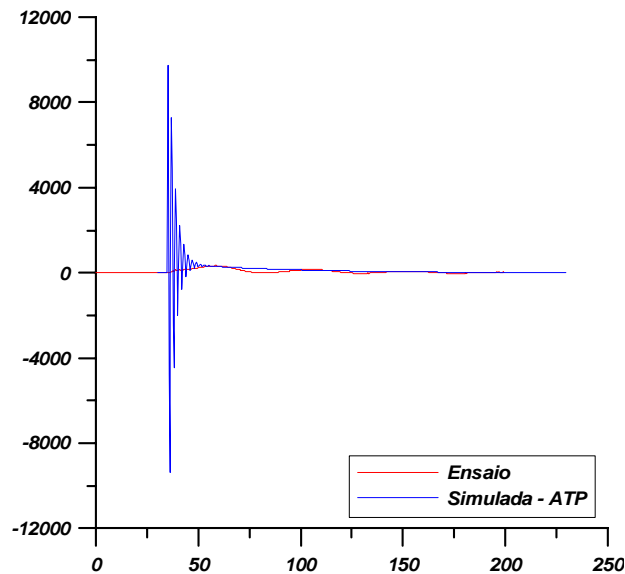


Figura 4.21 - Comparação ensaio X simulação para impulsos atmosféricos – Transformador T2

A razão entre as amplitudes da tensão secundária transferida e primária aplicada para cada um dos transformadores estudados é: 0,0311; 0,6133; 0,600 e 0,567 - respectivamente. Como pode ser observado na Figura 4.21 o transformador T2 não apresenta uma boa concordância entre os resultados de ensaio e de simulação. Nota-se uma oscilação amortecida de alta amplitude, que em parte concorda com a razão entre as capacitâncias dos enrolamentos, mas mesmo assim é superior ao esperado.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram que a frequência da tensão transferida obtida a partir das simulações é superior a obtida nos ensaios. O mesmo ocorre com a amplitude da tensão que apresenta amortecimento inferior ao encontrado para o transformador T2.

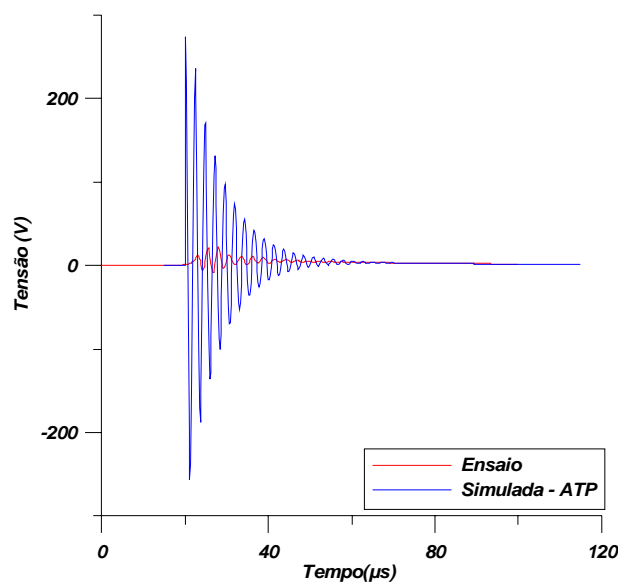


Figura 4.22 - Comparação ensaio X simulação para impulsos atmosféricos – Transformador T3

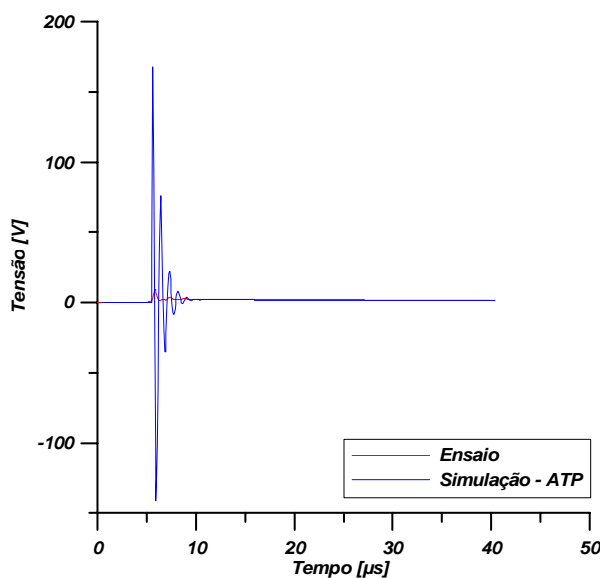


Figura 4.23 - Comparação ensaio X simulação para impulsos atmosféricos – Transformador T4

b) Surtos Induzidos

As Figuras 4.24 a 4.27 mostram a comparação da forma da tensão secundária transferida medida e obtida resultado das simulações quando da aplicação de um surto induzido no primário dos transformadores T1 a T4, respectivamente.

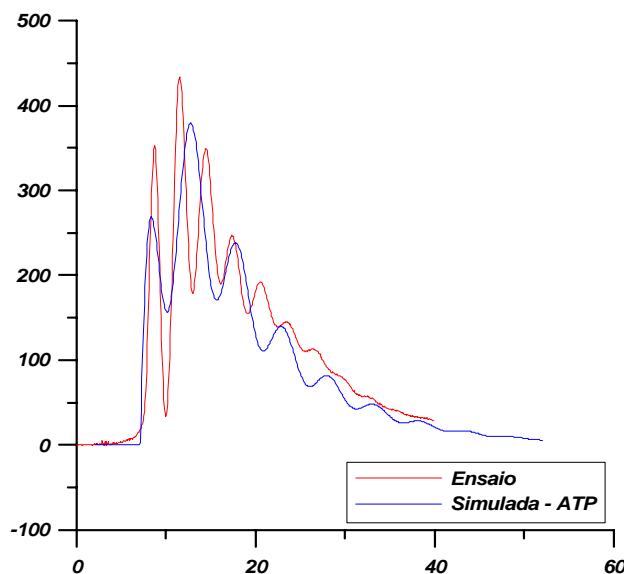


Figura 4.24 - Comparação ensaio X simulação para surtos induzidos – Transformador T1

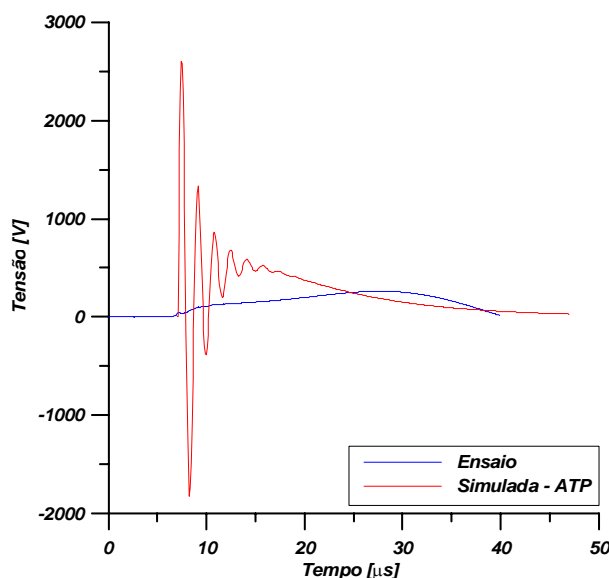


Figura 4.25 - Comparação ensaio X simulação para surtos induzidos – Transformador T2

De maneira similar ao observado para o caso de surtos atmosféricos o transformador T1 apresenta a melhor concordância entre os comportamentos obtidos nos ensaios e nas simulações.

A razão entre as amplitudes da tensão secundária transferida e primária aplicada para cada um dos transformadores estudados é: 0,0289; 0,1460; 0,0961 e 0,0725 – respectivamente. Como os surtos induzidos possuem frente mais lenta, isto explica as diferenças encontradas nas razões entre os valores de pico das tensões mostradas na Tabela 3.1, e a redução dos valores das tensões observadas nas Figuras 4.20 a 4.27.

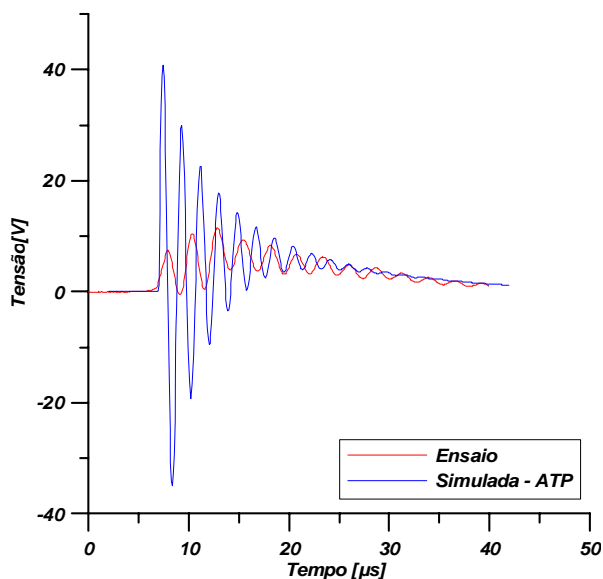


Figura 4.26 - Comparação ensaio X simulação para surtos induzidos – Transformador T3

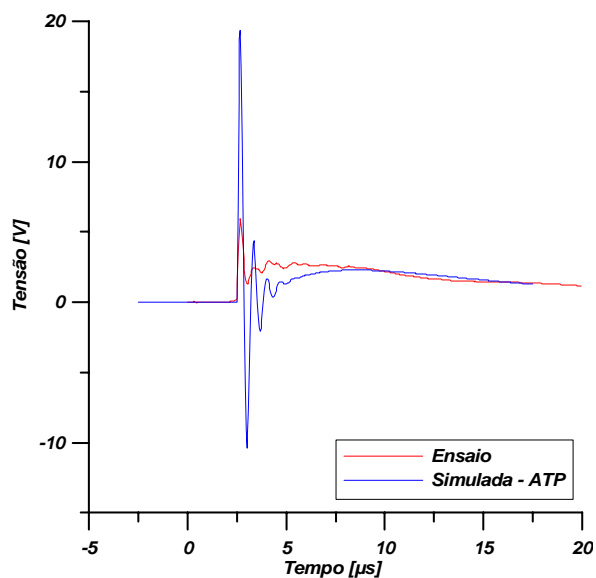


Figura 4.27 – Comparação ensaio X simulação para surtos induzidos – Transformador T4

c) Impulsos de Manobra

As Figuras 4.28 a 4.31 mostram a comparação da forma da tensão secundária transferida medida e a obtida dos resultados das simulações quando da aplicação de um impulso de manobra no primário dos transformadores T1 a T4, respectivamente.

Mais uma vez, o transformador T1 apresentou a melhor concordância. No entanto, neste caso os transformadores T3 e T4 também apresentam identidade.

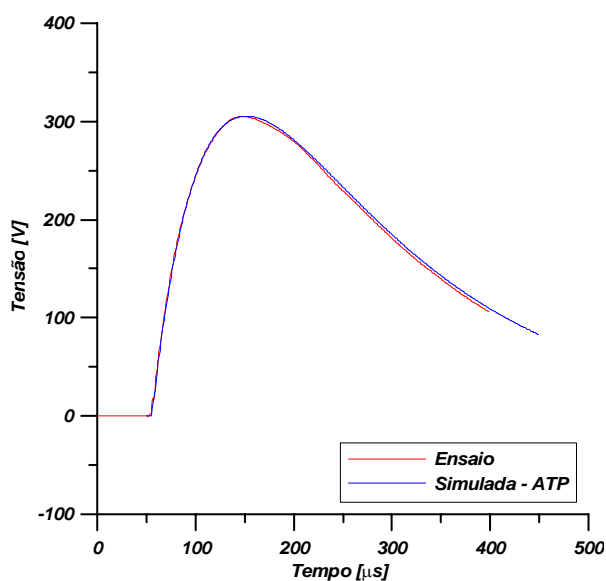


Figura 4.28 - Comparação ensaio X simulação para impulsos de manobra – Transformador T1

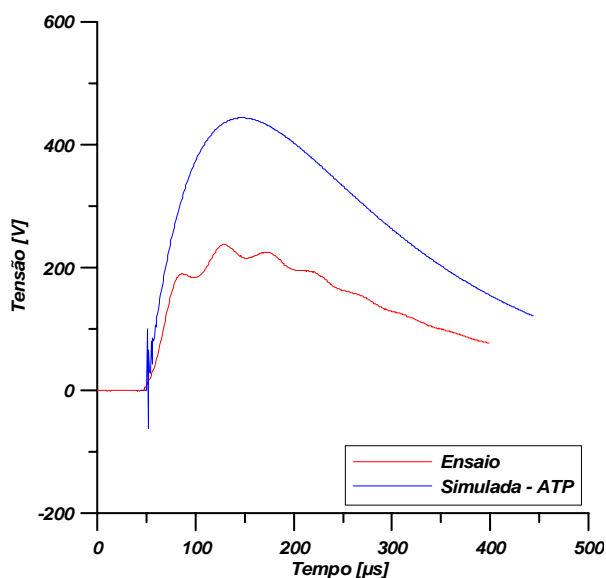


Figura 4.29 - Comparação ensaio X simulação para impulsos de manobra – Transformador T2

A razão entre as amplitudes da tensão secundária transferida e primária aplicada para cada um dos transformadores estudados é: 0,0174; 0,0276; 0,0172 e 0,0092 - respectivamente. Os impulsos de manobra possuem uma frente muito lenta. Logo, a razão entre as tensões se aproxima da relação de transformação. Contudo, isto não é observado para o transformador T2.

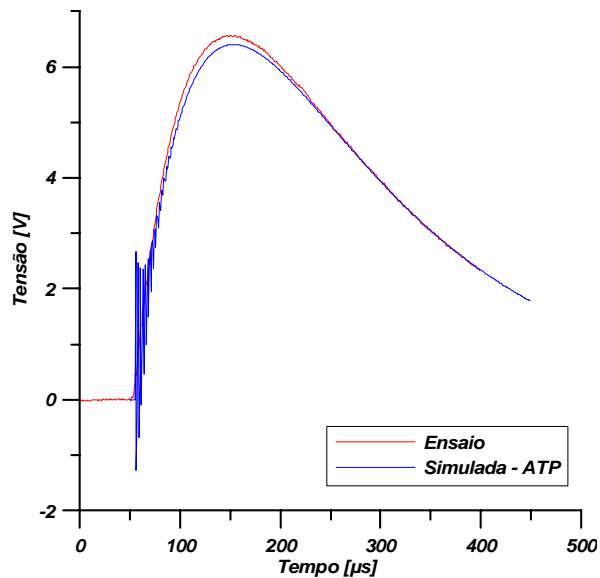


Figura 4.30 – Comparação ensaio X simulação para impulsos de manobra – Transformador T3

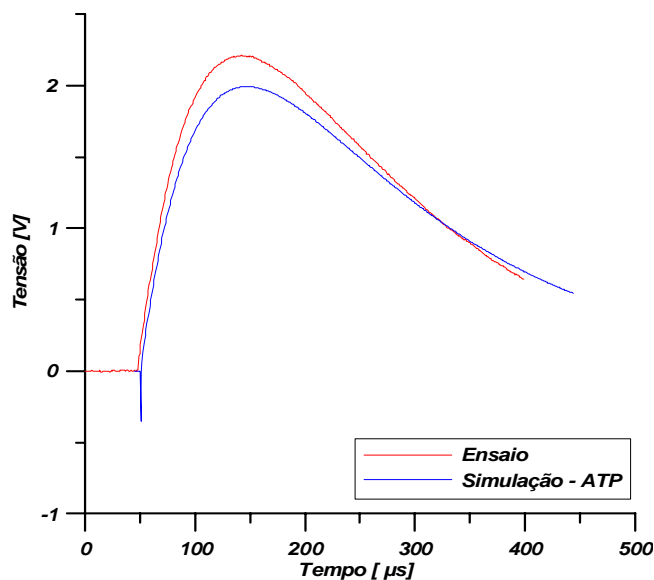


Figura 4.31 - Comparação ensaio X simulação para impulsos de manobra – Transformador T4

4.3.2 – Proposta para Correção do Modelo em Transformadores onde $C_{HL} > C_{LT}$

Nas comparações apresentadas é possível observar que para surtos com frente rápida – Surtos Atmosféricos e Induzidos somente o transformador T1 apresenta identidade entre os resultados simulados e de ensaio.

No transformador T1, a capacitância CLT é maior que a capacitância CHL, enquanto que nos transformadores T2 a T4 ocorre o inverso. Para estes casos, propõe-se a correção do modelo com a inclusão de uma capacitância interna, como mostra a Figura 4.32. Nestes casos é sugerido adotar para a capacitância externa o valor de $0,10 \rightarrow 0,15$ CHL.

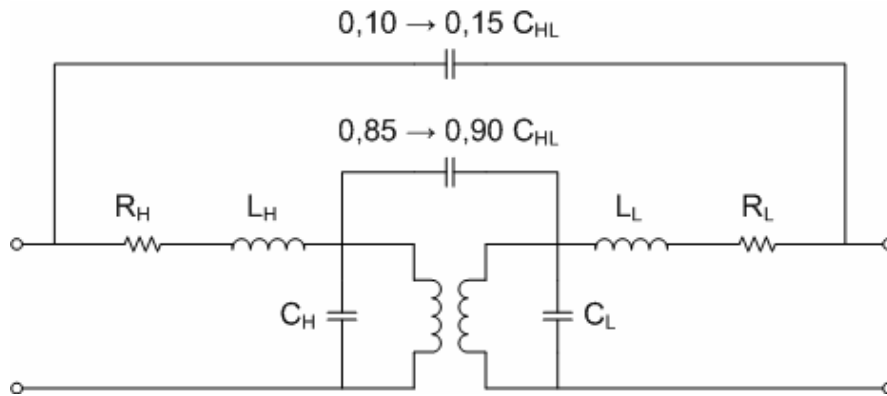


Figura 4.32 – Correção proposta para Transformadores com $CHL > CLT$

A seguir são apresentadas, para os transformadores T2 a T4, as comparações entre os resultados de ensaio e os da simulação desta proposta de correção do modelo.

a) Impulsos Atmosféricos

As Figuras 4.33 até 4.35 mostram os resultados das simulações para a aplicação de impulsos atmosféricos com modelo de transformador com a correção proposta.

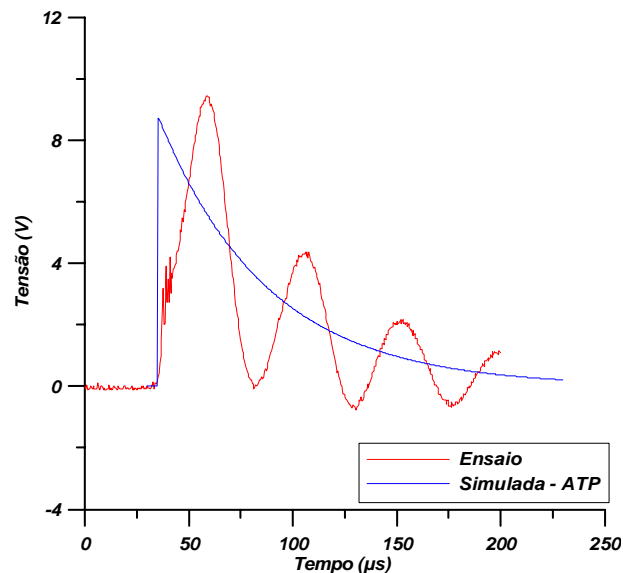


Figura 4.33 - Comparação ensaio x simulação para impulso atmosférico – Transformador T2

A razão entre as amplitudes da tensão secundária transferida e primária aplicada para os transformadores T2 a T4 é respectivamente: 0,0201; 0,0876 e 0,0426. Pode-se notar que nestes casos ocorre uma aproximação razoável para o

valor da tensão transferida. No entanto, somente para o transformador T3 ocorre uma razoável aproximação da forma do impulso transferido com relação ao obtido no ensaio.

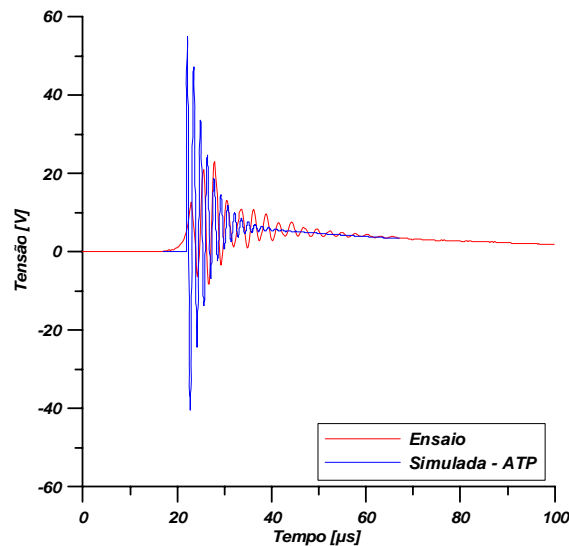


Figura 4.34 - Comparação ensaio x simulação para impulso atmosférico – Transformador T3

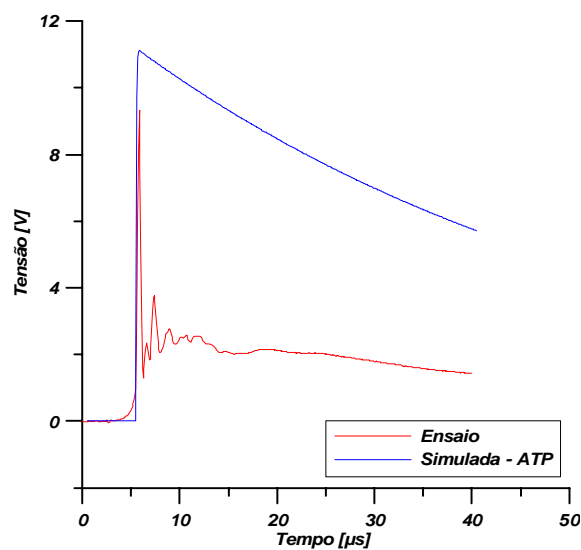


Figura 4.35 - Comparação ensaio x simulação para impulso atmosférico – Transformador T4

b) Surtos Induzidos

As Figuras 4.36 a 4.38 mostram os resultados das simulações para a aplicação de surtos induzidos com modelo de transformador com a correção proposta. A razão entre as amplitudes da tensão secundária transferida e primária aplicada para os transformadores T2 a T4 é respectivamente: 0,0127; 0,0270 e 0,0217.

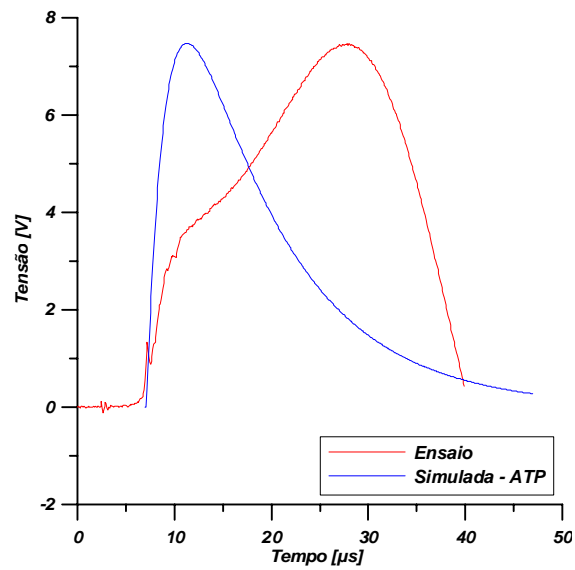


Figura 4.36 - Comparação ensaio X simulação para surtos induzidos – Transformador T2

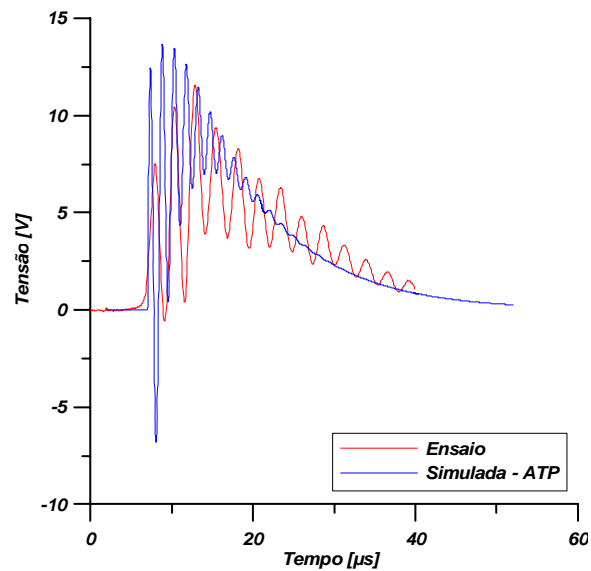


Figura 4.37 - Comparação ensaio X simulação para surtos induzidos – Transformador T3

De maneira similar ao observado para a aplicação de impulsos atmosféricos, as simulações dos transformadores T2 e T4 apresentam uma concordância com respeito ao valor da tensão transferida em relação ao observado experimentalmente. Novamente, somente para o transformador T3 obteve-se uma melhora na concordância entre as formas dos resultados de simulação e de ensaio.

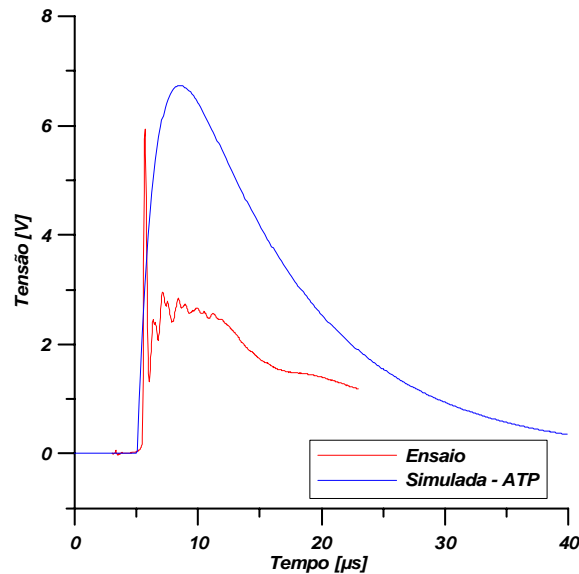


Figura 4.38 - Comparação entre resultado de ensaio e de simulação para surtos induzidos – Transformador T4

4.3.3 – Comentários

Como observado, quando é utilizado o modelo simplificado somente as simulações para o transformador T1 apresentaram concordância razoável com os resultados de ensaio para os três tipos de surtos aplicados. O transformador T2 não obteve concordância entre os resultados de ensaio e simulação para os três tipos de surtos aplicados. Os transformadores T3 e T4 somente tiveram concordância no surto de manobra.

Com a proposta de correção do modelo para transformadores onde $CHL > CLT$, somente T2 e T4 apresentaram redução no valor de pico da tensão transferida simulada. No entanto, são observadas adequações substanciais na forma do impulso transferido. No transformador T3 além da redução no módulo da tensão transferida simulada, também houve uma concordância razoável entre as formas observadas no ensaio e na simulação.

Considerando os quatro transformadores analisados, somente para surtos com frente mais longa, onde a razão entre as tensões de entrada e a transferida se aproxima da relação de transformação, os resultados de simulação apresentam concordância razoável com os ensaios.

O modelo utilizado para este estudo precisa ser cuidadosamente analisado. Não só a razão entre as capacitâncias dos enrolamentos deve ser levada em consideração, mas também a característica construtiva dos transformadores.

A Tabela 4.1 mostra os principais parâmetros dos transformadores utilizados neste estudo.

Tabela 4.1 – Principais parâmetros dos transformadores utilizados neste estudo

	Ohms – mH				pF		
	R_H	L_H	R_L	L_L	C_H	C_{HL}	C_L
T ₁	<i>406,0</i>	<i>1110,0</i>	<i>0,017</i>	<i>0,051</i>	<i>700</i>	<i>60</i>	<i>1800</i>
T ₂	<i>21,51</i>	<i>65,0</i>	<i>0,0123</i>	<i>0,061</i>	<i>960</i>	<i>790</i>	<i>78</i>
T ₃	<i>10,48</i>	<i>64,7</i>	<i>0,0020</i>	<i>0,019</i>	<i>1300</i>	<i>2600</i>	<i>1200</i>
T ₄	<i>31,68</i>	<i>156,9</i>	<i>0,0019</i>	<i>0,013</i>	<i>670</i>	<i>790</i>	<i>90</i>

CAPÍTULO 5

Modelo Detalhado dos Enrolamentos para Impulsos

Conforme comentado, normalmente, surgem dúvidas na análise dos oscilogramas obtidos nos ensaios de impulso em transformadores devido a presença de sinais nas formas de corrente. O não conhecimento da natureza destes sinais pode induzir erros de interpretação. Logo, transformadores que apresentam problemas de isolamento interno, podem ser considerados como isentos de falhas.

Este capítulo apresenta uma proposta de modelo para simular o desempenho dos enrolamentos dos transformadores nos ensaios de impulso, com a possibilidade de representar alguns dos defeitos mais comuns que ocorrem durante a execução dos ensaios.

5.1 – Modelo para Ruídos/Defeitos

A Figura 5.1 mostra o modelo utilizado para representar o enrolamento dos transformadores nos ensaios de impulso, e também alguns defeitos possíveis por vezes considerados oscilações induzidas de alta frequência no sistema de medição.

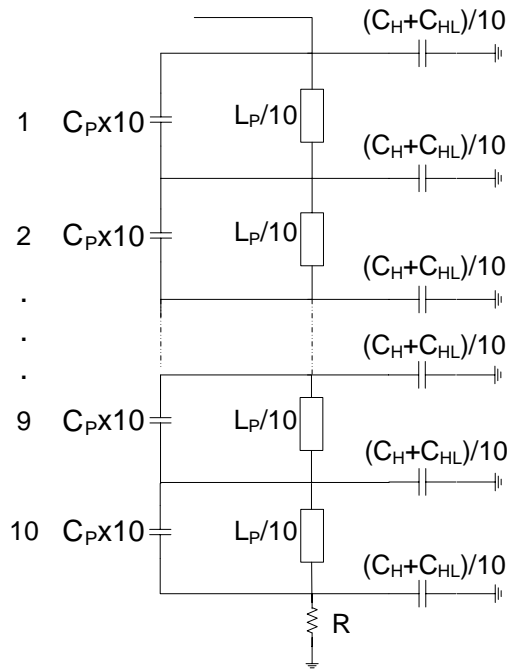


Figura 5.1 – Modelo do Enrolamento do Transformador

Onde L_p é a indutância sob impulso, C_P a capacitância série do enrolamento, C_H a capacitância entre o enrolamento de alta tensão e a carcaça e C_{HL} a capacitância entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, este último, normalmente aterrado.

5.2 – Levantamento dos Parâmetros para os Modelos

Os parâmetros utilizados no modelo proposto são obtidos dos ensaios de impulso, bem como de medidas de capacitância em baixa frequência.

Durante o ensaio de impulso são registradas formas de corrente associadas à aplicação de impulsos plenos reduzidos com escala adequada para detalhar o pico de corrente, que representa o fenômeno de carga das capacitâncias série dos enrolamentos, como mostra a Figura 5.2.

O processo implica em uma aplicação extra de impulso pleno reduzido, detalhando a cauda da forma de corrente. Este oscilograma permite determinar a amplitude da componente da forma de corrente – I_{max} , obtida quando a tensão passa por zero, como mostra a Figura 5.3, correspondente aos fenômenos de impulsos viajantes nos enrolamentos.

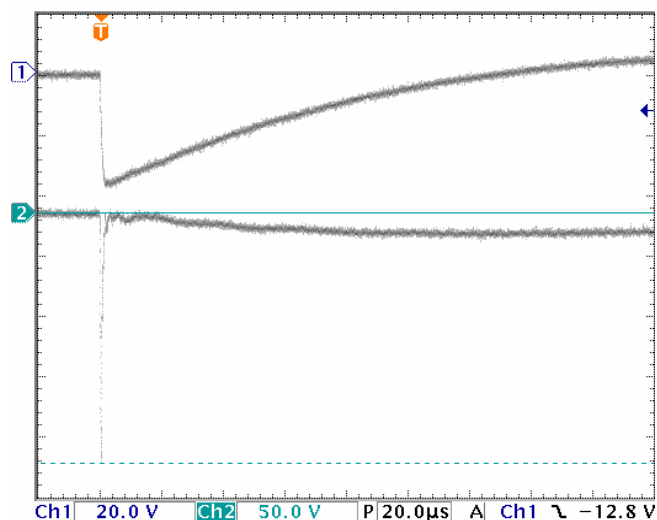


Figura 5.2 – Oscilograma da aplicação de um impulso pleno reduzido detalhando a amplitude máxima de corrente

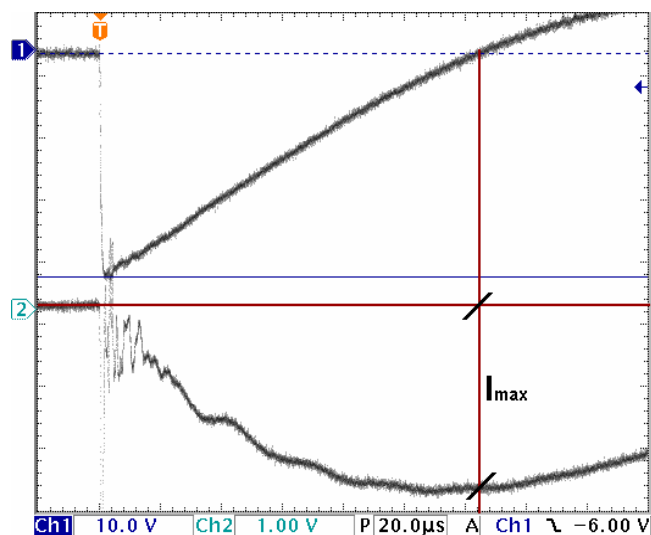


Figura 5.3 - Oscilograma da aplicação do impulso pleno reduzido detalhando a amplitude da corrente para a cauda do impulso de tensão

5.3 – Superfícies e Curvas Características do Gerador de Impulso para o Cálculo dos Parâmetros do Modelo

Como discutido, a forma de corrente é composta por *duas* componentes, uma associada ao fenômeno de carga das capacitâncias série do enrolamento e a outra correspondente aos fenômenos de ondas viajantes. Deste modo, a amplitude máxima inicial da corrente permite obter capacitância série ou própria do enrolamento. A amplitude para o valor nulo de tensão na cauda do impulso fornece a impedância de surto do enrolamento e conseqüentemente a indutância própria para fenômenos em alta frequência.

Para o cálculo da capacitância própria a partir da amplitude da corrente é utilizado o circuito da Figura 5.4. Deste modo, com o Programa ATP, variando a capacitância própria do circuito – C_p , para um impulso com amplitude constante de 100 V, é obtida a variação da amplitude máxima da corrente em função da capacitância que modela a capacitância própria equivalente dos enrolamentos. A Figura 5.5 mostra a saída gráfica obtida a partir da simulação deste circuito.

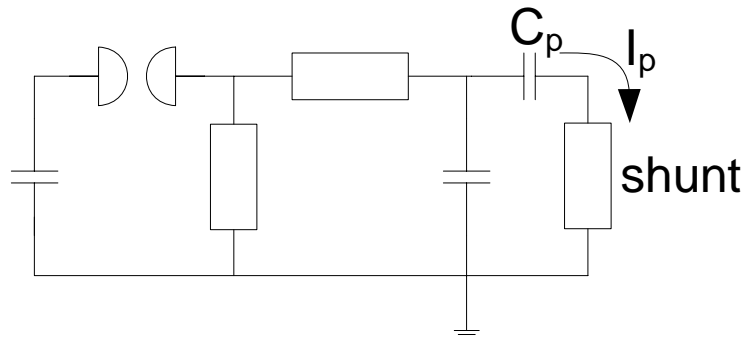


Figura 5.4 – Circuito utilizado para a construção da característica I_p x C_p

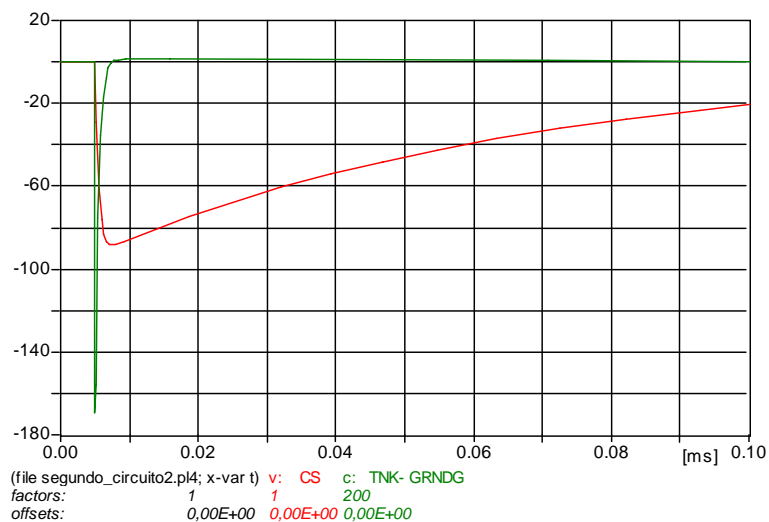


Figura 5.5 – Oscilograma: amplitude máxima da corrente

O gerador de impulso do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá possui baixa energia – 1,4 kJ. Deste modo, dependendo das características do transformador sob ensaio a configuração original do gerador deve ser alterada para obter impulsos com forma normalizada – 1,2/50 μ s. Portanto, para cada configuração do gerador de impulso utilizada nos ensaios existe uma característica que define a variação da amplitude máxima da corrente em função da capacitância própria dos enrolamentos.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram as características IP x CP para as configurações do gerador de impulso mais utilizadas no LAT-EFEI em ensaios de transformadores, 2s-3p (Dois estágios em série com três em paralelo) e 3s-2p (Três estágios em série com dois em paralelo). Onde Rf é a resistência de frente e Rc é a de cauda.

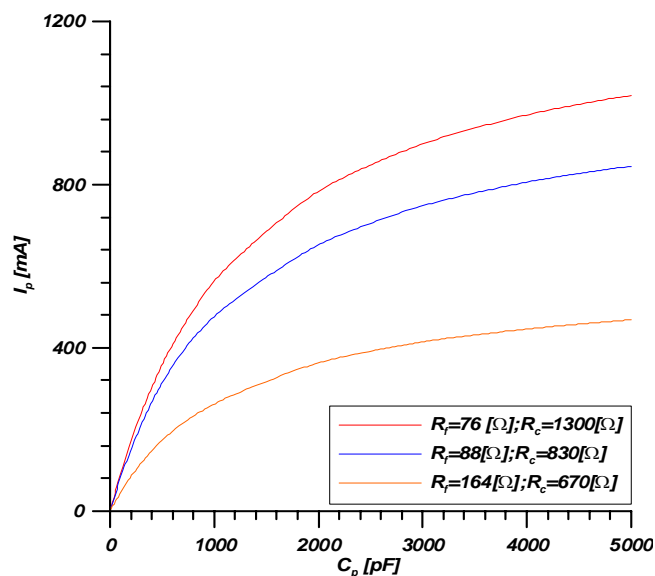


Figura 5.6 – Curvas IP X CP para o gerador na configuração 2s-3p

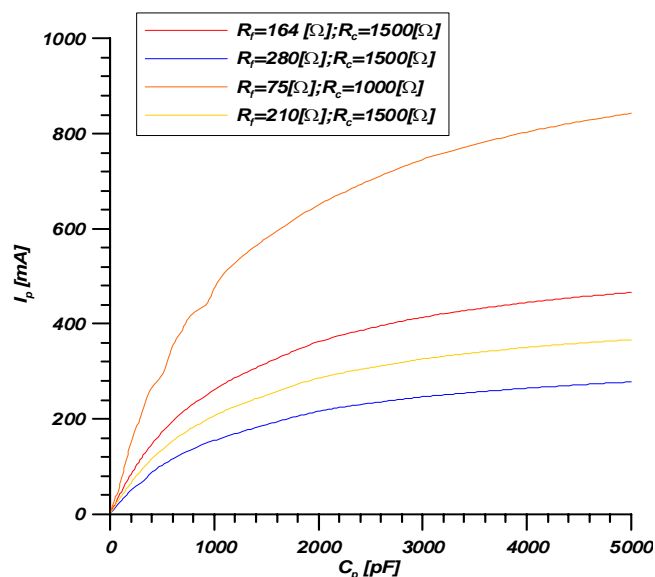


Figura 5.7 – Curvas IP X CP para o gerador na configuração 3s-2p

Análogo ao realizado para a obtenção da capacitância própria dos enrolamentos, com o circuito da Figura 5.8, bem como com o Programa ATP é reproduzido o comportamento da cauda da forma da corrente, para um impulso com amplitude constante de 100 V, como se observa na Figura 5.9, o que permite obter a impedância de surto dos enrolamentos.

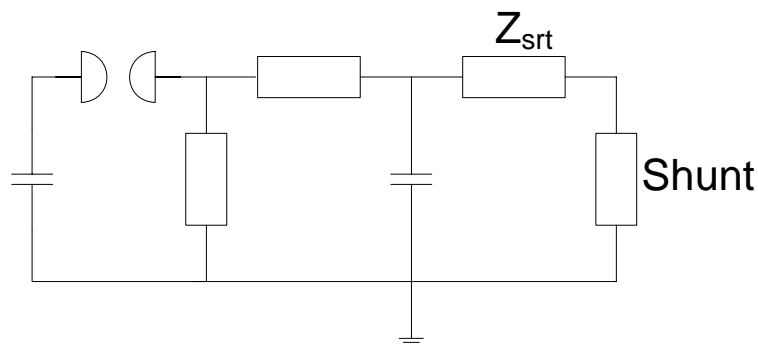


Figura 5.8 – Circuito utilizado para o cálculo da impedância de surto do enrolamento

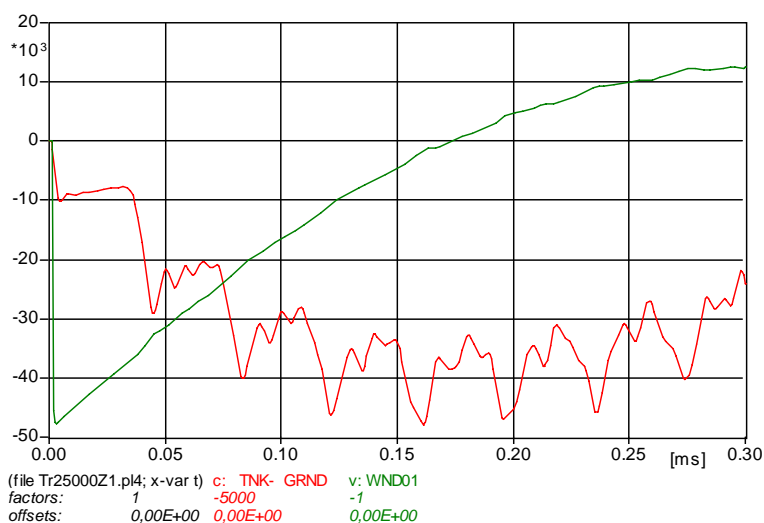


Figura 5.9 – Oscilograma: Ponto de tensão nula e valor máximo da corrente na cauda do impulso

As simulações realizadas consideram a variação do valor da impedância de surto e do comprimento do enrolamento, para uma velocidade de propagação, conforme discutido, de 160 m/ μ s. Deste modo, são obtidos o valor máximo de corrente na cauda do impulso e o tempo para o zero de tensão. Com estes dados são construídas superfícies que relacionam o comprimento dos enrolamentos versus tempo para o zero de tensão valor máximo de corrente na cauda do impulso. Análogo ao processo para a obtenção das Figuras 5.6 e 5.7, para cada configuração do gerador de impulsos é obtida uma nova superfície.

As Figuras 5.10 a 5.14 mostram as superfícies obtidas para o gerador de impulsos Haefely 450 kV – 1.2 kJ instalado no LAT-EFEI.

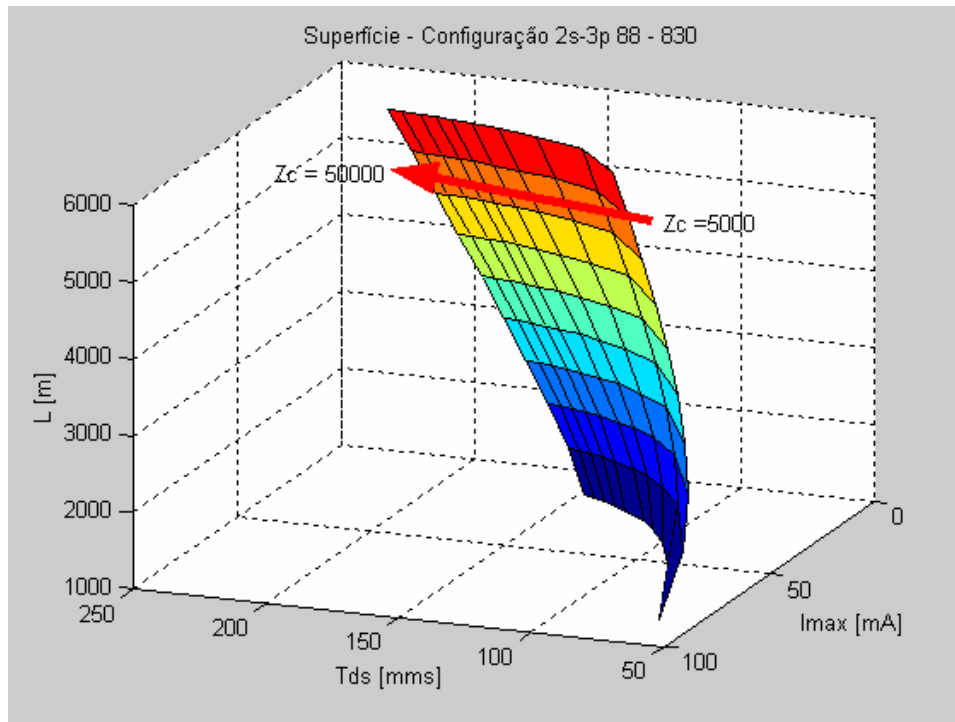


Figura 5.10 – Superfície para o cálculo da impedância de surto para o gerador de impulsos na configuração 2s-3p com $R_f = 88 \Omega$ e $R_c = 830 \Omega$

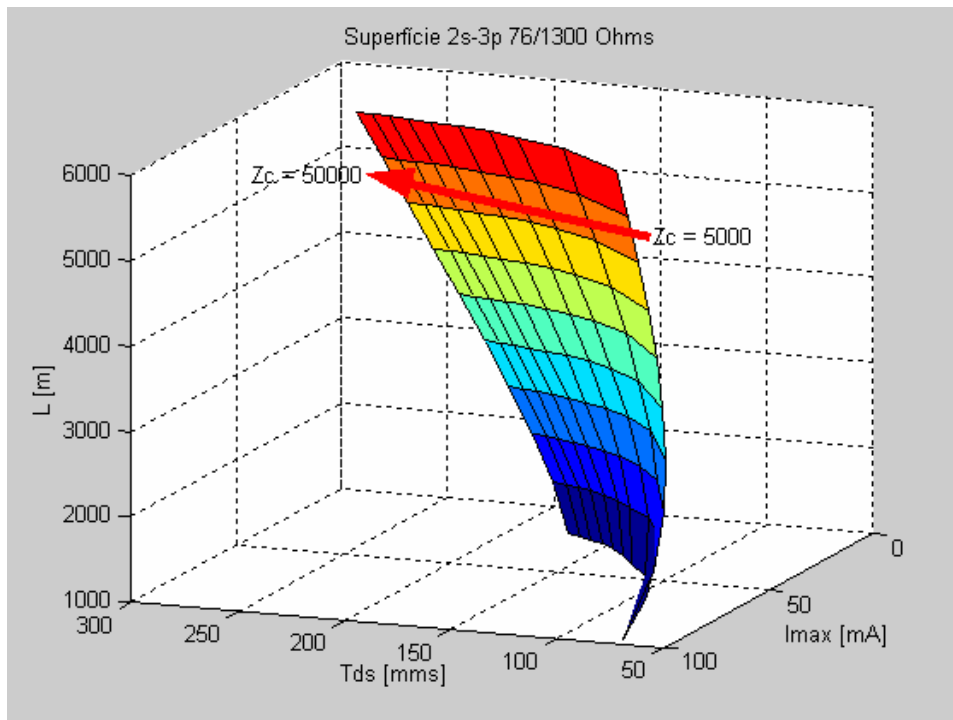


Figura 5.11 - Superfície para o cálculo da impedância de surto para o gerador de impulsos na configuração 2s-3p com $R_f = 76 \Omega$ e $R_c = 1300 \Omega$

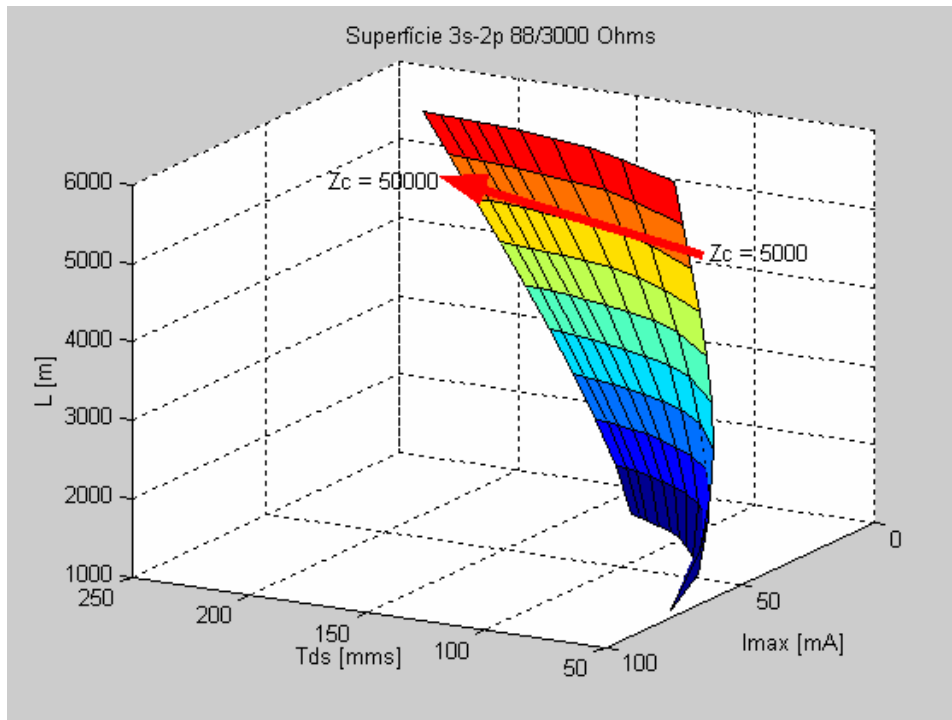


Figura 5.12 - Superfície para o cálculo da impedância de surto para o gerador de impulsos na configuração 3s-2p com $R_f = 88 \Omega$ e $R_c = 3000 \Omega$

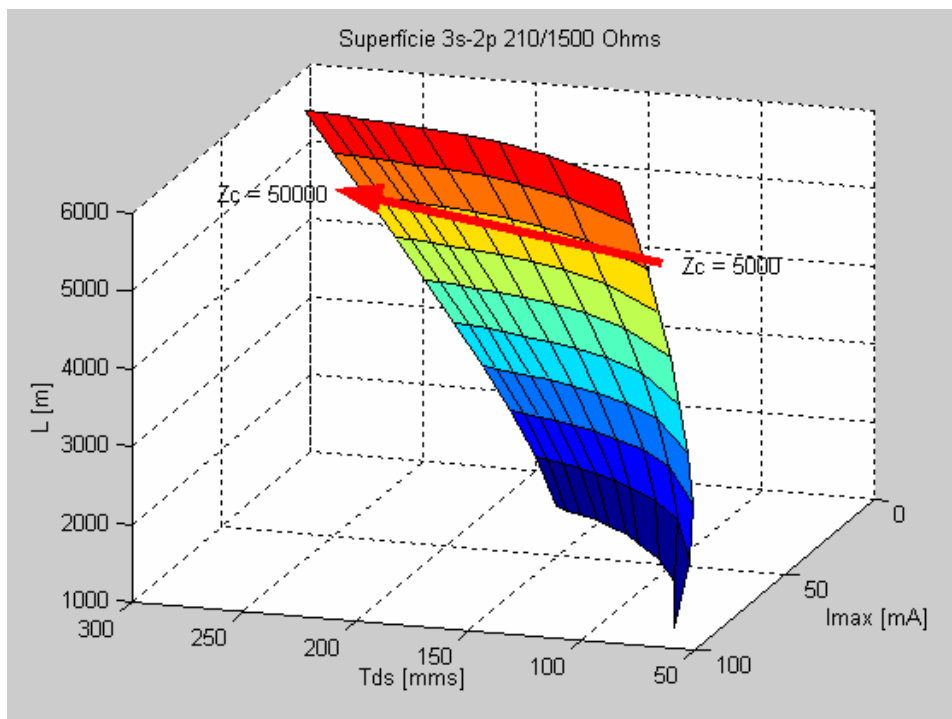


Figura 5.13 - Superfície para o cálculo da impedância de surto para o gerador de impulsos na configuração 3s-2p com $R_f = 210 \Omega$ e $R_c = 1500 \Omega$

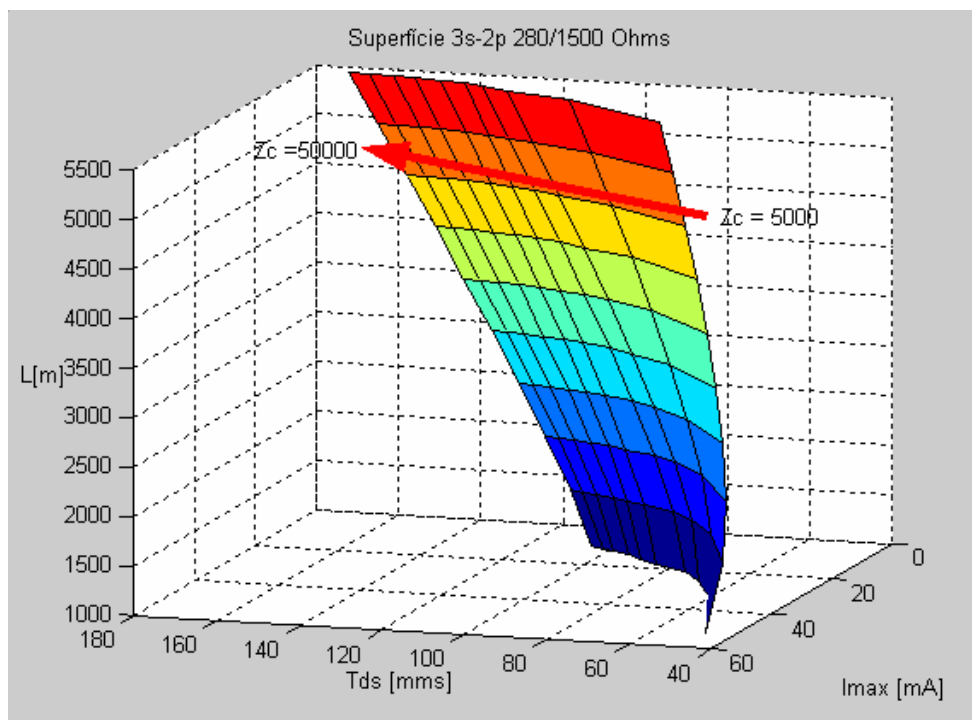


Figura 5.14 - Superfície para o cálculo da impedância de surto para o gerador de impulsos na configuração 3s-2p com $R_f = 280 \Omega$ e $R_c = 1500 \Omega$

Para utilizar os gráficos desenvolvidos neste texto os valores das amplitudes da corrente e da componente da corrente, quando a tensão passa por zero, devem ser referidos para 100 V.

Com o valor da amplitude máxima da corrente já referido a 100 V e com os gráficos da Figura 5.6 ou 5.7 é calculado o valor da capacitância série ou própria – C_p do enrolamento do transformador modelado. Levando o valor máximo de corrente para o zero da tensão referido na superfície correspondente juntamente com o tempo em que a tensão cruza o zero são determinados os valores para o comprimento do enrolamento e para a impedância de surto – linhas paralelas sobre a superfície.

A partir dos valores da impedância de surto e da capacitância entre o enrolamento de alta tensão para o tanque, obtida através com a ponte de Schering, segundo a Equação 5.1, é determinada a indutância sob impulso – L , utilizada no modelo proposto. A indutância sob impulso representa o comportamento do enrolamento quando de fenômenos de alta frequência típicos de impulsos. Esta indutância tende a ser menor do que a utilizada nos modelos em frequência industrial, pois sendo o impulso um sinal de alta frequência, os domínios magnéticos não são polarizados.

$$L = Z_C^2 (C_H + C_{HL}) \quad (5.1)$$

Alternativamente, quando da ausência de valores medidos para C_H e C_{HL} , é possível utilizar as Equações 5.2 e 5.3.

$$C = \frac{1}{vZ_C} \quad (5.2)$$

$$L = \frac{Z_C}{v} \quad (5.3)$$

Para v – velocidade de propagação do surto no interior dos enrolamentos em $m/\mu s$, L – Indutância sob impulso por metro e C – Capacitância para terra por metro. Os valores totais para o enrolamento são obtidos multiplicando-se os valores por unidade pelo comprimento do enrolamento.

5.4 – Exemplo de Cálculo dos Parâmetros

Seja um transformador trifásico de 75 kVA ensaiado com o Gerador do LAT-EFEI montado na sua configuração 3s-2p e com resistência de frente de 280Ω e resistência de cauda, equivalente de 1500Ω . A resistência do derivador de corrente – “Shunt” utilizado durante o ensaio é de 5Ω .

Para esta condição, o oscilograma para uma aplicação de impulso pleno reduzido é o mostrado na Figura 5.15. A capacitância entre o enrolamento de alta tensão e o ponto aterrado, medida, $C_H + C_{HL}$ é igual a $2.398,02 \text{ pF}$.

Durante o ensaio foi aplicado ao transformador um impulso com valor de crista de tensão de $75,7 \text{ kV}$. Neste caso, o valor máximo de corrente para o zero da tensão é $I_{\text{máx}} = 7,54 \text{ A}$ e o valor da amplitude máxima da corrente é $I_p = 113,6 \text{ A}$.

Referindo, de forma linear os valores de corrente dos oscilogramas para 100 V de crista de tensão são obtidos $I_{\text{máx}} = 10 \text{ mA}$ e $I_p = 150,1 \text{ mA}$. Deste modo, na Figura 5.7 $C_P = 1000 \text{ pF}$ e na Figura 5.14, $Z_C = 20000 \Omega$.

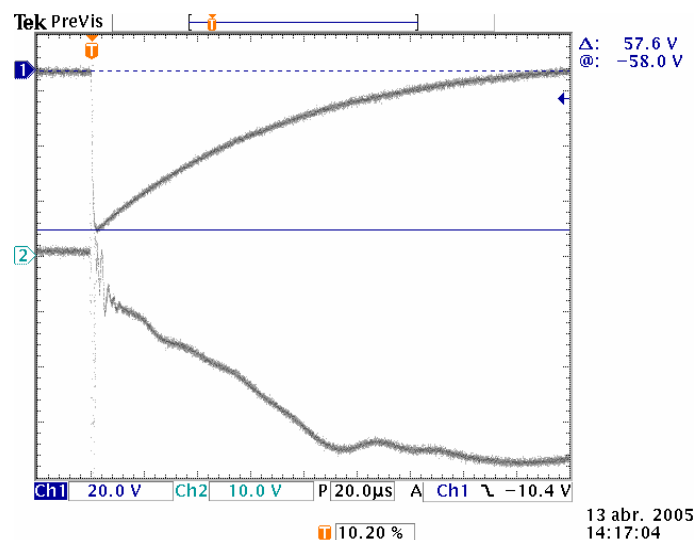


Figura 5.15 – Oscilograma do Impulso Pleno Reduzido

A partir da Equação 5.1 vem:

$$L = ZC^2(C_H + C_{HL}) = 20.000^2 \times 2.398,02 = 959,20 \text{ mH.}$$

No exemplo anterior, a capacitância entre o enrolamento de alta tensão e o ponto aterrado foi medida com auxílio de uma Ponte de Schering. Caso o transformador a ser modelado não possua valores medidos de capacitância para a terra, após calcular a impedância de surto e o comprimento do enrolamento a partir das superfícies mostradas nas Figuras 5.10 a 5.14, é possível calcular a soma das capacitâncias $C_H + C_{HL}$ a partir da Equação 5.2 e a indutância de impulso a partir da Equação 5.3.

5.5 – Modelo de Enrolamentos

A análise do modelo de enrolamento proposto parte primeiro de sua validação via simulação digital com o Programa ATP e posterior comparação com os resultados de ensaios. Primeiramente, os parâmetros obtidos nos ensaios são aplicados ao modelo sem a presença de defeitos. Apesar da possibilidade de aplicar técnicas de correlação, neste trabalho, a comparação dos resultados para verificação de fidelidade é visual. Posteriormente, defeitos são inseridos no modelo validado e novas simulações são realizadas.

5.5.1 – Resultados e Validação dos Modelos

A primeira validação do modelo proposto tem como base os resultados de ensaios e simulação de um transformador trifásico TA de 75 kVA. O ensaio sob impulso foi realizado com o gerador na configuração 3s-2p com uma resistência de frente de 210Ω e uma resistência de cauda equivalente de 1500Ω . Durante o ensaio foi utilizado um derivador de corrente – “Shunt” de 5Ω .

A Figura 5.16 mostra o oscilograma com o resultado da aplicação de um impulso pleno reduzido, com amplitude de 48,35 kV, a partir do qual é obtido o tempo em que o impulso cruza o zero, ou seja, $T_{ds} = 136 \mu s$ e amplitude da corrente para este tempo que é de $I_{Max} = 6 A$.

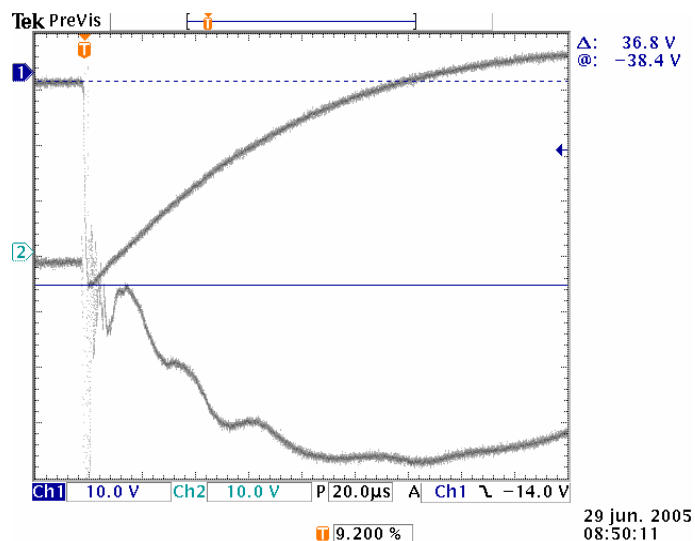


Figura 5.16 – Oscilograma do Impulso Pleno Reduzido do Transformador TA

O oscilograma da Figura 5.17 mostra em detalhe o pico da forma de corrente, para um impulso com amplitude de 48,35 kV. A amplitude do pico inicial de corrente é de $I_P = 146 A$.

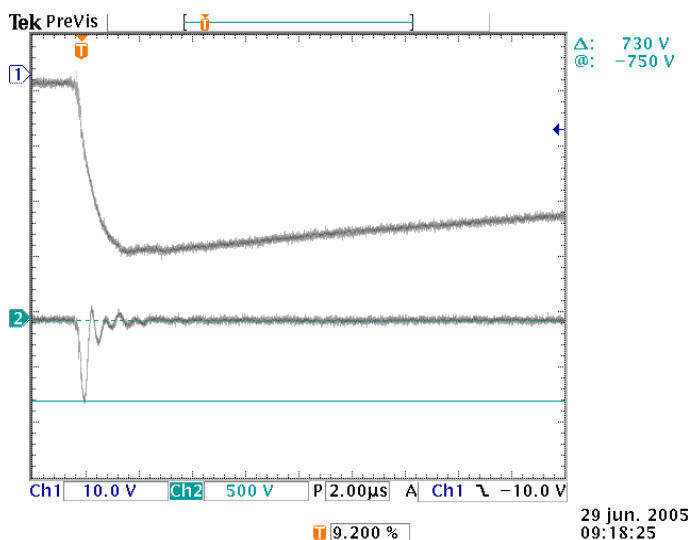


Figura 5.17 – Oscilograma detalhando o pico de corrente inicial para uma aplicação de impulso reduzido de tensão aplicado ao transformador TA

O cálculo dos parâmetros do modelo considera a corrente através dos enrolamentos. O enrolamento de alta tensão do transformador TA é conectado em triângulo. Portanto, conforme mostra a Figura 5.18, a corrente que circula pelo enrolamento é igual à metade da corrente indicada nos oscilogramas.

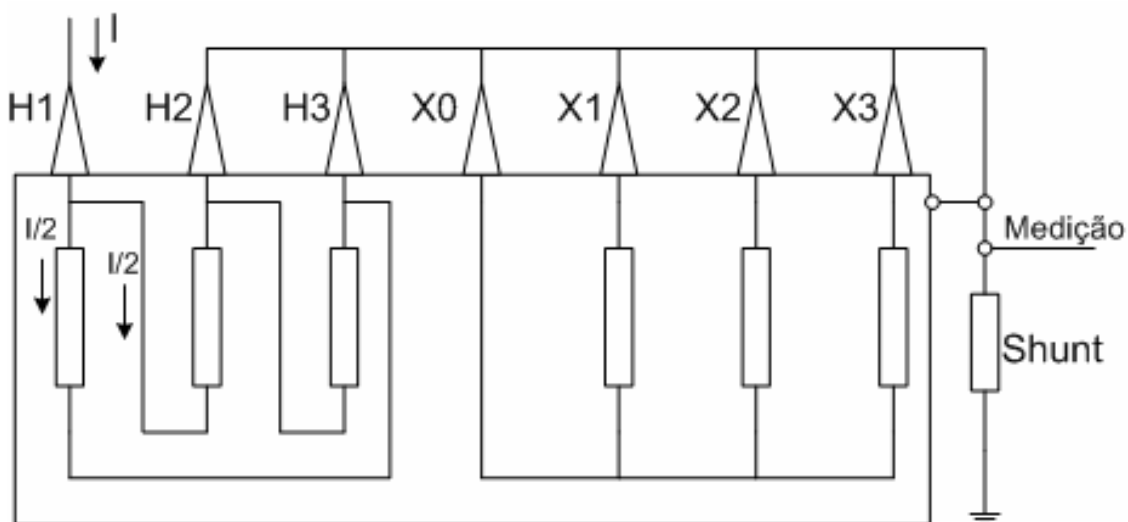


Figura 5.18 – Esquema de ensaio de um transformador triângulo – estrela

Os valores referidos de corrente são $I_{m\acute{a}x} = 6 \text{ mA}$ e $I_P = 151 \text{ mA}$. Não foram medidas as capacitâncias entre os enrolamentos e entre os enrolamentos e terra deste transformador. Logo, para determinar os valores de capacitância equivalente para terra e indutância de impulso é necessário fazer uso das Equações 5.2 e 5.3. Com os valores de $I_{m\acute{a}x}$ e T_{ds} , na Figura 5.13 é obtido o comprimento das bobinas de alta e a

impedância de surto, ou seja, respectivamente $L = 3100$ m e $Z_C = 15500 \Omega$. Deste modo, vem:

$$C = \frac{1}{vZ_C} = \frac{1}{160 \times 10^6 \times 15500} = 0,403 \text{ pF/m}$$

$$L = \frac{Z_C}{v} = \frac{15500}{160 \times 10^6} = 96,8 \text{ } \mu\text{H/m}$$

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros calculados para o modelo do enrolamento de alta deste transformador.

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo do transformador TA

$C_H + C_{HL}$ pF	C_P pF	L mH
1250	830	300

A Figura 5.19 mostra o resultado da simulação do comportamento do modelo de enrolamento proposto na Figura 5.1 sendo os parâmetros os mostrados na Tabela 5.1. Neste caso, a amplitude máxima inicial da corrente é 400 A com uma amplitude para o valor nulo de tensão, na cauda do impulso, de 5,4 A.

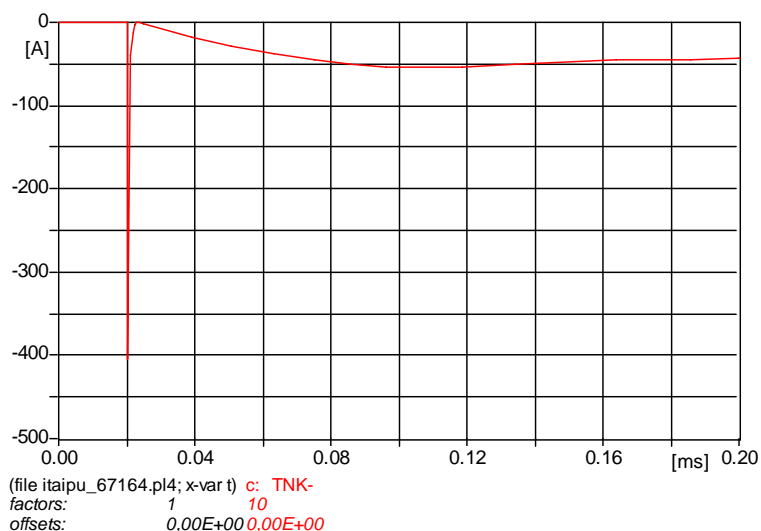


Figura 5.19 – Resultado da simulação do transformador TA

O segundo exemplo desenvolvido tem por base os resultados de ensaio em transformador monofásico TB de 15 kVA. O ensaio sob impulso foi realizado com o gerador na configuração 3s-2p com uma resistência de frente de 280Ω e uma resistência de cauda equivalente de 1500Ω . Durante o ensaio foi utilizado um derivador de corrente – “Shunt” de 2Ω .

A Figura 5.20 mostra o oscilograma com o resultado da aplicação de um impulso pleno reduzido, com amplitude de $75,16 \text{ kV}$, a partir do qual é obtido o tempo em que o impulso cruza o zero, ou seja, $T_{ds} = 160 \mu\text{s}$ e amplitude da corrente para este tempo que é de $I_{Max} = 7,5 \text{ A}$.

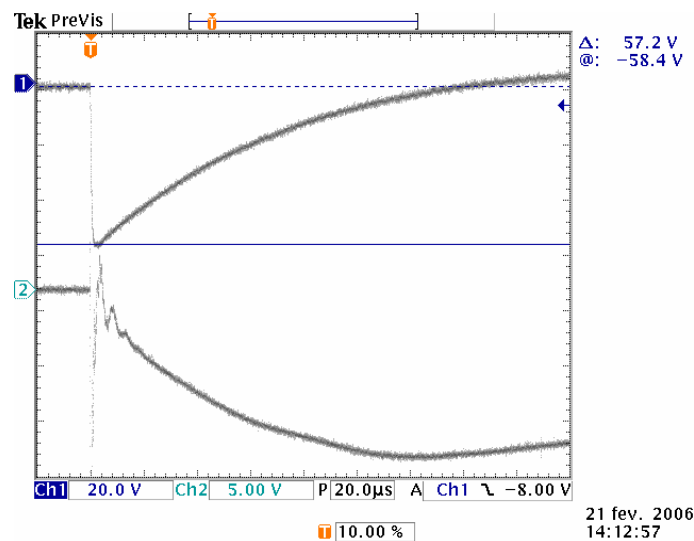


Figura 5.20 – Oscilograma do impulso pleno reduzido do transformador TB

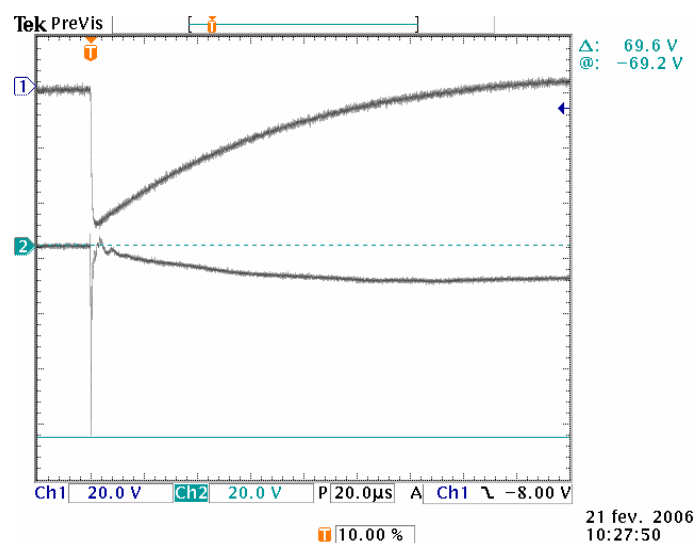


Figura 5.21 – Oscilograma detalhando o pico de corrente inicial para uma aplicação de impulso reduzido de tensão aplicado ao transformador TB

O oscilograma da Figura 5.21 mostra em detalhe o pico da forma de corrente, para um impulso com amplitude de 75,16 kV. A amplitude do pico inicial de corrente é de $I_P = 34,8$ A.

Considerando características desenvolvidas para um derivador de corrente – “Shunt” com resistência de 2Ω , de modo similar ao anteriormente desenvolvido, a Tabela 5.2 mostra os parâmetros calculados para o modelo do enrolamento de alta do transformador - TB.

Tabela 5.2 – Parâmetros do modelo do transformador TB

$C_H + C_{HL}$ pF	C_P pF	L mH
1920	200	500

A Figura 5.22 mostra o resultado da simulação do comportamento do modelo de enrolamento proposto na Figura 5.1 sendo os parâmetros os mostrados na Tabela 5.2. Neste caso, a amplitude máxima inicial da corrente é 61,75 A com uma amplitude para o valor nulo de tensão, na cauda do impulso, de 6,13 A.

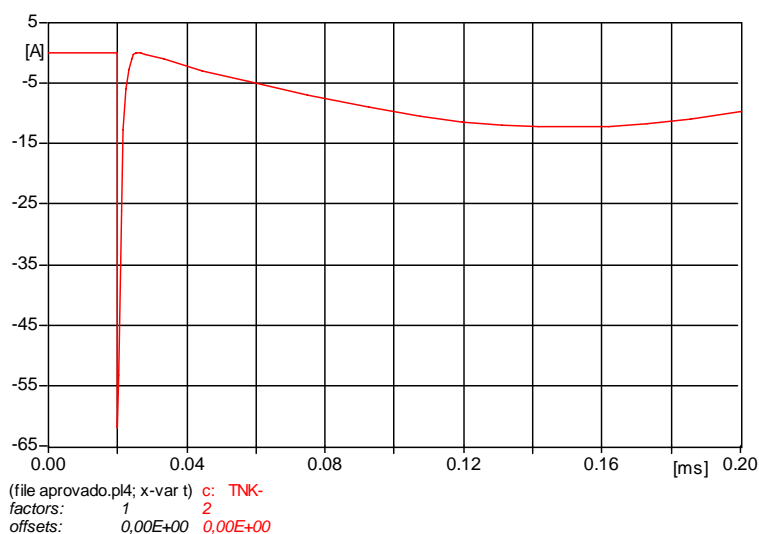


Figura 5.22 – Resultado da simulação do transformador TB

O terceiro exemplo desenvolvido tem por base os resultados de ensaio em transformador monofásico TC de 15 kVA. O ensaio sob impulso foi realizado com o gerador na configuração 3s-2p com uma resistência de frente de 280Ω e uma resistência de cauda equivalente de 1500Ω . Durante o ensaio foi utilizado um derivador de corrente – “Shunt” de 25Ω . A Figura 5.24 mostra o oscilograma obtido do ensaio.

O oscilograma da Figura 5.23 evidencia a existência de um sinal de extinção de arco, possivelmente associado a um curto-circuito entre espiras.

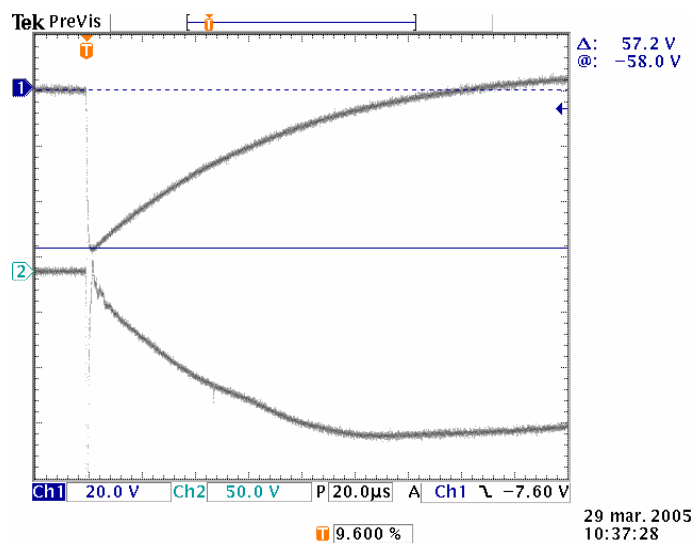


Figura 5.23 – Oscilograma do impulso pleno reduzido do transformador TC

Para modelar estes fenômenos, nas simulações com o Programa ATP, são inseridas chaves em série com resistências de falta, conforme mostrado na Figura 5.24.

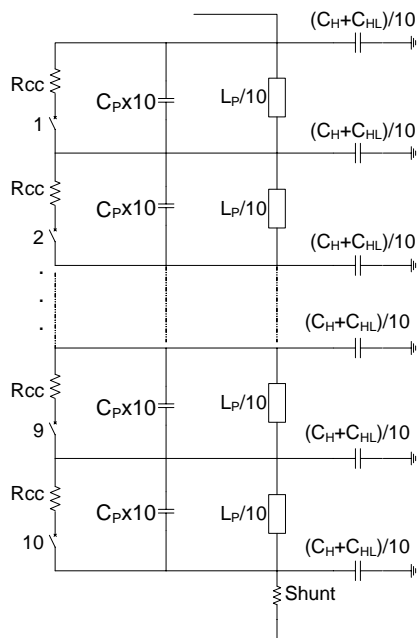


Figura 5.24 – Modelo do enrolamento do transformador com defeito

A Figura 5.23 mostra o oscilograma com o resultado da aplicação de um impulso pleno reduzido, com amplitude de 75,16 kV, a partir do qual é obtido o tempo em que o impulso cruza o zero, ou seja, $T_{ds} = 164 \mu s$ e amplitude da corrente para este tempo que é de $I_{Max} = 5,75 A$.

Considerando características desenvolvidas para um derivador de corrente – “Shunt” com resistência de 25Ω , de modo similar ao anteriormente desenvolvido, a Tabela 5.3 mostra os parâmetros calculados para o modelo do enrolamento de alta do transformador – TC.

Tabela 5.3 – Parâmetros do modelo do transformador TC

$C_H + C_{HL} pF$	$C_P pF$	$L mH$	$R_F \Omega$
1000	700	450	500

O valor da resistência em série com as chaves utilizadas para simular curtos entre espiras no modelo correspondente à resistência de arco é ajustado de modo a limitar a amplitude das oscilações em alta frequência a valores observados nos oscilogramas. Um modelo mais elaborado para os enrolamentos pode resultar em resistências de arco com valores próximos do real.

A Figura 5.25 mostra o resultado da simulação do comportamento do modelo de enrolamento proposto na Figura 5.2 sendo os parâmetros os mostrados na Tabela 5.3. Neste caso, a amplitude para o valor nulo de tensão, na cauda do impulso, de 6,03 A.

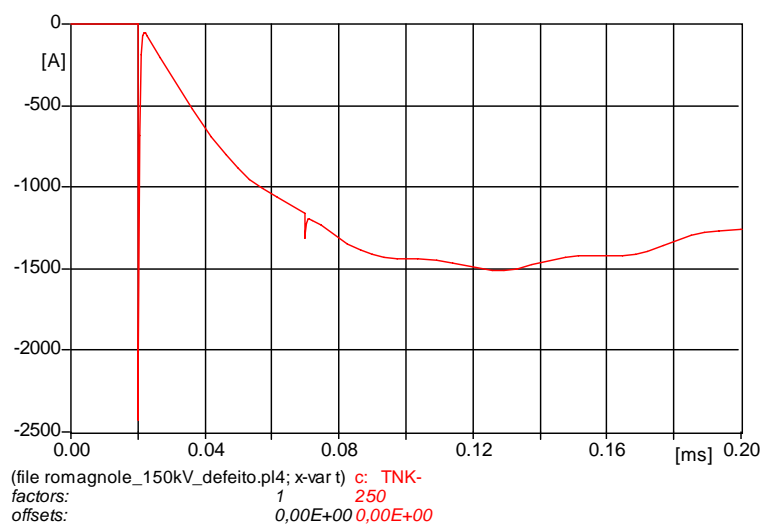


Figura 5.25 – Resultado da simulação do transformador TC

5.5.2 – Comparação de Resultados

A Figura 5.26 mostra a comparação entre os resultados obtidos em ensaio e simulação para o transformador TA. Neste caso, é possível observar que o modelo proposto apresenta uma concordância razoável em relação ao comportamento observado no ensaio.

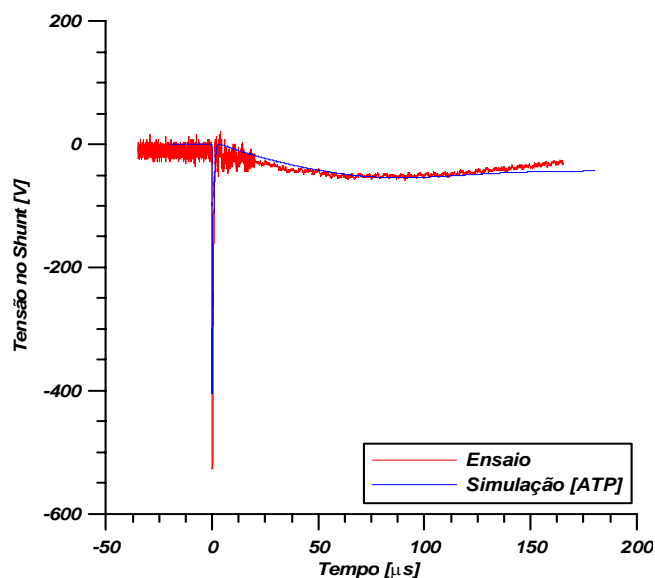


Figura 5.26 – Comparação entre Resultados de Ensaio e de Simulação para o Transformador TA

A Figura 5.27 mostra a comparação entre os resultados obtidos em ensaio e simulação para o transformador TB. Também neste caso, é possível observar que o modelo proposto apresenta uma concordância satisfatória em relação ao comportamento verificado no ensaio. As diferenças observadas podem ser atribuídas ao tipo de enrolamento deste transformador.

A Figura 5.28 mostra a comparação entre os resultados obtidos em ensaio e simulação para o transformador TC. Novamente é possível observar que o modelo proposto apresenta concordância em relação ao comportamento verificado no ensaio. As diferenças observadas neste caso, uma vez que se conhece o projeto do transformador, podem ser atribuídas ao tipo de enrolamento. O modelo proposto trabalha com enrolamentos contínuos e o transformador TC é construído com enrolamentos tipo panqueca.

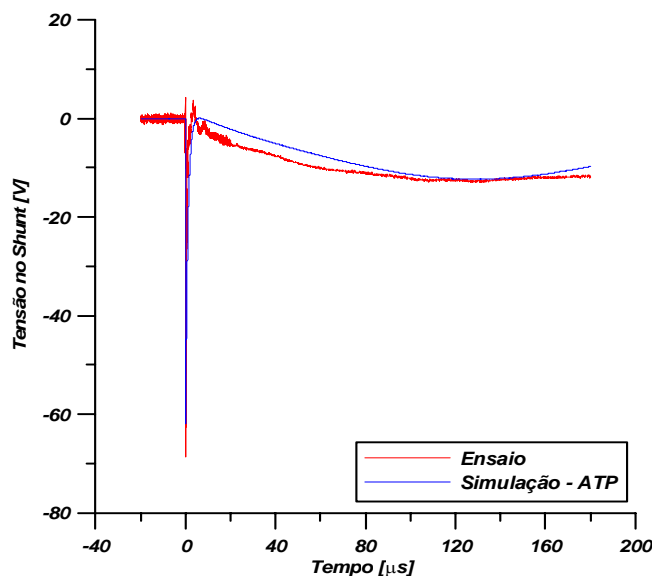


Figura 5.27 - Comparação entre resultados de ensaio e de simulação para o transformador TB

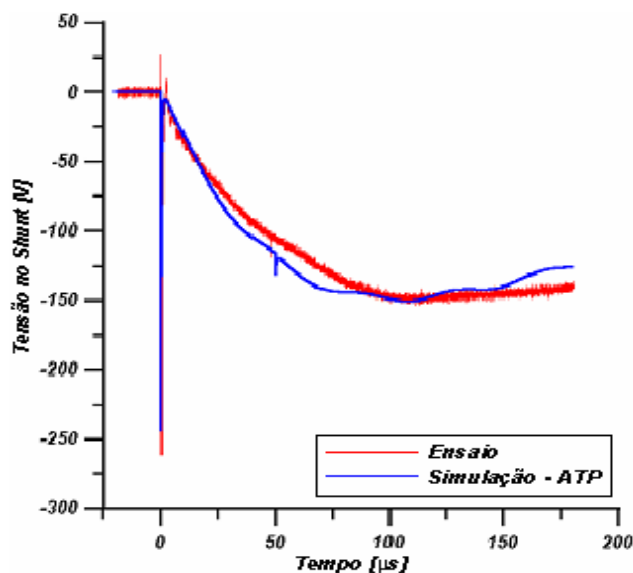


Figura 5.28 - Comparação entre resultados de ensaio e de simulação para o transformador TC

5.6 – Comentários

Superfícies similares às mostradas nas Figuras 5.10 a 5.14, além permitirem estimar o valor da impedância de surto, possibilitam avaliar o comprimento dos enrolamentos dos transformadores.

Para os transformadores TB e TC deve-se fazer um estudo que contemple modelos para enrolamentos do tipo panqueca.

Ao se modelar um determinado tipo de falha, é sugerido investigar um possível detalhamento das cabeças das bobinas – início dos enrolamentos de modo a evitar a

utilização de resistências de arco muito elevadas, no processo de limitação da amplitude da corrente associada a curtos-circuitos entre espiras.

É possível afirmar-se que o modelo proposto para o estudo do comportamento dos enrolamentos dos transformadores, com base em parâmetros de ensaio em frequência fundamental e sob impulso possui uma concordância satisfatória em relação ao comportamento observado durante ensaios. De modo complementar, é possível comprovar que os sinais observados nas formas de corrente, às vezes atribuídas a oscilações induzidas de alta frequência, podem significar falhas no isolamento dos transformadores.

CAPÍTULO 6

Conclusões e Propostas

A modelagem dos componentes dos sistemas elétricos é uma ferramenta muito útil para a previsão do comportamento frente ao conjunto de solicitações que ocorrem durante a operação, como por exemplo, curtos-circuitos, energizações, descargas atmosférica, entre outros. Dependendo do grau de detalhamento os estudos possibilitam verificar a necessidade de tirar os componentes de operação, garantindo a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

Este trabalho teve como objetivo a modelagem do transformador de distribuição para estudos de fenômenos de alta frequência.

Em um primeiro momento, foi desenvolvido um modelo para o estudo da Função de Transferência do Transformador, que teve como conclusão que o modelo mais simples – Modelo de Primeira Ordem – é o que apresenta melhor concordância em relação à Função de Transferência obtida experimentalmente.

Em seqüência, foram aplicados impulsos que representativos de surtos atmosféricos a surtos de manobra em alguns transformadores monofásicos. Simulando o Modelo de Primeira Ordem e, assim comparados os resultados da simulação com os obtidos experimentalmente. Para transformadores onde a capacitância CHL é maior que a capacitância CL, com o objetivo de melhorar a concordância entre os comportamentos experimentais e os obtidos de simulação, foi sugerida a inclusão de uma capacitância interna ao modelo do transformador como descrito no Capítulo 4.

As formas de corrente obtidas nos ensaios de impulso de alguns transformadores apresentam oscilações em alta frequência, normalmente associadas a processos de indução nos sistemas de medição. No Capítulo 5 foi proposto um modelo que pode ser utilizado para reproduzir o comportamento dos enrolamentos durante os ensaios de impulso. As comparações realizadas permitem concluir que o modelo apresenta uma concordância razoável em relação ao comportamento observado durante o ensaio.

Sugere-se a modelagem do núcleo para altas frequências, o detalhamento do núcleo para a simulação de defeitos no enrolamento e o estudo de modelagem do transformador levando em consideração o tipo de enrolamento com o qual é construído, como proposta para trabalhos futuros.

Bibliografia

- [1]- Roy, C. K., Biswas, J. R: “Studies on Impulse Behavior of a Transformer Winding with Simulated Faults by Analogue Modeling” – IEE Proceedings Generation Transmission Distribution, Vol. 141, No. 5, September 1994.
- [2]- Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients – Working Group 33.02 –CIGRÉ – November 1990.
- [3]- Al Fuhaid, A. S: “Frequency Characteristics of Single-Phase Two-Winding Transformers Using Distributed-Parameter Modeling” – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No 4, October 2001.
- [4]- Bachega, R. J., Pivato, J. K. A., de Souza, A. J., Martinez, M. L. B.: “Digital Models of Transformers for Applications on Electromagnetic Transient Studies” - Ground 2002 Proceedings.
- [5]- Bachega, R. J., Martinez, M. L. B.: “On Transformer Modeling to Transferred Voltages Studies” – Ground 2004 Proceedings.
- [6]- Rüdénberg, R. – “Electric Shock Waves in Power Systems”, Harvard University Press, Cambridge – Massachusetts, 1968- pp. 149-151.
- [7]- Rüdénberg, R. – “Electric Shock Waves in Power Systems”, Harvard University Press, Cambridge – Massachusetts, 1968- pp. 220 - 223.
- [8]- Ravaglio, M. A. – Apostila – “Ensaio de Impulso em Transformadores” LAC/COPEL, 1989.