

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO CARNEIRO LYRA AMARAL

ESTUDO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL INTELIGENTE PARA
AUXILIAR A ANÁLISE DE ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS EM
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

BAURU

2010

FERNANDO CARNEIRO LYRA AMARAL

ESTUDO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL INTELIGENTE PARA
AUXILIAR A ANÁLISE DE ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS EM
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada como requisito final à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Pedro da Costa Jr.

BAURU

2010

Amaral, Fernando Carneiro Lyra.

Estudo de uma Ferramenta Computacional Inteligente
Para Auxiliar a Análise de Ensaios de Impulsos
Atmosféricos em Transformadores de Distribuição /
Fernando Carneiro Lyra Amaral, 2010.

113 f.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Pedro da Costa Jr

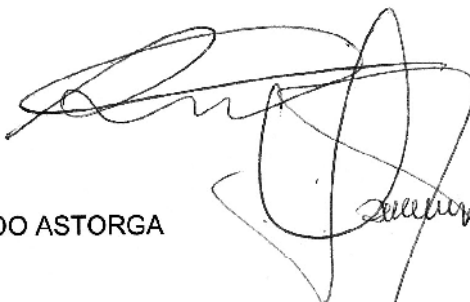
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru, Engenharia
Elétrica, Bauru, 2010

1. Transformadores de Distribuição. 2. Ensaios de
Impulso Atmosférico. 3. Ferramenta Computacional. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de Fernando Carneiro Lyra Amaral, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do(a) Faculdade de Engenharia de Bauru.

Aos 20 dias do mês de agosto do ano de 2010, às 09:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de FERNANDO CARNEIRO LYRA AMARAL, intitulado "ESTUDO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL INTELIGENTE PARA AUXILIAR A ANÁLISE DE ENSAIOS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA



Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA

Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS



Dedico este trabalho,
primeiro a Deus o maior engenheiro já existente,
à minha amada esposa, à minha filha e aos
meus pais que me incentivaram e que me
deram total apoio para a concretização
desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em especial à minha doce esposa “Lê”, que com muito amor suportou minha constante ausência para a realização deste trabalho, te amo tanto que não dá para dizer em poucas palavras, tenha certeza que este esforço será recompensado. Também à minha filha, quero lhe dizer que você veio brilhar em nossas vidas, saiba que te amo e estou ansioso para te carregar no colo, Maria Fernanda.

Sou imensamente grato aos meus pais, Antonio Augusto e Maria Inês, os quais não mediram esforços para que eu concluísse mais este trabalho, amo vocês. Tenho uma dívida de amor para sempre com vocês.

Agradeço ao Prof. Dr. André Nunes de Souza que é o meu mentor acadêmico, o qual sempre com grandes expectativas me mantém motivado, desde 2000, quando o procurei para fazer Iniciação Científica. Sua amizade foi uma dádiva que contribuiu bastante para a minha carreira e formação como pessoa.

Quero agradecer também ao Prof. Dr. Pedro da Costa Júnior que me co-orientou, me ajudando muito no desenvolvimento deste trabalho e pela sua grande amizade.

Agradeço também ao Dr. Welson Bassi, chefe do laboratório de alta tensão IEE/USP, o qual sem ressalva, nos ajudou, contribuindo de forma peculiar para este trabalho.

Ao Eng. Helton Carlos Romagnoli que me apoiou nesta empreitada, sua amizade e sua preocupação, serão sempre lembrados.

Ao Eng. Vantuir Pereira Batista Jr., o qual me apoiou na Duratex para que eu pudesse concretizar esta etapa da minha vida.

Aos meus colegas de trabalho, que deram suporte durante a minha ausência, Dorival Thomazelli (professor), Luiz Henrique Roxo, Luiz Henrique Ramos, Gilson Rodrigues da Silva, Fernando César Jesuíno. Além destes a todos que direta e indiretamente me auxiliaram durante este tempo.

RESUMO

A proposta deste trabalho consiste em investigar e analisar o comportamento de transformadores de distribuição de 25 kVA e de 45 kVA submetidos a ensaios de impulsos atmosféricos. Essa investigação consistiu da verificação da influência dos valores de tempos de frente e de cauda, da forma de onda do impulso, na amplitude das correntes produzidas nos enrolamentos do transformador durante o ensaio. Tais correntes são usualmente empregadas para avaliar o desempenho elétrico dos transformadores e, nessa dissertação, foram usadas para o treinamento e teste de Redes Neurais Artificiais desenvolvidas como ferramentas inteligentes computacionais.

Neste contexto, o desempenho de duas Redes Neurais foi avaliado. A primeira rede usou como variáveis de entrada, os valores de tempo de frente, de cauda e da tensão máxima (crista) e, como saída, a corrente máxima no transformador. Na segunda rede neural, a entrada correspondente ao valor da tensão máxima, da primeira rede neural, é substituída pelo valor da taxa de crescimento da tensão. Com base nos resultados obtidos, pode-se verificar que, para determinados valores de tempos de frente e de cauda, a amplitude da corrente máxima, aumenta ou diminui, apresentando um comportamento não-linear. A utilização das Redes Neurais desenvolvidas neste trabalho poderá auxiliar na escolha das características das formas de onda de impulso que tornem mais sensíveis os ensaios de impulsos atmosféricos em transformadores de distribuição. O objetivo é que esse aumento da sensibilidade do ensaio minimize o empirismo e erros de avaliação, contribuindo para tornar mínima a taxa de falha em transformadores.

Palavras - chave: Transformadores, Redes Neurais, Ensaio de Impulso Atmosférico, Forma de Onda.

ABSTRACT

The proposal of this work is to investigate and to analyze the behavior of 25 kVA and 45 kVA distribution transformers under impulses/surge tests. This research consisted in a verification of the influence of front and tail time values, from surge waveform, in the current magnitude produced in transformer windings during the test. Such currents are usually employed to evaluate the electric performance of transformers and, in this dissertation, were used for the training and testing the Artificial Neural Networks, developed as intelligent computational tools.

In this context, the performance of two Neural Networks was evaluated. The first network has used as entry variables: front and tail time and the maximum voltage (crest) values and, as an exit, the maximum current in transformer. In the second neural network, the entry corresponding to the maximum voltage value, from the first neural network, is replaced by the value of the rate of growth of the voltage. Based on the obtained results, one may find out, for certain values front and tail time values, the amplitude of maximum current, increases or decreases, presenting a non-linear behavior. The use of Neural Networks developed in this work can help someone to choose the best impulse waveform characteristics which make the impulse test in distribution transformers more sensitive. The objective is that the rising the test sensitivity will minimize the empiricism and errors of assessment, helping to reduce the failure rate in transformers.

Keywords: Transformers, Neural Networks, Impulse Tests, Waveform.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. a) Impulsos de corrente após ajuste na escala para comparação b) Impulso original.....	20
Figura 2.2. a) Impulso pleno com valor reduzido (62,5%) b) Impulso pleno.	21
Figura 2.3. Comparação entre impulso de corrente com e sem Falha [14].	22
Figura 3.1. Modelo não-linear de um neurônio	25
Figura 3.2. Rede Perceptron Multicamadas.....	27
Figura 4.1. Esquema simplificado de um gerador de impulso.	32
Figura 4.2. Circuito típico de ensaio de impulso.	34
Figura 4.3. a) Corrente no neutro. b) Corrente no enrolamento (medida através de outras fases).....	36
Figura 4.4. a) Corrente transferida. b) Corrente no tanque.	36
Figura 4.5. a) Tensão transferida. b) Corrente da linha.	37
Figura 4.6. Onda normalizada 1,2 x 50 μ s.	38
Figura 4.7. Circuito para determinação da forma de onda para enrolamentos de alta indutância.	44
Figura 5.1. Circuito de ensaio para aplicação de testes de impulso.	49
Figura 5.2. Gráfico de Tensão H1 Tap1 Impulso Pleno – Crista 95,1 kV.	50
Figura 5.3. Gráfico de Corrente H1 Tap1 Impulso Pleno – Crista 95,1 kV.....	50
Figura 5.4. Gráfico de Tensão H1 Tap3 para Impulso Pleno - Crista 109,5 kV.....	51
Figura 5.5. Gráfico de Corrente H1 Tap3 para Impulso Pleno - Crista 109,5 kV.	51
Figura 5.6. Primeira arquitetura neural implementada para a estimação do problema (RNA1).	53
Figura 5.7. Segunda arquitetura neural implementada para a estimação do problema (RNA2).	53
Figura 5.8. Correlação linear Y x T da primeira rede para o transformador de 45 kVA.	55

Figura 5.9. Correlação linear Y x T da primeira rede para o transformador de 25 kVA.	56
Figura 5.10. Correlação linear Y x T da segunda rede para o transformador de 45 kVA.	56
Figura 5.11. Correlação linear Y x T da segunda rede para o transformador de 25 kVA.	57
Figura 5.12. Função de ativação tangente-sigmóide.	61
Figura 5.13. Função de ativação linear.	61
Figura 5.14. Desempenho da RNA em relação ao limite de 10^{-5}	62
Figura 5.15. Desempenho da RNA em relação ao limite de 10^{-5}	64
Figura 5.16. Desempenho da RNA 4 em relação ao limite de 10^{-5}	66
Figura 5.17. Desempenho da RNA 2 da Tabela 5.11.	67
Figura 6.1. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	70
Figura 6.2 Gráfico em três eixos para 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	71
Figura 6.3. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	72
Figura 6.4. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	73
Figura 6.5. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	75
Figura 6.6. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	76
Figura 6.7 Gráfico em três eixos para 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	77
Figura 6.8. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	78
Figura 6.9. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	79
Figura 6.10. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	80
Figura 6.11. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	81
Figura 6.12. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_f de 1,17 (1), 1,32 (2) e 1,39 μ s (3).	82
Figura 6.13. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	83

Figura 6.14. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_f de 1,17 (1), 1,32 (2) e 1,39 μ s (3).	84
Figura 6.15. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3).	85
Figura 6.16. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	86
Figura 6.17. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3).....	87
Figura 6.18. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	88
Figura 6.19. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	89
Figura 6.20. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	90
Figura 6.21. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	91
Figura 6.22. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	92
Figura 6.23. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	94
Figura 6.24. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	94
Figura 6.25. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	95
Figura 6.26. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	96
Figura 6.27. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/us e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s(3).....	97
Figura 6.28. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_f de 1,17 (1), 1,32 (2) e 1,39 μ s(3).....	98

Figura 6.29. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	99
Figura 6.30. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_f de 1,17(1), 1,32(2) e 1,39 μ s(3).....	100
Figura 6.31. Transformador de 25 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3).	101
Figura 6.32. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	102
Figura 6.33. Transformador de 25 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3).	102
Figura 6.34. Transformador de 25 kVA $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).	103
Figura 6.35. $I_{m\acute{a}x}$ x $\Delta V/\Delta t$ para o Transformador de 45 kVA.	104
Figura 6.36. $I_{m\acute{a}x}$ x $\Delta V/\Delta t$ para o Transformador de 25 kVA.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Seqüência de ensaio para impulsos não normalizados.	48
Tabela 5.1. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA1 para 45 kVA...57	57
Tabela 5.2. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA1 para 25 kVA...58	58
Tabela 5.3. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA2 para 45 kVA...58	58
Tabela 5.4. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA2 para 25 kVA...58	58
Tabela 5.5. Pesos e limiares da RNA1 após treinamento.	59
Tabela 5.6. Pesos da RNA2 após treinamento.....	60
Tabela 5.7. Limiares da RNA2 após treinamento.	60
Tabela 5.8. Erros médios quadráticos para diferentes funções de ativação.	62
Tabela 5.9. Erros médios quadráticos para diferentes funções de treinamento.....	64
Tabela 5.10. Erros médios quadráticos para diferentes números de neurônios.....	65
Tabela 5.11. Alguns treinamentos para a rede neural utilizando 20 neurônios.....	67
Tabela 6.1. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	71
Tabela 6.2. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	72
Tabela 6.3. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	74
Tabela 6.4. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	75
Tabela 6.5. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	76
Tabela 6.6. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	78
Tabela 6.7. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	79
Tabela 6.8. Transformador de 25 kV com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	80
Tabela 6.9. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).	90
Tabela 6.10. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).	91

Tabela 6.11. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).
.....92

Tabela 6.12. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).
.....93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivo	15
1.3	Estrutura.....	16
2	RELEVÂNCIA E ORIGINALIDADE	17
2.1	Introdução	17
2.2	Avaliação da corrente em ensaios de impulso atmosférico	19
2.3	Estudos sobre ensaios de impulso atmosférico	22
3	INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA SOBRE SISTEMAS INTELIGENTES.....	25
3.1	Noções Básicas	25
3.2	O Neurônio Artificial.....	25
3.3	Tipos de Função de Ativação.....	26
3.4	Ajuste dos Pesos Sinápticos.....	27
3.5	Arquitetura de Rede	27
3.6	Treinamento da Rede	27
3.6.1	Mapeamento da Rede	28
3.6.2	Algoritmo de Treinamento	30
4	ENSAIOS E ANÁLISES EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO	31
4.1	Ensaios de Alta Tensão em Transformadores.....	31
4.2	Geração da Alta Tensão no Laboratório	31
4.3	Circuito de Ensaio no Laboratório.....	33
4.3.1	Circuito de Medição de Impulso	35
4.3.2	Circuito de Corte	35
4.3.3	Circuitos para Detecção de Falhas.....	36
4.4	Forma de Onda Normalizada.....	37
4.5	Procedimento de Ensaio em Transformadores	38
4.6	Metodologia Experimental Para o Ensaio de Impulso Atmosférico.....	39
4.6.1	Ligações dos Terminais do Transformador	39
4.6.2	Forma de Impulso Atmosférico, Ajuste e Tolerância	40
4.6.3	Registros Oscilográficos, Métodos de Detecção de Falhas.....	41
4.7	Controle da Forma de Onda dos Impulsos Atmosféricos	43
5	DIRETRIZ METOLÓGICA DA PESQUISA.....	46

5.1	Introdução e Descrição da Metodologia	46
5.2	Obtenção dos Dados Para Implementação da Abordagem Neural	47
5.2.1	Ensaio Normalizados	47
5.2.2	Ensaio Não-Normalizados	48
5.2.3	Circuito Ensaio	49
5.2.4	Especificação Técnica do Gerador de Impulso e do Sistema de Medição	49
5.2.5	Formas de ondas dos ensaios.....	50
5.3	Arquiteturas Neurais Utilizadas.....	52
5.4	Desempenho das Redes Neurais Utilizadas.....	54
5.5	Refinamento dos Sistemas Inteligentes Aplicados ao Estudo	60
5.5.1	Refinamento da Rede Quanto à Influência das Funções de Transferência	61
5.5.2	Refinamento da Rede Quanto à Influência à Influência do Algoritmo de Treinamento.....	63
5.5.3	Refinamento da Rede Quanto à Influência do Número de Neurônios	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
6.1	Introdução	69
6.2	Corrente Máxima em Função do Tempo de Frente para a RNA1	70
6.2.1	Resultados para o Transformador de 45 kVA	70
6.2.2	Resultados para o Transformador de 25 kVA	76
6.3	Corrente Máxima em Função do Tempo de Cauda para a RNA1	81
6.3.1	Resultados para o Transformador de 45 kVA	81
6.3.2	Resultados para o Transformador de 25 kVA	85
6.4	Corrente Máxima em Função do Tempo de Frente para a RNA2	89
6.4.1	Resultados para o Transformador de 45 kVA	89
6.4.2	Resultados para o Transformador de 25 kVA	93
6.5	Corrente Máxima em Função do Tempo de Cauda para a RNA2	97
6.5.1	Resultados para o Transformador de 45 kVA	97
6.5.2	Resultados para o Transformador de 25 kVA	101
6.6	Corrente Máxima em Função da Taxa de Crescimento da Tensão para a RNA2 ...	104
7	CONCLUSÕES, TRABALHOS FUTUROS E PUBLICAÇÕES.....	107
7.1	Conclusões.....	107
7.2	Trabalhos Futuros	108
7.3	Publicação Durante a Pesquisa	109
	REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Sabe-se que o transformador assume um papel fundamental em um sistema elétrico de distribuição, não somente pelo volume de investimento que ele exige, como também pela sua elevada responsabilidade na qualidade do serviço prestado ao consumidor [1]. Deste modo, a identificação precisa de eventuais falhas em transformadores frente às descargas atmosféricas, torna-se imprescindível para evitar a queima de transformadores.

No passado, falhas nos enrolamentos de transformadores eram avaliadas através da experiência de profissionais que recorriam a uma simples comparação de formas de onda de corrente [2]. Para aprimorar a capacidade de se interpretar os ensaios de impulso atmosférico exigidos por norma, averiguando a suportabilidade de transformadores de distribuição antes de entrarem em serviço, novos modelos matemáticos que descrevem o comportamento do processo de descargas atmosféricas têm sido elaborados e novas técnicas computacionais têm sido desenvolvidas.

Considerando este panorama, a habilidade das Redes Neurais Artificiais (RNA) em mapear funções não-lineares complexas as torna uma ferramenta computacional atrativa para avaliar o desempenho dos transformadores frente às ensaios de impulso, uma vez que é notória a influência dos parâmetros da forma de onda aplicada em transformadores sob ensaio, na análise de falhas através da corrente nos enrolamentos deste.

É importante mencionar que algumas falhas incipientes em transformadores de distribuição são difíceis de identificar através de ensaios de impulso, principalmente, quando se utiliza a avaliação da corrente e não há uma diferença significativa na comparação das formas de onda.

Dentro deste contexto, situa-se a pesquisa, que se caracteriza principalmente pela proposta de integrar elementos da Inteligência Computacional visando colaborar na análise de ensaios de impulsos atmosféricos em transformadores de distribuição.

1.2 Objetivo

O objetivo da pesquisa é investigar e analisar o comportamento de transformadores de distribuição de 25 kVA e de 45 kVA frente a ensaios de impulsos atmosférico, levando-se em conta a variação dos tempos de frente e de cauda padronizados nos ensaios e os seus impactos

na amplitude das correntes que são utilizadas para avaliar o desempenho dos transformadores através de redes neurais artificiais.

1.3 Estrutura

Esta pesquisa está estruturada da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 apresenta a importância dos ensaios de impulso atmosférico na identificação de falhas, bem como a relevância e originalidade da pesquisa proposta;
- O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre redes neurais artificiais;
- O Capítulo 4 discursa sobre os estudos e análise de ensaios experimentais em laboratório de alta tensão;
- O Capítulo 5 apresenta a metodologia empregada neste trabalho para a identificação de falhas em transformadores através de aplicações de técnicas inteligentes;
- O Capítulo 6 apresenta os resultados e discussões do trabalho desenvolvido; e
- O Capítulo 7 apresenta as conclusões, algumas sugestões de trabalhos futuros e os trabalhos que foram publicados durante o desenvolvimento deste trabalho.

2 RELEVÂNCIA E ORIGINALIDADE

2.1 Introdução

Transformadores são elementos essenciais e vitais dos sistemas de energia elétrica e sua proteção é essencial. Considerando este fato, tem-se que a detecção de falhas incipientes antes do tempo nos enrolamentos de transformador é de extrema importância, para que medidas corretivas e / ou preventivas sejam tomadas para evitar a interrupção durante sua operação [3].

Em função da importância de transformadores de distribuição em serviço, uma atenção especial tem sido dada pelas concessionárias de energia elétrica no desenvolvimento e na construção, atentando para o tipo de óleo e sua devida isolação. Neste sentido, testes e ensaios com os Níveis Básicos de Impulso (NBI) são realizados e definidos a partir de testes padrões prescritos em normas técnicas nacionais e internacionais [4,5] que tem como finalidade a avaliação da isolação e detecção de falhas incipientes [6].

Sabe-se que os transformadores de distribuição podem falhar ou serem danificados durante a incidência de descargas, a despeito das precauções tradicionais para proteção de descargas. Os defeitos não são diretamente atribuídos à imperfeição na construção, sobrecarga em pequenos trechos, ou à falta de proteção do enrolamento primário contra sobretensão. Eles tipicamente ocorrem no enrolamento primário como furos na isolação [7].

Os furos no isolamento nem sempre são imediatamente percebidos na falha do transformador; às vezes o transformador continua em serviço somente com sintomas de defeitos, sendo a alta tensão de serviço causada por pequenas mudanças no primário. Isso pode provocar uma avaria significativa para o equipamento [8].

Ainda nos dias atuais, percebe-se que o diagnóstico de falhas nos transformadores apresenta um grau de subjetividade grande (empírico), uma vez que os transformadores de distribuição podem falhar em serviço devido a muitas causas sendo o mais comum por descargas. As causas mais comuns de falhas listadas em ordem decrescente são:

- Descargas;
- Desconhecida;
- Defeitos de construção;
- Avarias na vedação, proteção ou revestimento metálico;
- Acidente; e

- Faltas através de curtos-circuitos.

As causas desconhecidas são geralmente atribuídas quando não existem evidências da causa atual da falha. Muitas falhas causadas por surtos no lado de baixa não aparecem por vários dias depois da tempestade [8].

Atualmente, no Brasil, o desenvolvimento de melhores práticas de detecção de falhas em transformadores de distribuição, se faz necessário, devido ao elevado índice de falhas, evidenciando a necessidade de maior controle de qualidade, a qual pode ser avaliada em testes de impulso atmosférico [9].

O ensaio de impulso atmosférico tem como objetivo principal o controle de qualidade do isolamento e adequação do projeto, sendo que em grande parte do processo de fabricação do transformador é considerado artesanal, no qual há variações entre as centenas de unidades produzidas.

Neste contexto, há uma tendência do ensaio de tensão suportável de impulso ser exigido como rotina e não apenas ensaios de tipo/protótipo no Brasil. Este método, por sua vez, parte da premissa que o corpo de prova (transformador sob ensaio) responde linearmente. Assim, os registros de tensão e corrente em um dado nível de tensão inferior, realizados neste ensaio, devem ser fielmente reproduzidos em uma tensão elevada. A análise dos resultados destes testes é baseada na multiplicação ou divisão das formas de onda, para que ambas tenham o mesmo valor final. Entretanto, as falhas no enrolamento de transformadores são baseadas na experiência [11] e as normas nunca oferecem critérios objetivos de análise, dessa forma, na constatação diferenças "significativas" na comparação das ondas, o transformador não é aprovado.

Em diversos trabalhos [12], constata-se que qualquer desvio entre uma forma de onda aplicada, ou entre uma forma de onda de corrente obtida durante um teste de impulso de onda reduzida ou plena, indica uma mudança na impedância, a qual é originada pelo colapso da isolamento do transformador ou mudanças no monitoramento externo [13].

De fato, o registro da corrente nos enrolamentos que não estão sob ensaio é a maneira que traz mais sensibilidade para a detecção de falhas [4]. Sob esta evidência a próxima seção apresentará evidências em estudos sobre a importância da avaliação da corrente.

2.2 Avaliação da corrente em ensaios de impulso atmosférico

Uma das razões para utilização da forma de onda de corrente (principalmente a corrente de terra) é que a onda de tensão dura tempo suficiente para fornecer uma componente apreciável de onda de corrente indutiva e viajante, sendo uma das avaliações mais confiáveis para detecção de falhas [4]. Levando-se em conta, que pequenas variações na forma de onda de tensão/corrente são difíceis de serem detectadas e relacionadas a algum tipo de defeito e a sua gravidade.

Em relação a ensaios de impulso atmosférico, se ocorrer alguma pequena diferença entre os registros de tensões e correntes obtidos nos impulsos reduzidos (aproximadamente 70% da tensão aplicada no impulso pleno) com os plenos, o transformador pode ser considerado aprovado ou reprovado, pois, não há um limite para essa diferença, que pode ser baixa ($< 1\%$), mas sempre acaba existindo na prática.

A análise de falhas começa com processamento de dados de pontos de referência e as curvas dos testes, amostradas através de um sistema digital. As curvas que representam o impulso de corrente contêm as informações de falha, e antes de fazer qualquer coisa com essas curvas, elas devem ser pareadas em tempo e escala em amplitude. Esta não é uma tarefa trivial. Primeiro, a amplitude da corrente exata não é conhecida, e uma estimativa conservadora da amplitude pode resultar em uma curva muito menor do que metade de toda a gama do instrumento de medição. Em segundo lugar, se ocorrer uma falha, a amplitude da corrente será afetada. Ambos os fatores, fazem com que isto seja menos desejável na utilização dos pontos de dados da curva de corrente para comparação [14].

As Figuras 2.1a e 2.1b abaixo demonstram um exemplo de como a comparação pode ser realizada inadequadamente. A Figura 2.1a mostra que a curva de baixo possui uma corrente de aproximadamente 100 ma no pico positivo, entretanto, a curva da Figura 2.1b mostra a curva original da Figura 2.1a inferior com um valor aproximado de 180 ma.

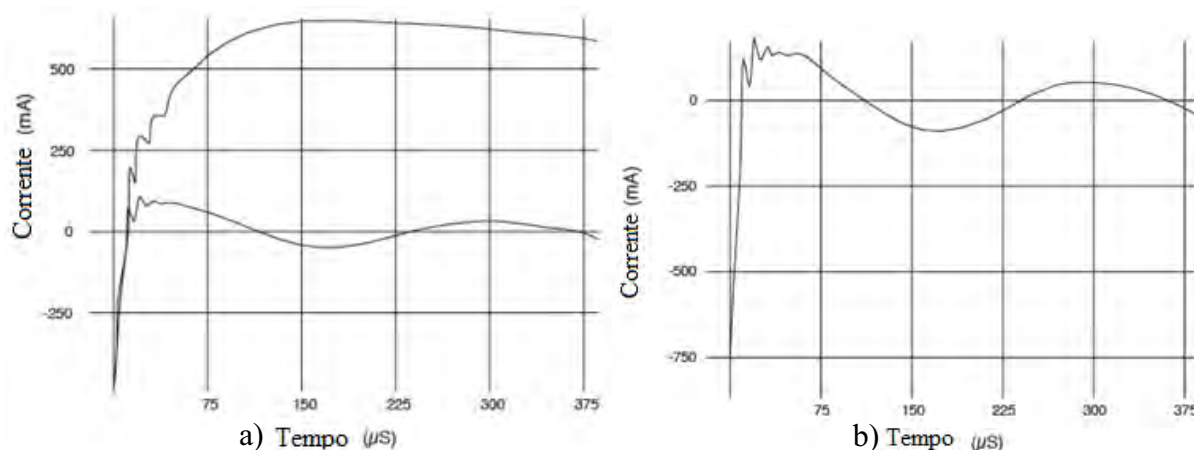


Figura 2.1. a) Impulsos de corrente após ajuste na escala para comparação b) Impulso original.

Em ensaios típicos de impulso atmosféricos em transformadores de distribuição é necessária a aplicação de uma forma de onda de impulso pleno normalizada de $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ (tempo de frente versus tempo de cauda), segundo [4,5]. Entretanto, segundo [4] esta forma de onda é considerada aceitável, para ensaios normalizados, mesmo com variações no tempo de frente de $\pm 30\%$ e um tempo de cauda com $\pm 20\%$.

Considerando estas constatações, para obtenção do Nível Básico de Impulso exigido para um determinado transformador de distribuição, deve-se alterar a tensão do gerador de impulso atmosférico, a qual é feita através da retirada ou inserção de mais capacitores em série. Os parâmetros tempo de frente e cauda, contudo, são impactados por diversos elementos do circuito de ensaio, tais como:

- Capacitor de impulso;
- Corpo de teste (Transformador);
- Resistor de frente;
- Resistor de cauda;
- Malha de descarga;
- Indutância própria da malha de descarga;
- Centelhador de excitação;
- Centelhador de medição (divisor de tensão), e
- Tensão no capacitor de impulso.

Por simples constatação, pode se dizer que a maior influência nos tempos de frente e cauda é dada pelos resistores de frente e cauda, todavia, os demais elementos citados acima possuem uma parcela na influência destes parâmetros.

Em função da influência de todos os elementos citados, existe uma dificuldade na obtenção exata da forma de onda $1,2 \times 50 \mu\text{s}$. Por isso, os parâmetros de tempo frente e cauda possuem uma faixa de variação considerável. Esta flexibilidade dos tempos de frente e cauda nos ensaios podem implicar em variações na amplitude da corrente, sendo que se a corrente for mais proeminente para determinados tempos de frente e de cauda, esta pode colaborar na detecção de falhas.

A amplitude e a forma de onda da corrente é uma função das características do enrolamento testado frente ao impulso. Assim, elas são muito mais sensíveis às alterações no enrolamento ocasionadas por falhas dielétricas do que a tensão aplicada [4].

Em função de ensaios com pequenas variações, torna-se difícil de descrever quantitativamente a diferença na onda de tensão e/ou corrente por simples inspeção visual. Ou seja, pequenas falhas podem não ser detectadas com facilidade no domínio do tempo [11].

As Figuras 2.2a e 2.2b apresentam as formas de onda corrente para um ensaio de impulso [4], no qual pode ser notada uma pequena diferença no início da oscilação da corrente. Essa diferença não é atribuída a uma falha no transformador, neste caso, atribui-se a variação no disparo do gerador. Entretanto, esta afirmação é baseada na experiência.

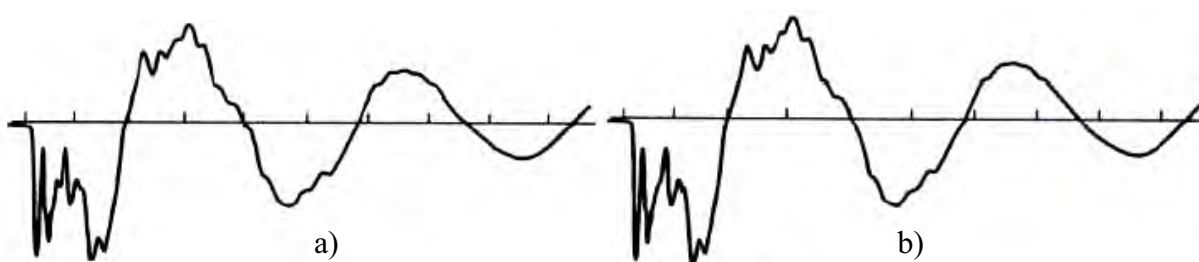


Figura 2.2. a) Impulso pleno com valor reduzido (62,5%) b) Impulso pleno.

A Figura 2.3 apresenta outro exemplo de pequenas diferenças na forma de ondas comparadas [14], neste caso as ondas foram pareadas, e para uma melhor visualização foram colocadas de forma assimétrica.

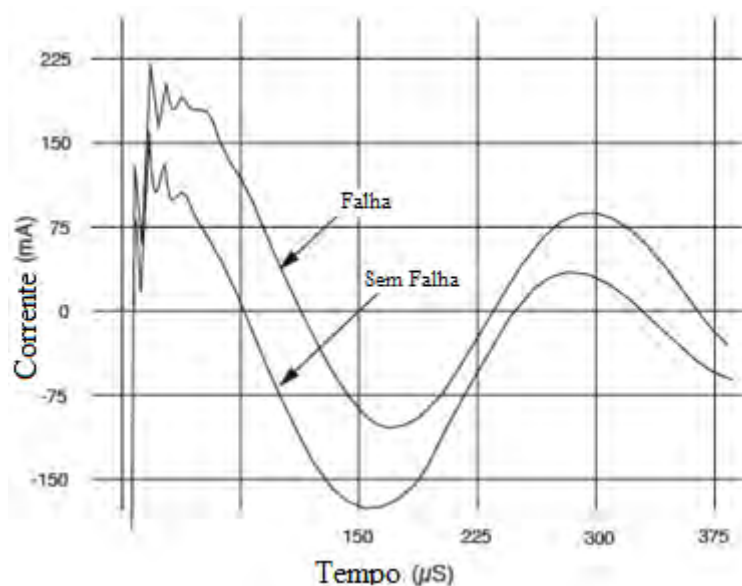


Figura 2.3. Comparação entre impulso de corrente com e sem Falha [14].

Na figura acima a falha em destaque, trata-se de um curto-circuito entre uma única espira do transformador.

Através destes exemplos, nota-se que a amplitude da onda resultante deve ser suficientemente grande e o foco do traço do oscilograma nítido suficiente para que os desvios de forma de onda de 2% ou 3% do valor de crista sejam discerníveis [4].

É importante enfatizar que uma amplitude maior de corrente, obtida através da aplicação de tempos de frente e cauda específicos, pode minimizar o tempo de teste e evitar erros de interpretação no diagnóstico de qualquer situação de falha [11]. A partir desta afirmação insere-se esta pesquisa que tem como objetivo aplicar ferramentas inteligentes para fornecer estes parâmetros (tempo de frente e tempo de cauda), de forma a alcançar a maior corrente durante o ensaio de impulso, e ressaltar nos gráficos de corrente, diferenças maiores quando houver pequenas falhas.

Na seqüência serão apresentados alguns trabalhos desenvolvidos, nos quais se evidencia a importância da avaliação corrente na detecção de falhas de transformadores.

2.3 Estudos sobre ensaios de impulso atmosférico

Segundo Al Ammar [11], foi aplicada Transformada Rápida de Fourier nos dados de corrente e tensão registrados em ensaios de impulso, derivados de trabalhos experimentais em transformadores de 25 kVA e 26 MVA, para análise no domínio da frequência. Ainda neste trabalho, para melhorar sensibilidade de detecção de falhas no teste de impulso transformador,

foi desenvolvido um novo método com transformada de Fourier de curto tempo na análise da função de transferência. Conclui-se que a sensibilidade de detecção de falhas melhorou significativamente por meio desta análise, incluindo falhas menores (pequenas diferenças na forma de onda de impulso).

O trabalho de Koley [15] apresenta através da ferramenta Wavelet que o modelo de um transformador deve ser feito considerando-se a frequência. Através dessa constatação, os autores fizeram um modelo análogo de transformador (modelo de teste), um modelo de resistência dependente da frequência variando no tempo e um modelo invariante no tempo de resistência (não considera o efeito skin, a capacitância e a indutância). Constatou-se que o modelo análogo se aproximou mais do modelo de resistência dependente da frequência variando no tempo.

O trabalho realizado por Bhoomaiah [16] apresenta um estudo em transformadores de potência, através da utilização de falhas nas espiras em diversos discos e da verificação das correntes de neutro registradas. Segundo os autores o problema do registro de ruídos existentes durante os ensaios de impulso, prejudica a análise. Mesmo através da utilização da Transformada Rápida de Fourier para separar todas as frequências, às vezes difícil isolar o ruído real do sinal principal, devido à proximidade das frequências. Uma técnica avançada como a análise Wavelet foi adotada, neste estudo, para evitar este problema. Para tanto, foi aplicada uma Wavelet GABOR para a análise de variação da corrente de neutro no tempo, sendo sinal reconstruído e comparado com o sinal original. Finalmente, o ruído pode ser identificado e separado no processo de reconstrução.

No trabalho desenvolvido por Valecillos [17] é apresentado o desenvolvimento de um sistema que permite comparações de dados no domínio do tempo e da frequência. A resposta em frequência é obtida a partir da desconvolução dos registros de tensão e de corrente de neutro. No desenvolvimento, a comparação quantitativa da resposta em frequência foi feita utilizando as técnicas aplicadas na detecção do deslocamento através da análise da resposta em frequência, como correlação e desvio espectral. O erro de quantização e confiabilidade da resposta em frequência obtida foi tratado através da utilização da função de coerência e bandas de tolerância. O sistema foi testado em um ensaio de impulso atmosférico para um transformador de distribuição do tipo seco, simulando uma falha do entre discos através de um centelhador.

Os trabalhos [18-21] apresentam a aplicação de técnicas inteligentes, como por exemplo, classificadores Fuzzy para falhas, análise fractal para aplicação de classificação de falhas através de redes neurais, classificação de padrão de falhas utilizando rede Wavelet e modelagem

falhas de curto circuito através de redes neurais, para ensaios de impulso em transformadores de distribuição.

Diante deste contexto, evidencia-se a necessidade do emprego de ferramentas computacionais para análise de ensaio de impulso atmosférico em transformadores, em específico neste trabalho, Redes Neurais Artificiais.

A razão específica para a utilização dessa abordagem neural, esta fundamentada no fato de que esta ferramenta é a mais adequada para um mapeamento de funções (generalização). Outro ponto importante é a obtenção dos dados para a abordagem neural, para a aquisição dos dados foram efetuados ensaios no laboratório de alta tensão IEE – USP (Instituto de Eletrotécnica – Universidade de São Paulo).

Foram ensaiados dois transformadores de distribuição, um de 25 kVA e outro de 45 kVA, durante cinco dias, sendo que o custo total desses dois transformadores está em torno de R\$ 10.000,00. Considerando um custo diário R\$ 3.000,00 (custo estimado de um ensaio de impulso no laboratório de alta tensão), foram gastos aproximadamente de R\$ 25.000,00 (ensaio e transformadores) somente para aquisição dos dados (estes valores são baseados em valores médios atuais). Este fato demonstra a importância da utilização de uma abordagem neural para auxiliar na análise de falhas em transformadores de distribuição, devido ao custo elevado de ensaios, sendo assim, todo esforço no sentido de minimizar estes custos justificam a abordagem.

Os recursos utilizados para esta pesquisa foram provenientes de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) financiado pela ANEEL.

A seguir será apresentado em breve estudo sobre a ferramenta aplicada no problema.

3 INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA SOBRE SISTEMAS INTELIGENTES

3.1 Noções Básicas

As Redes Neurais Artificiais (RNA) consistem em um método de solucionar problemas relacionados à engenharia e ciências por intermédio de circuitos simples que simulam o cérebro humano, inclusive seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas.

No processo de solução de muitos problemas pode ocorrer que as informações disponíveis sejam insuficientes para gerar equações matemáticas que traduzam o comportamento do fenômeno em estudo. Pode-se solucionar esta limitação usando uma abordagem baseada em modelos, como é o caso das RNA, em que a rede é treinada para abstrair equações para determinado fenômeno.

As principais características que as tornam atrativas baseiam-se no fato de que o conhecimento é adquirido pela rede através de um processo de aprendizagem, armazenando o conhecimento adquirido através de pesos sinápticos. Além disso, possuem uma grande capacidade de generalização e mapeamento de funções.

A seguir serão apresentados tópicos que abordam noções básicas sobre RNA's, de uma forma direcionada a aplicação desta pesquisa.

3.2 O Neurônio Artificial

O neurônio artificial é uma unidade de processamento matematicamente simples, que recebe uma ou mais entradas e as transforma em saídas. Cada entrada tem um peso associado que determina sua intensidade [22].

A Figura 3.1, a seguir, mostra um esquema de neurônio artificial proposto em [23].

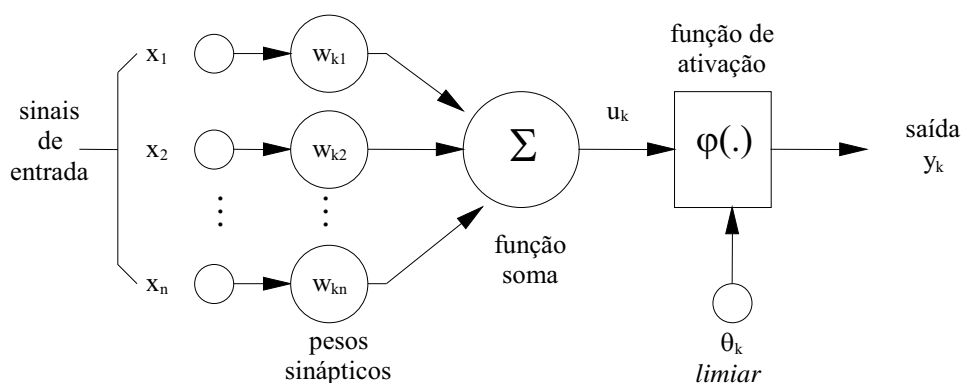


Figura 3.1. Modelo não-linear de um neurônio

É possível distinguir alguns elementos importantes no neurônio mostrado na Figura 3.1:

- As *Sinapses* são caracterizadas por um peso, w . O papel do peso w_{kj} é multiplicar o sinal x_j na entrada da sinapse j , conectada a um neurônio k ;
- Um *Somatório* adiciona as entradas ponderadas pelos seus pesos respectivos, ou seja,

$$u_k = \sum_{j=1}^n w_{kj} x_j \quad (3.1)$$

- Um *Limiar*, θ_k , o qual é determinante na saída do neurônio. Este limiar pode ser uma entrada adicional x_0 igual a +1 e o seu peso w_{j0} igual ao valor do limiar θ_k ;
- Uma *Função de Ativação*, φ , que geralmente é uma função não-linear e que age como um limitante à amplitude da saída do neurônio;
- A *Saída* do neurônio, y_k :

$$y_k = \varphi(u_k) = \varphi\left(\sum_{j=1}^n w_{kj} x_j + \theta_k\right) \quad (3.2)$$

3.3 Tipos de Função de Ativação

a) Função linear.

$$y_k = \gamma u_k \quad (3.3)$$

b) Função limiar.

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se } u_k \geq \theta_k \\ 0, & \text{se } u_k < \theta \end{cases} \quad (3.4)$$

c) Função sigmóide logística.

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-y u_k}} \quad (3.5)$$

d) Função tangente hiperbólica (*tansig*).

$$y_k = \frac{1 - e^{-2y u_k}}{1 + e^{-2y u_k}} \quad (3.6)$$

e) Função linear por partes (*purelin*)

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se } u_k > \theta_k \\ -1, & \text{se } u_k < \theta_k \\ u_k, & \text{em outra parte} \end{cases} \quad (3.7)$$

3.4 Ajuste dos Pesos Sinápticos

Os pesos sinápticos de um neurônio são adaptados de acordo com os padrões de dados apresentados à rede com base no algoritmo de treinamento. A rede aprende através de exemplos, pois, o processo de treinamento é a partir de casos reais conhecidos, logo, a rede adquire sistematicamente necessária para executar adequadamente o processo dos dados fornecidos. Portanto, uma rede neural é capaz de extrair regras básicas a partir de dados reais diferindo da computação convencional, onde são necessários um conjunto de regras rígidas prefixadas e algoritmos.

3.5 Arquitetura de Rede

Uma rede Perceptron típica, com “ m ” entradas e “ p ” saídas, é ilustrada na Figura 3.2, onde cada círculo representa um neurônio artificial. A arquitetura *Feedforward* da rede Perceptron Multicamadas implica que o fluxo de informações é executado em uma única direção, não possuindo retroalimentação entre os neurônios.

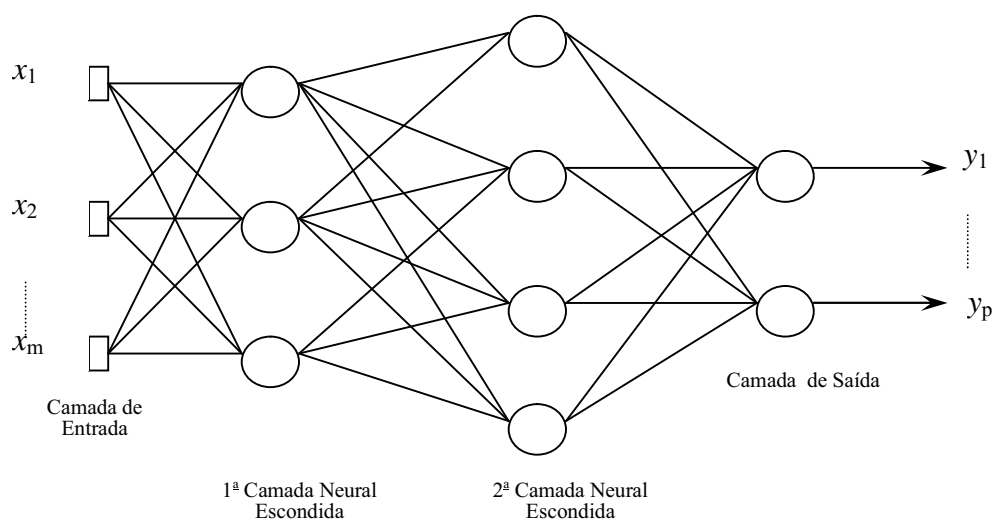


Figura 3.2. Rede Perceptron Multicamadas.

3.6 Treinamento da Rede

Para o treinamento da rede utilizou-se a aprendizagem supervisionada, a qual utiliza um agente externo que indica à rede um comportamento bom ou ruim de acordo com o padrão de entrada. A rede é treinada para fornecer a saída desejada em relação a um estímulo de entrada

específico. Quando um vetor de entrada é aplicado, a saída da rede é calculada e comparada com o respectivo padrão de saída, a diferença (erro) é então propagada em sentido inverso ao fluxo de informações da rede (das saídas para as entradas) e os pesos são alterados de acordo com algum algoritmo que tende a minimizar o erro.

3.6.1 Mapeamento da Rede

Para se efetuar o mapeamento do processo através de redes neurais artificiais, alguns passos devem ser seguidos para a adequada aplicação da abordagem neural. Os principais passos são especificados a seguir:

a) Coleta de dados

O primeiro passo do processo de desenvolvimento de redes neurais artificiais é a coleta de dados relativos ao problema. Esta tarefa requer uma análise cuidadosa sobre o problema visando minimizar ambigüidades e erros nos dados. Além disso, os dados coletados devem ser significativos e cobrir amplamente o domínio do problema; não devem cobrir apenas as operações normais ou rotineiras, mas também exceções e as condições nos limites do domínio do problema.

b) Separação em conjuntos

Normalmente, os dados coletados devem ser separados em duas categorias: dados de treinamento, que serão utilizados para o treinamento da rede; e dados de teste, que serão utilizados para verificar sua performance sob condições reais de utilização.

Depois de determinados estes conjuntos, eles são geralmente colocados em ordem aleatória para prevenção de tendências associadas à ordem de apresentação dos dados. Além disso, pode ser necessário pré-processar estes dados, através de normalizações, escalonamentos e conversões de formato para torná-los mais apropriados à sua utilização na rede.

c) Configuração da rede

O terceiro passo é a especificação da configuração da rede, que pode ser dividido em três etapas:

- i) Seleção do paradigma neural apropriado à aplicação.
- ii) Determinação da topologia da rede a ser utilizada - o número de camadas, o número de neurônios em cada camada, etc.

iii) Determinação de parâmetros do algoritmo de treinamento e funções de ativação.

Este passo tem um grande impacto na performance do sistema resultante.

Existem metodologias na condução destas tarefas. Normalmente partes dessas escolhas são feitas de forma empírica. A definição da configuração de redes neurais é ainda considerada uma arte, que requer grande experiência dos projetistas.

d) Treinamento

O quarto passo é o treinamento da rede. Nesta fase, seguindo o algoritmo de treinamento escolhido, serão ajustados os pesos das conexões. É importante considerar, nesta fase, alguns aspectos tais como a inicialização da rede, o modo de treinamento e o tempo de treinamento.

Uma boa escolha dos valores iniciais dos pesos da rede pode diminuir o tempo necessário para o treinamento. Normalmente, os valores iniciais dos pesos da rede são números aleatórios pequenos uniformemente distribuídos, em um intervalo definido.

Quanto ao tempo de treinamento, vários fatores podem influenciar a sua duração, porém sempre será necessário utilizar algum critério de parada. Os principais critérios de parada do algoritmo de aprendizagem são o número máximo de ciclos e o erro quadrático médio por ciclo. Pode ocorrer que em um determinado instante do treinamento a generalização comece a degenerar, causando o problema de “*overfitting*”, ou seja, a rede se especializa no conjunto de dados do treinamento e perde a capacidade de generalização.

O treinamento deve ser encerrado quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena, ou seja, menor que um erro admissível.

e) Teste

O quinto passo é o teste da rede. Durante esta fase o conjunto de teste é utilizado para determinar a performance da rede com dados que não foram previamente utilizados. O treinamento da rede nesta pesquisa, responsável pelo ajuste dos pesos, foi feito utilizando o algoritmo *Backpropagation* no modo batch e com taxa de aprendizagem variável. Foi fixado esse tipo de algoritmo porque o mesmo teve o melhor desempenho no treinamento da rede em relação aos demais algoritmos testados. Os demais algoritmos testados com seus respectivos desempenhos serão demonstrados no Capítulo 5.

3.6.2 Algoritmo de Treinamento

O algoritmo da regra delta generalizada conhecido como *Backpropagation* é o algoritmo comumente utilizado para treinamento de rede tipo *Feedforward* (no Matlab este algoritmo recebe o nome de *traingd*). Durante o treinamento com o algoritmo *Backpropagation*, a rede opera em uma seqüência de dois passos. Primeiro, um padrão é apresentado à camada de entrada da rede. A atividade resultante flui através da rede, camada por camada, até que a resposta seja produzida pela camada de saída. No segundo passo, a saída obtida é comparada à saída desejada para esse padrão particular. Se esta não estiver correta, o erro é calculado. O erro é então retropropagado (*Backpropagation*) a partir da camada de saída até a camada de entrada, e os pesos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo modificados conforme o erro é retropropagado [24]. Esse processo é repetido para todos os vetores de entrada da rede até que o erro quadrático médio das saídas da rede alcance um valor aceitável.

O algoritmo *Backpropagation* possui algumas variações. Uma variação deste que foi aplicada a essa pesquisa é o *Backpropagation* com Taxa de Aprendizagem Variável (no Matlab recebe o nome *traingdx*). A taxa de aprendizagem variável é um parâmetro que trata da estabilidade da RNA, ou seja, quanto menor for este parâmetro, mais estável será a RNA, porém, o aprendizado será mais lento. Nesse tipo de treinamento, a taxa não permanece fixa, entretanto, varia de acordo com erro retornado em cada ciclo de treinamento, a fim de tornar o treinamento da RNA mais estável.

4 ENSAIOS E ANÁLISES EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

4.1 Ensaio de Alta Tensão em Transformadores

Para a obtenção dos modelos experimentais das descargas atmosféricas são adotadas técnicas de altas tensões, as quais são executadas em laboratórios especializados. O estudo de processos de alta tensão em um meio isolante ou equipamento (transformador) elétrico apresenta um caráter estatístico em função da dispersão inerente ao fenômeno da descarga. Em função disso são elaborados procedimentos de ensaios que visam melhorar o discernimento do processo da descarga, além de uniformizar os resultados dos ensaios [4, 5].

O ensaio de alta tensão que representa o comportamento das descargas atmosféricas é denominado de Ensaio de Impulso Atmosférico, no qual uma onda de tensão padronizada define a duração da descarga elétrica pelo tempo de crescimento (frente) e também pelo tempo de valor médio (cauda).

Nos ensaios de tensão suportável nominal de impulso atmosférico em transformadores deve ser considerado que todos os terminais e enrolamentos podem ser submetidos a níveis de tensão especificados e independentes.

A polaridade da onda de descarga e o número de aplicações de tensão que deve ser utilizado dependem exclusivamente da especificação de ensaio adotada, sendo que, o tipo de isolamento (ar, óleo, gases), também é levado em consideração. No caso específico de transformadores é adotada a polaridade negativa.

As formas de impulso, normalmente utilizada nos ensaios de impulsos atmosféricos em transformadores estão especificadas em [4]

4.2 Geração da Alta Tensão no Laboratório

Na prática, a geração artificial das descargas atmosféricas é obtida com geradores de impulsos de alta tensão, os quais são constituídos basicamente de uma combinação de capacitores, resistores e centelhadores [31].

A Figura 4.1 apresenta um esquema geral de um gerador de impulso utilizado nos ensaios de transformadores.

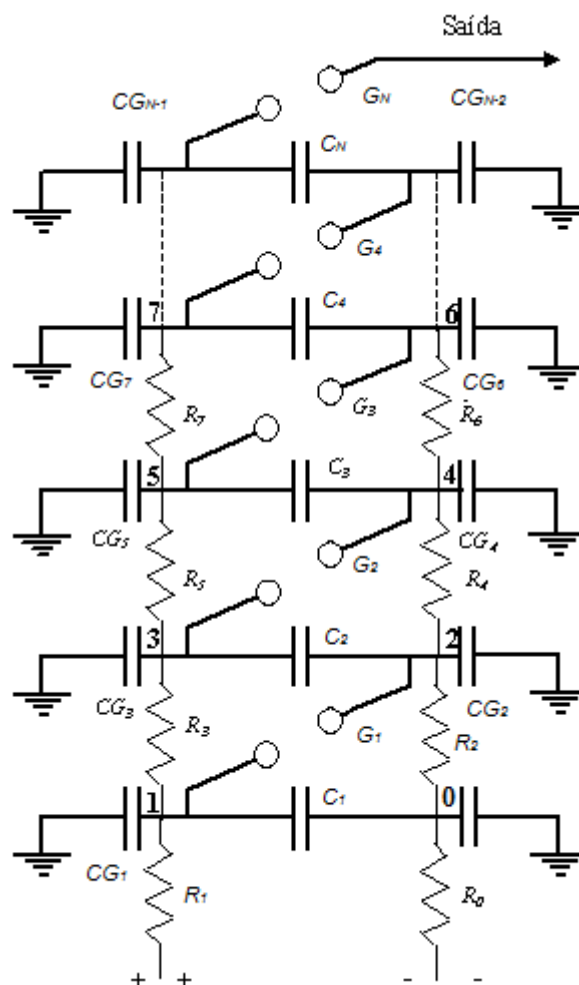


Figura 4.1. Esquema simplificado de um gerador de impulso.

Onde,

- $R_0, R_1, R_2, \dots, R_N$ são os resistores de carga.
- $C_1, C_2, C_3, \dots, C_N$ são os capacitores.
- CG_1, CG_2, \dots, CG_N é a capacidade do gerador.
- $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ são os centelhadores.

O funcionamento de um gerador de impulso é caracterizado por um certo número de capacitores (N), o qual é carregado em paralelo com uma tensão de corrente contínua (e) e, em seguida, descarregado em série através de um número de centelhadores (G_N). A tensão de saída do gerador (E), sem levar em consideração as oscilações, é igual ao produto da tensão de carga pelo número de capacitores, ou seja:

$$E = N \cdot e \quad (4.1)$$

Assim, a energia que um gerador de impulso, sob condições de tensão máxima, pode ser calculado pela seguinte equação:

$$W = \frac{e_s^2 \cdot CG_N \cdot 10^{-9}}{2} \quad (4.2)$$

Onde:

- e_s é a tensão de saída,
- W é a energia em kW, e
- CG_N é a capacidade do gerador de impulso em μF .

O gerador possui um sistema automático de operação, cuja função é controlar com precisão a tensão de saída, o tempo de descarregamento dos capacitores e o espaçamento dos centelhadores. Deste modo, garante-se uma ótima repetibilidade dos valores de impulsos de tensão.

4.3 Circuito de Ensaio no Laboratório

O circuito para ensaio de impulso atmosférico, levando-se em conta a disposição física do circuito pode ser desmembrado em cinco partes distintas:

- Gerador de impulso, com seus componentes adicionais;
- Objeto sob ensaio;
- Circuito de medição de tensão;
- Circuito de corte, quando aplicável; e
- Circuitos para detecção de falhas.

A disposição física do circuito de ensaio, dos cabos de interligação, fitas de aterramento, etc., devem observar as limitações de espaço no local do ensaio e o efeito de proximidade de quaisquer estruturas. Neste tipo de ensaio, o gerador de impulso produz correntes elevadas com grandes taxas de variação, que retornam para o gerador através do capacitor de carga, do objeto ensaiado e também do divisor de tensão.

Destaca-se que as correntes também produzem diferenças de potencial entre vários pontos do lado terra do circuito, tais diferenças podem distorcer as medições, inclusive a corrente para a indicação da falha. Para a redução desta diferença de potencial utilizam-se

comumente largas tiras (fitas) metálicas como condutores de retorno do lado terra, ou então, coloca-se uma chapa metálica dentro ou sobre o piso.

O lado terra de cada componente é ligado à malha ou chapa (depende da disposição), em qualquer ponto próximo do mesmo. É importante mencionar que, o lado da alta e da baixa tensão do divisor de tensão esteja ligado ao objeto de ensaio, independente do circuito principal (percorrido pelas correntes elevadas). Além disso, ao menos um ponto do retorno do lado terra deve ser ligado à terra real e, para o caso de malha, devem ser ligados diversos pontos. O esquema elétrico deste ensaio está apresentado na Figura 4.2.

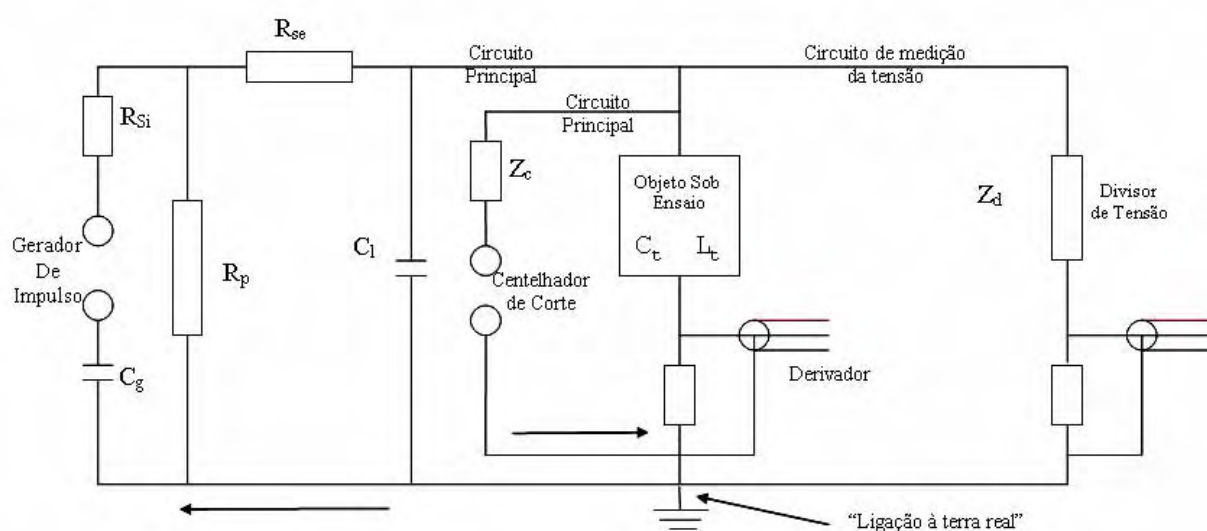


Figura 4.2. Circuito típico de ensaio de impulso.

Onde:

- C_g é a capacitância série de impulso,
- C_l é a capacitância de carga,
- C_t é a capacitância efetiva do objeto de ensaio (Transformador),
- L_t é a indutância do objeto sob ensaio,
- R_{si} é a resistência série interna do gerador de impulso,
- R_{se} é a resistência série externa do gerador de impulso,
- R_p é a resistência paralela do gerador de impulso,
- Z_c é a impedância adicional no circuito do centelhador de corte, e
- Z_d é a impedância do lado de alta tensão do divisor de tensão.

O gerador de impulso é caracterizado por sua capacitância principal C_g , sua resistência série interna R_{si} e sua resistência de descarga R_p . Usualmente uma resistência série externa R_{se} , um capacitor de frente C_l , ou ambos, são acrescentados ao circuito.

O gerador de impulsos e os outros componentes do circuito, juntamente com os condutores de ligação, contêm indutâncias e capacitâncias distribuídas que alteram a forma do impulso, mas, para efeito de análise pode-se desprezar estes componentes no cálculo aproximado da forma de impulso.

O objeto de ensaio é conhecido por sua capacitância efetiva C_t e sua indutância L_t . Esta capacitância depende diretamente da forma de impulso aplicado e, principalmente, do tempo virtual de frente.

4.3.1 Circuito de Medição de Impulso

O circuito de medição de tensão é composto por um divisor de tensão e de um ou mais, instrumentos de medição. Vários divisores podem ser utilizados: os resistivos, os resistivos com eletrodos de blindagem, os capacitivos ou os capacitivos mistos. Os dois primeiros tipos são caracterizados pela resistência R_d e os últimos pela capacitância C_d .

Geralmente, utiliza-se um osciloscópio como instrumento de medição, juntamente com um voltímetro de crista. O osciloscópio é usado para registrar a forma do impulso e o valor da crista.

4.3.2 Circuito de Corte

O circuito de corte é formado por um centelhador que é ligado entre o terminal ensaiado do objeto em questão (transformador) e o terra, através de condutores como mostrado na Figura 4.2. Pode ser usado um centelhador de pontas ou algum tipo de centelhador com disparo controlado. Algumas vezes uma resistência R_c é inserida na ligação ao centelhador de corte. A intenção é fazer com que a amplitude de polaridade oposta permaneça entre os limites especificados.

Este centelhador com disparo controlado fornece uma melhor precisão no ajuste de tempo de corte, do qual se obtêm tempos até o corte razoavelmente idênticos e, a constatação de falhas por comparação de oscilogramas após o corte.

4.3.3 Circuitos para Detecção de Falhas

A detecção de falhas como já mencionado anteriormente, pode ser obtida através dos oscilogramas da tensão de ensaio aplicada e das outras tensões e correntes transitórias do circuito. A Figura 4.3a apresenta o circuito para a obtenção da corrente no neutro, considerando-se transformadores com neutros que podem ser aterrados durante o ensaio. A Figura 4.3b mostra o circuito para a obtenção da corrente no enrolamento sob ensaio para transformadores trifásicos com enrolamentos ligados em triângulo e para transformadores com enrolamentos ligados em estrela cujo neutro não pode ser aterrado durante o ensaio.

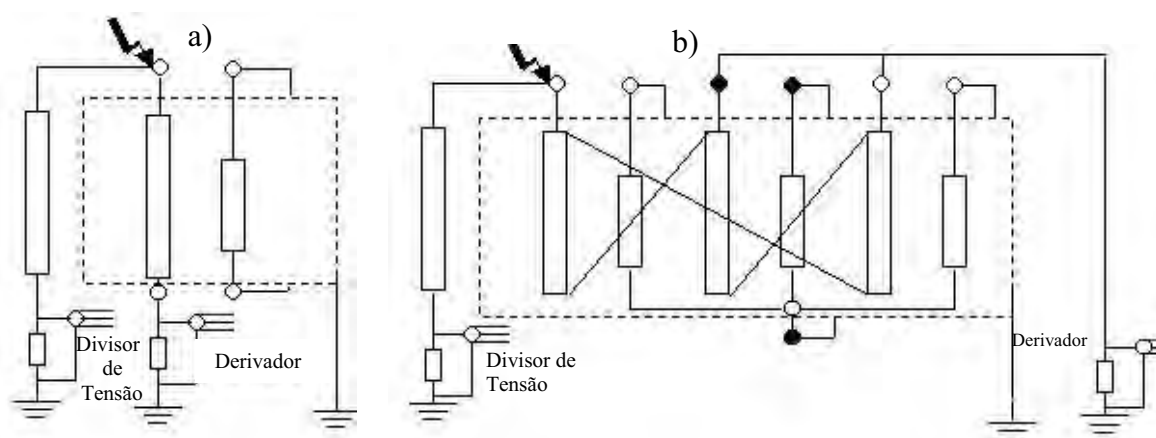


Figura 4.3. a) Corrente no neutro. b) Corrente no enrolamento (medida através de outras fases).

A Figura 4.4a apresenta o circuito para a obtenção da corrente transferida a um enrolamento adjacente. A Figura 4.4b apresenta o circuito para a obtenção da corrente no tanque dos transformadores.

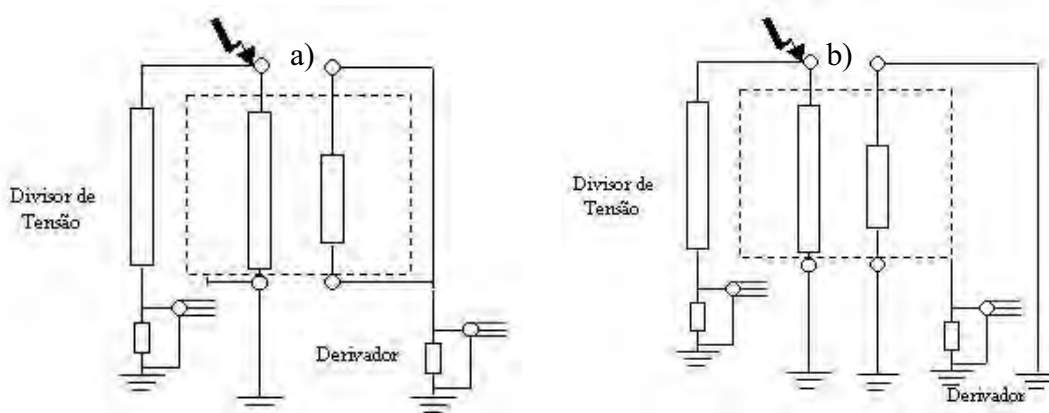


Figura 4.4. a) Corrente transferida. b) Corrente no tanque.

Na Figura 4.5a tem-se um circuito para obter a tensão transferida a um enrolamento não ensaiado. Na Figura 4.5b tem-se o circuito para a obtenção da corrente de linha.

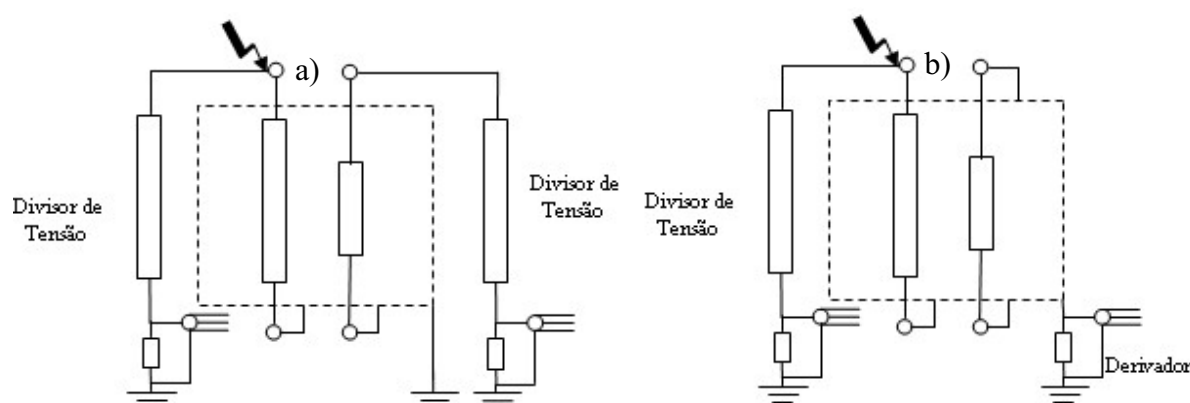


Figura 4.5. a) Tensão transferida. b) Corrente da linha.

Para medir a corrente de linha, liga-se ao tanque todos os terminais que normalmente devem ser aterrados, medindo-se a corrente do tanque para a terra.

4.4 Forma de Onda Normalizada

Conforme mencionado no item anterior, a forma de onda normalizada obtida no laboratório de alta tensão depende dos valores de capacitâncias, resistências e indutâncias da própria montagem, além, naturalmente, da carga dos divisores de tensão utilizados no sistema de medição.

A normalização da forma de onda tem como premissa estabelecer os limites relacionados ao tipo de onda que representará o comportamento das descargas atmosféricas. Essas tolerâncias visam controlar a tensão aplicada no objeto sob teste, bem como o seu tempo de exposição. Apresentam-se na Figura 4.6 os parâmetros que devem ser considerados na medição de uma forma de onda normalizada $1,2 \times 50 \mu\text{s}$.

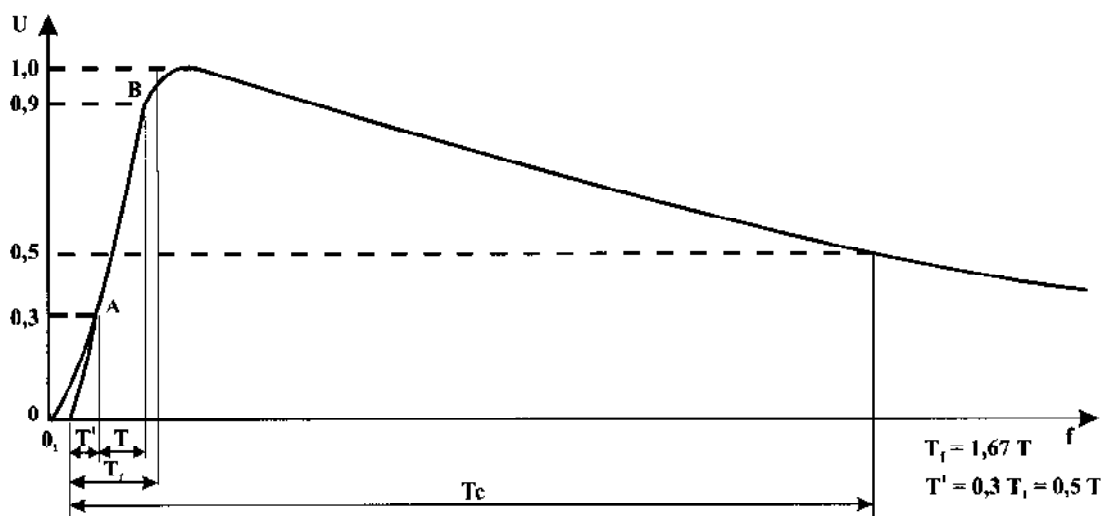


Figura 4.6. Onda normalizada $1,2 \times 50 \mu\text{s}$.

Onde:

- 0_1 é a origem virtual, a qual é caracterizada pelo instante que precede o tempo correspondente ao ponto A de $0,3 T$ ou $0,5 T$.
- T_f é o tempo de frente, definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes 30% e 90%.
- T_c é o tempo de cauda.

De acordo com as normas [4, 5], recomendam-se as seguintes tolerâncias para a forma de onda normalizada obtida no laboratório:

- Valor de crista de $\pm 5\%$.
- Tempo de frente de $\pm 30\%$.
- Tempo de cauda de $\pm 20\%$.

4.5 Procedimento de Ensaio em Transformadores

Os procedimentos de ensaio comumente abrangem modo e seqüência de execução. A seqüência de ensaio é a seguinte:

- Ajustamento da forma de impulso;
- Aplicação de um impulso pleno com valor reduzido;
- Aplicação de um impulso pleno normalizado com o valor suportável nominal;
- Aplicação de um ou mais impulsos cortados com valor reduzido;
- Aplicação de dois impulsos cortados com o valor especificado; e

- Aplicação de dois impulsos plenos normalizados com o valor suportável nominal.

O modo de execução preferencial consiste em aplicar diretamente a tensão de impulso no enrolamento sob ensaio. O método do “surto transferido” pode, contudo, ser empregado em casos especiais, nos quais o enrolamento de mais baixa tensão não estará sujeito diretamente sobretensões atmosféricas do sistema. O ensaio de impulso no enrolamento de baixa tensão é então executado simultaneamente com ensaio do enrolamento de alta tensão associado. Nestas condições, a forma de impulso da tensão transferida não está de acordo com a especificada [4]. É mais importante tentar obter a tensão suportável nominal de impulso atmosférico por meio de resistores de valores suficientemente elevados nos terminais. Isto, entretanto, poderá não ser sempre conseguido.

Neste ensaio podem ocorrer elevadas tensões entre fases e enrolamentos ligados em triângulo. Assim, o risco de sobre solicitar a isolação entre fases constitui-se no limite para a tensão de ensaio dos enrolamentos de baixa tensão. Os limites adequados podem ser estabelecidos por aplicações de tensão com valor reduzido.

4.6 Metodologia Experimental Para o Ensaio de Impulso Atmosférico

4.6.1 Ligações dos Terminais do Transformador

As ligações para ensaio de tensão suportável nominal de impulso atmosférico são detalhadas em [4] para transformadores. Normalmente todos os terminais, exceto aquele no qual a tensão de ensaio é aplicada, são aterrados. Isto pode ser realizado através de um derivador para indicação de falha (como o representado na Figura 4.2).

Nesta situação, o terminal em questão é conectado a um divisor de tensão como mostrado na Figura 4.2. Algumas vezes, o terminal do neutro do enrolamento ensaiado ou os terminais de linha dos enrolamentos não ensaiados, de mesma fase que o terminal de linha ensaiado, pode ser aterrado através de impedâncias, geralmente resistências, para aumentar o tempo virtual até metade do seu valor. Devem ser escolhidas impedâncias de valor tal que as tensões nos terminais não ensaiados não excedam 75% da tensão especificadas para os mesmos.

4.6.2 Forma de Impulso Atmosférico, Ajuste e Tolerância

a) Impulsos Plenos

A forma de impulso especificada poderá não ser sempre exequível, fazendo-se assim, a necessidade de tolerâncias mais amplas no ensaio de transformadores com elevada capacitância efetiva ou com baixa indutância. Para se obter um valor bem próximo do especificado para o tempo virtual de frente, pode ser necessário utilizar um valor baixo de resistência série do gerador de impulso, pois a capacitância efetiva do objeto sob ensaio não é passível de alterações.

Uma maneira a obter-se o tempo virtual de frente normalizado, dentro das tolerâncias estabelecidas, é admitirem-se oscilações ou sobrelevações fora da tolerância de $\pm 5\%$, fixada em [32], até um limite de $\pm 10\%$. Para que este limite não seja ultrapassado, deve-se admitir um tempo virtual de frente que exceda as tolerâncias fixadas em [32].

Em transformadores de potência, particularmente nos seus enrolamentos de tensão mais baixa, a indutância pode ser tão baixa que o tempo virtual até a metade do valor de T_2 , pode não ser realizado dentro da tolerância, e mesmo a forma do impulso resultante tornar-se oscilatória, com excessiva amplitude de polaridade oposta. Estes problemas podem ser resolvidos, até determinado ponto, através de uma capacitância elevada adequada no gerador de impulso ou pelo ajuste do resistor série. Um aumento do tempo virtual em 50% do seu valor pode ser obtido também pelo aterramento através de impedância.

Quando a forma de impulso for oscilatória devido à baixa indutância, do objeto sob ensaio, ou pela pequena capacitância do gerador de impulso, ou ambas, a amplitude de polaridade oposta não devesse ultrapassar os 50% do valor de crista, de acordo com [32].

b) Impulsos Cortados na Cauda

A onda cortada aplicada durante o teste de impulso de tensão dos enrolamentos do transformador de acordo com as recomendações da International Electrotechnical Commission (IEC) [33] vai gerar condições de estresse severo no isolamento longitudinal do enrolamento (entre espiras e entre o isolamento dos discos), que são susceptíveis de ser mais crítico do que quando uma onda de impulso pleno é aplicada.

A aplicação do impulso cortado é de suma importância nos testes de impulso de transformadores. Aplicação de um impulso cortado impõe situações similares de estresse, muitas vezes onerosos para aqueles experimentados por um transformador em serviço, quando uma onda viajante atinge um arco através de centelhadores acoplados aos isoladores (“*arc-horns*” em inglês), ou através de uma cadeia de isoladores de suspensão, ou provoca uma descarga fase-terra em proximidade com o transformador. O instante do corte e o tempo de colapso de um impulso cortado tem um comportamento importante na promoção condições de críticas de estresse no enrolamento. Estes são reconhecidos como parâmetros significativos de uma onda cortada e são regidas, principalmente, pelo tempo de tensão características do isolamento que promove a descarga, as indutâncias do arco da descarga e o sistema de aterramento [34].

Para as condições de aplicação do impulso cortado é importante saber que diferentes tempos virtuais até o corte resultam em solicitações diferentes (tensão e duração) nas diferentes partes dos enrolamentos, dependendo da construção e disposição dos tais. Assim não é possível estabelecer um tempo virtual até o corte mais severo em geral, ou mesmo em particular, para todas as partes de um dado transformador, devendo, contudo, ficar dentro dos limites de 2 a 6 μ s. Os eventos característicos durante o corte dependem da disposição geométrica e da impedância do circuito de corte, os quais determinam a taxa de colapso e a amplitude da polaridade oposta. Em [4] limita-se a amplitude de polaridade oposta a 30% do valor do impulso cortado. Isto representa uma diretriz para a disposição do circuito de corte e pode implicar na introdução, neste circuito, de uma resistência adicional (R_c), apresentado na Figura 4.2, de maneira a satisfazer o limite.

4.6.3 Registros Oscilográficos, Métodos de Detecção de Falhas

De acordo com [4] o estabelecimento da medição é realizado da seguinte maneira:

- Tensão aplicada;
- Pelo menos outro transitório característico.

Isto significa que são necessários, pelo menos, dois canais de registro independentes. Enquanto a tensão aplicada é definida de forma unívoca, a escolha do outro transitório a ser registrado depende da escolha do método da detecção de falhas. Normalmente, é medida a corrente no neutro apresentado na Figura 4.3a. Se esta corrente não puder ser medida, a

corrente nos enrolamento (Figura 4.3b) pode ser usada. Contudo, além disso, um ou mais dos outros métodos pode ser usado na tentativa de localizar falhas (ensaios diagnósticos).

A determinação dos resultados do ensaio é baseada principalmente na comparação entre os oscilogramas de impulsos com valores reduzidos e valores especificados de tensão. Essa comparação é facilitada pela seleção de um valor adequado do atenuador, de forma a se obter oscilogramas de amplitude aproximadamente iguais.

a) Registro Oscilográfico da Tensão

Os registros oscilatórios da tensão são realizados da seguinte forma:

- Registro da tensão durante o ajuste da forma do impulso:

O tempo de varredura preferencial para registros, levantados para a determinação da forma do impulso durante o ajuste dos parâmetros do circuito, é igual ou inferior 10 μs para o registro da frente do impulso. Para o ensaio de neutros de transformadores podem ser necessários tempos de varreduras mais longos. O registro da cauda do impulso deve permitir a avaliação do tempo virtual até a metade do seu valor e, quando necessário, da amplitude de polaridade oposta.

- Registro da tensão durante o ensaio:

A fim de se determinar o valor da tensão de ensaio e permitir a detecção de falhas:

- Para impulsos plenos, recomenda-se tempo de varredura de 50 a 150 μs ;
- Para impulsos cortados, é geralmente considerado adequado tempo de varredura de 10 a 25 μs .
- Para ensaios de aceitação, um registro é normalmente suficiente; para ensaios diagnósticos, no entanto, podem ser necessários vários registros, no entanto, podem ser necessários vários registros com tempos de varredura diferentes.

b) Registro Oscilográfico da Corrente

Dependendo da forma da corrente e do uso de varreduras lineares ou não lineares, pode ser necessário usar mais de um registro com tempos de varredura diferentes. Os registros obtidos devem assegurar que:

- Seja conseguida uma representação dos oscilogramas tão clara quanto possível, incluindo as componentes da frequência mais elevadas, na proximidade da frente do impulso;
- O registro da corrente seja de duração suficiente para permitir a detecção de discrepâncias de ocorrências tardia.

Estabelecer regras preferenciais é muito difícil para tempos de varredura e o “significado de ocorrência”, pois cada objeto sob ensaio tem uma resposta diferente, dependente do tipo de enrolamento empregado. As correntes no neutro ou nos enrolamentos apresentam geralmente oscilações iniciais, após as quais a sua forma de impulso é determinada essencialmente pela indutância do enrolamento e pela capacitância do gerador de impulso. O registro destas correntes, quando efetuado, deve continuar, pelo menos, até a primeira crista indutiva, permitindo a constatação de qualquer modificação na indutância, mesmo quando causada por curto-circuito entre espiras em consequência de falha da isolação.

c) Interpretação de Oscilogramas de Impulsos Atmosféricos

A interpretação de oscilogramas é baseada na comparação dos registros de formas de impulsos de tensão e de corrente:

- Entre registros da tensão de valor reduzido e com valor suportável nominal;
- Entre registros sucessivos da tensão de valor suportável nominal.

No caso ideal, se não ocorrer falha, estes oscilogramas devem ser idênticos, exceto pelas variações causadas por inevitáveis mudanças na amplitude entre o impulso com tensão reduzida e o impulso com valor suportável nominal. Analogamente, se ocorrer falha, ela deve ser claramente indicada no oscilograma. No caso real, contudo, nos oscilogramas podem ser encontradas irregularidades menores. Deve, então, ser determinado se estas discrepâncias são devidas às falhas ou a outras causas. Esta tarefa requer perícia, sendo freqüentemente difícil, mesmo com considerável experiência, decidir quanto ao significado das discrepâncias, em vista do grande número de possíveis fontes de perturbação. Qualquer que seja a natureza das discrepâncias, elas devem ser investigadas.

4.7 Controle da Forma de Onda dos Impulsos Atmosféricos

Os princípios de controle da forma de impulsos atmosféricos em transformadores são indicados por meio dos diagramas simplificados das Figuras 4.7a e 4.7b, outras ligações são também possíveis. Ressalta-se que os princípios descritos fornecem apenas uma orientação geral e que é necessário um ajuste subsequente do circuito por tentativas. A seguir será apresentada a categoria que representa os enrolamentos de alta indutância para $L_t \geq 100$ mH.

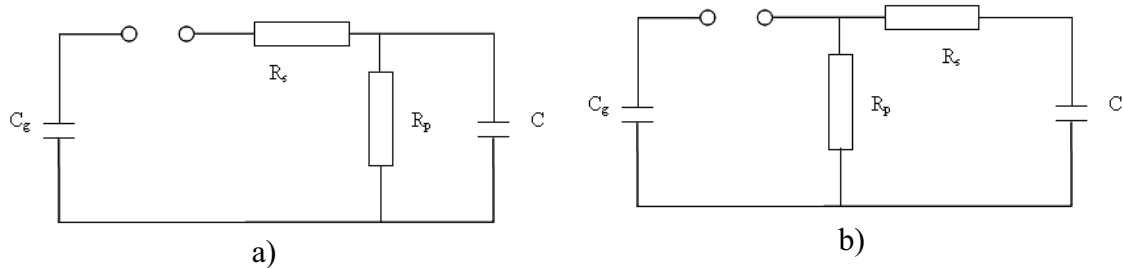


Figura 4.7. Circuito para determinação da forma de onda para enrolamentos de alta indutância.

Onde:

- C_g – capacitância série do gerador;
- R_s – resistor série do total;
- R_p – resistor paralelo do gerador; e
- C – capacitância total.

Para impulsos atmosféricos padronizados o tempo virtual de frente T_1 (valor no qual a tensão alcança a crista) e o tempo até metade do valor T_2 (cauda) são, aproximadamente, determinados por [4,31,35]:

$$T_1 = 3 \frac{R_s \times R_p}{R_s + R_p} \times \frac{C_g \times C}{C_g + C} \quad (4.3)$$

$$T_2 = 0,7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad (4.4)$$

Pela Figura 4.7b tem-se;

$$T_1 = 3R_s \frac{C_g \times C}{C_g + C} \quad (4.5)$$

$$T_2 = 0,7R_p(C_g + C) \quad (4.6)$$

Para $R_p \gg R_s$ e $C_g \gg C$

$$T_1 = 3R_s \cdot C \quad (4.7)$$

$$T_2 = 0,7 \cdot R_p \cdot C_g \quad (4.8)$$

Nos cálculos acima, o objeto sob ensaio foi considerado como sendo puramente capacitivo. Deve-se observar, que a capacitância efetiva C_t do objeto sob ensaio é diferente para frente e para a cauda do impulso. Para o tempo de frente, C_t pode ser calculado pela fórmula:

$$C_t = C_b + \sqrt{K.C_e} \quad (4.9)$$

Onde:

- C_b – capacitância de bucha;
- K – capacitância série do enrolamento; e
- C_e – capacitância para terra do enrolamento.

Para a cauda, C_t pode ser estimada como C_b somada com a parte de C_e , depende da distribuição inicial de tensão. Evidentemente, no que se refere à cauda, o valor de C_t é de pouca importância na maioria dos casos práticos, como demonstrado na equação 4.7 e 4.8.

5 DIRETRIZ METOLÓGICA DA PESQUISA

5.1 Introdução e Descrição da Metodologia

Neste capítulo serão apresentadas todas as etapas relacionadas à diretriz metodológica aplicada, neste sentido, constata-se a contribuição desta pesquisa, onde se busca auxiliar a análise de ensaios de impulso atmosférico utilizando uma abordagem neural.

Inicialmente, serão apresentados aspectos relativos aos ensaios realizados para obtenção dos dados que serão utilizados no treinamento das redes neurais, na seqüência será apresentado o desenvolvimento da arquitetura neural.

Depois de treinada e validada a nova rede, pôde-se observar o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente e do tempo de cauda de onda, proporcionando assim, a possibilidade de identificação e de estimação das correntes máximas influenciadas pelos parâmetros, tempo de frente e tempo de cauda sobre o transformador de distribuição.

A partir de simulações realizadas com a rede neural implementada foi possível avaliar o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente de onda, para diferentes tempos de cauda.

Baseado nessas simulações, onde se variou tempo de frente da descarga atmosférica, através das correntes máximas produzidas no enrolamento, pôde-se avaliar a influência do tempo de cauda na amplitude da corrente.

Outro aspecto de extrema importância que será analisado a partir da rede neural artificial será influência que o tempo de frente tem em relação ao tempo de cauda na intensidade da corrente através da variação do tempo de cauda. Para finalizar as análises, será feita uma abordagem considerando a corrente máxima em função da taxa de crescimento da tensão.

Em relação aos perfis das simulações, que serão apresentadas no próximo capítulo, obtidos após o treinamento das redes, destaca-se o aspecto não-linear deste tipo ensaio, visto que o comportamento do transformador frente às variações do tempo de frente e de cauda é complexo.

A partir de resultados ilustrados em tabelas, serão apresentadas algumas comparações entre os valores de corrente máxima nos enrolamentos (que não estão sob ensaio) do transformador produzidos pelos ensaios em laboratório e pela rede neural, bem como os respectivos erros relativos para os testes realizados. Assim, poderá ser verificada também a contribuição de cada variável no cômputo geral dos processos, denotando assim, a

possibilidade de avaliar eventuais falhas nos transformadores em relação ao formato da onda de descarga atmosférica.

É importante ressaltar também que o tipo de enfoque que será dado neste trabalho poderá trazer resultados bastante interessantes e impulsionar novas pesquisas nesta área, uma vez que existe o propósito de auxiliar em situação de problemas de análise de falhas nos ensaios de impulso atmosférico de transformador de distribuição.

Essa avaliação é quase impossível de ser detectada em ensaios experimentais, levando-se em conta as pequenas variações na corrente, pois, os vestígios de pequenas perfurações dentro do transformador com tensões impulsivas são quase imperceptíveis (furo de agulha). Nesses casos específicos são necessários outros ensaios complementares para detectar esses defeitos.

5.2 Obtenção dos Dados Para Implementação da Abordagem Neural

Os procedimentos metodológicos elaborados nesta pesquisa possuem como linha mestra uma avaliação detalhada dos Níveis Básicos de Impulso (NBI) que estão sendo praticados em nosso território e são estruturados a partir de ensaios experimentais que visam fornecer subsídios sobre o dimensionamento dos transformadores de distribuição relacionados com as descargas atmosféricas. Na prática, este estudo é realizado através do Ensaio de Impulso Atmosférico. Descrevem-se a seguir as algumas etapas da metodologia experimental.

5.2.1 Ensaios Normalizados

Foram utilizados dois transformadores de distribuição trifásico tipo delta-estrela, potência 25 kVA e 45 kVA, ambos com tensão primário/secundário, 13800/220 Volts. Executaram-se, então, ensaios normalizados visando à avaliação do dimensionamento dos transformadores para as seguintes tensões de impulso;

- NBI de 95 kV.
- NBI de 110 kV.

De acordo com as recomendações contempladas nas normas técnicas foram aplicados os seguintes impulsos em seqüência para os ensaios normalizados:

- 1) Um Impulso Pleno com valor reduzido.
- 2) Um Impulso Pleno com valor especificado.
- 3) Um Impulso Cortado com valor reduzido.

- 4) Dois Impulsos Cortados com valor especificado.
- 5) Dois Impulsos Plenos com valor especificado.

Sendo que, todos os impulsos são de polaridade negativa, o tempo de frente de $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$, tempo de meio valor de $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ e tempo de corte entre 2 a $6 \mu\text{s}$. A detecção de falhas neste tipo de ensaio é realizada conforme a seção 7.5 da Norma NBR – 5356-4 / 2007 [4].

Após todos os ensaios, não foi detectado nenhuma falha, ou seja, todos os dados obtidos pertencem a alguns transformadores em perfeitas condições de uso.

5.2.2 Ensaio Não-Normalizados

Foram realizados ensaios não normalizados com o objetivo de avaliar variações da forma de onda em relação à frente e à cauda normalizadas e não normalizadas e aumentar o conjunto de dados para o treinamento da rede. A seguir é apresentada na Tabela 5.1 a seqüência de ensaio com relação à forma de onda:

Tabela 5.1 Seqüência de ensaio para impulsos não normalizados.

Tempo de Frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	NBI (kV)
1,4	60	95
1,4	70	95
1,4	80	95
1,4	90	95
1,4	60	110
1,4	70	110
1,4	80	110
1,4	90	110
0,7	60	95
0,7	70	95
0,7	80	95
0,7	90	95
0,7	60	110
0,7	70	110
0,7	80	110
0,7	90	110

Para estes ensaios foram aplicados apenas um impulso pleno reduzido e na seqüência um impulso pleno.

5.2.3 Circuito Ensaiado

A seguir será apresentado na Figura 5.1 o circuito de ensaio para os transformadores mencionados anteriormente, este circuito é comumente utilizado para transformadores tipo delta-estrela, recomendado por [4,5,14].

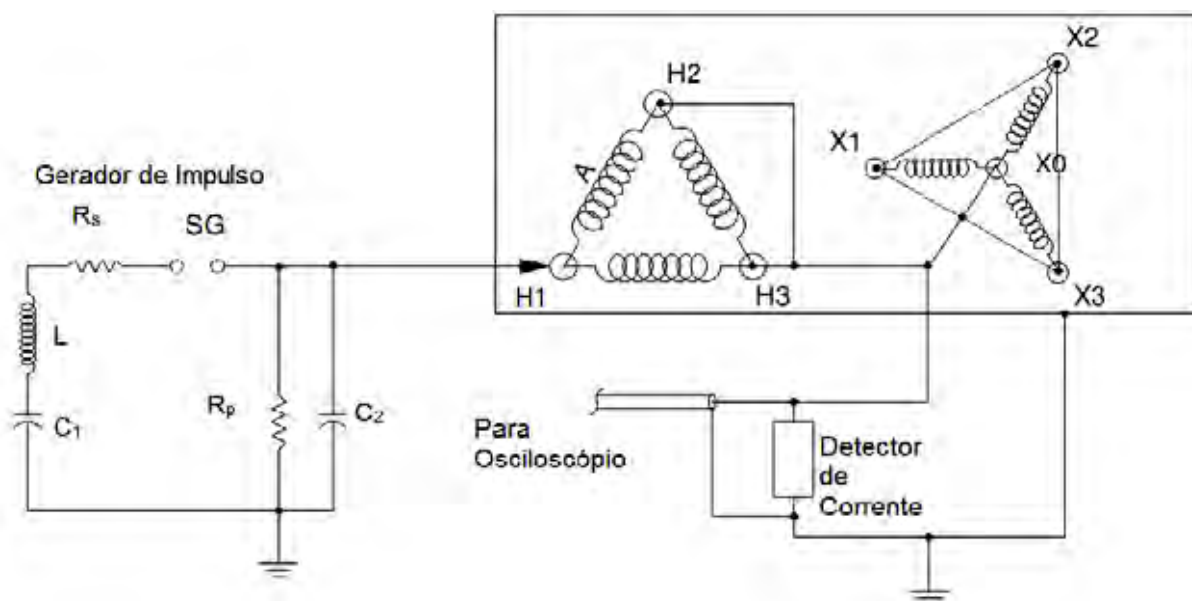


Figura 5.1. Circuito de ensaio para aplicação de testes de impulso.

5.2.4 Especificação Técnica do Gerador de Impulso e do Sistema de Medição

Para realização dos ensaios experimentais foi utilizado um gerador com as seguintes características técnicas:

- Gerador de impulso de 1400 kV.
- Capacidade de 225 kJ.
- Fabricado pela HIPOTRONICS.

O sistema de medição é composto pelos seguintes equipamentos:

- Sistema digital DIMS. Fabricante: HIPOTRONICS.
- Resolução vertical real de 10 bits.
- Divisor de tensão resistivo R500. Fabricante: Haefely.

5.2.5 Formas de ondas dos ensaios

Nesta seção serão apresentadas algumas das formas de ondas obtidas nos ensaios realizados em laboratórios de alta tensão.

As formas de ondas a seguir foram normalizadas para um tempo de frente de $1,2 \mu\text{s}$, tempo de cauda de $50 \mu\text{s}$ e NBI de 95 kV para transformadores de 45 kVA .

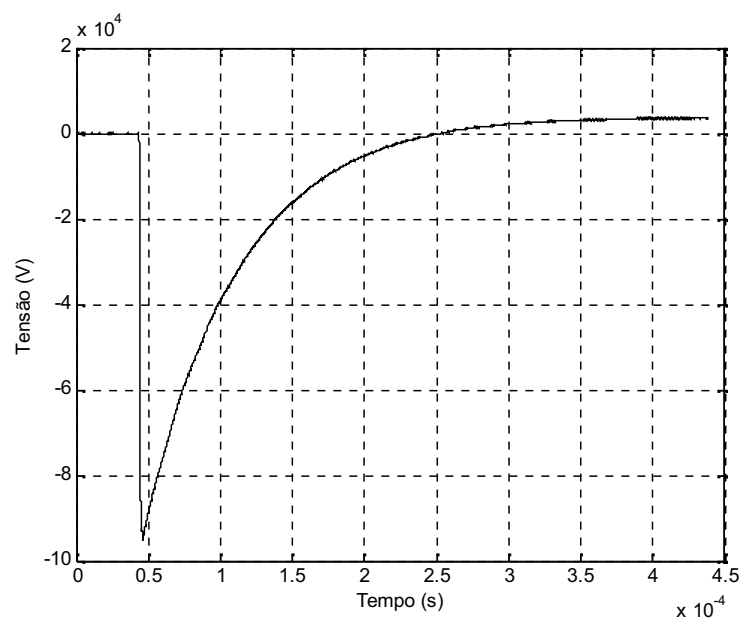


Figura 5.2. Gráfico de Tensão H1 Tap1 Impulso Pleno – Crista 95,1 kV.

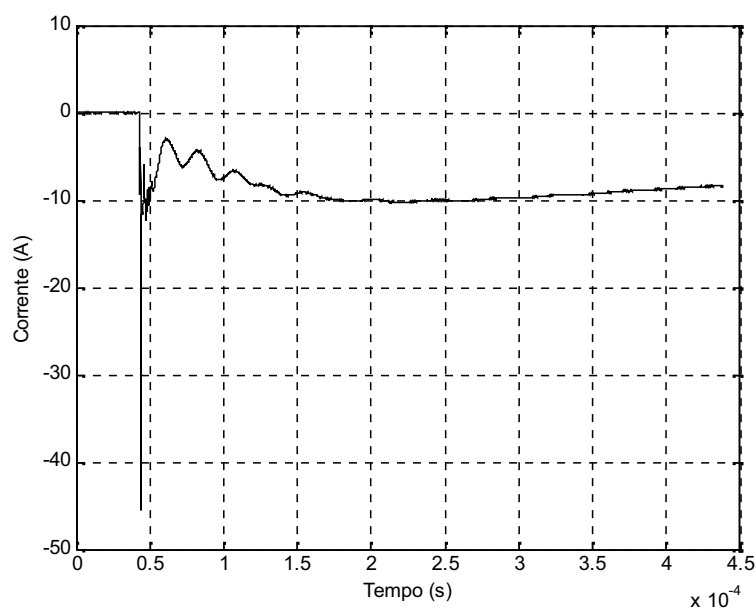


Figura 5.3. Gráfico de Corrente H1 Tap1 Impulso Pleno – Crista 95,1 kV.

A seguir, serão apresentadas formas de ondas normalizadas para um tempo de frente de $1,4 \mu\text{s}$, tempo de cauda de $60 \mu\text{s}$ e NBI de 110 kV para transformadores de 45 kVA .

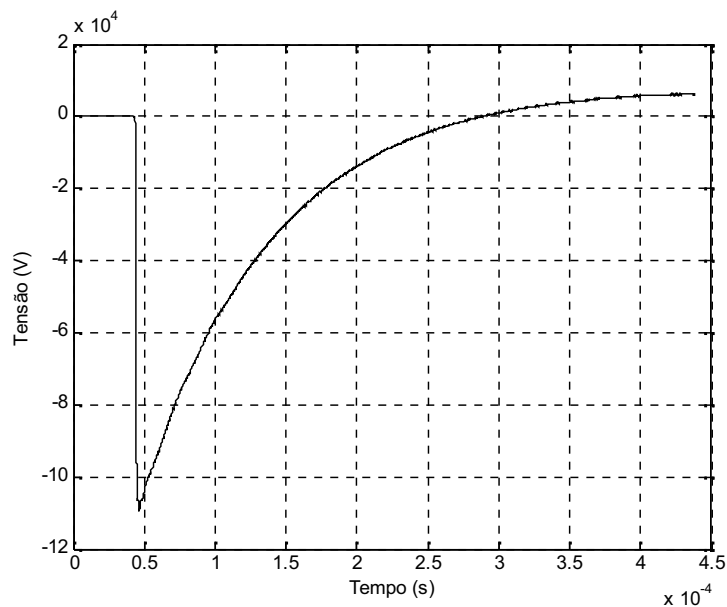


Figura 5.4. Gráfico de Tensão H1 Tap3 para Impulso Pleno - Crista $109,5 \text{ kV}$.

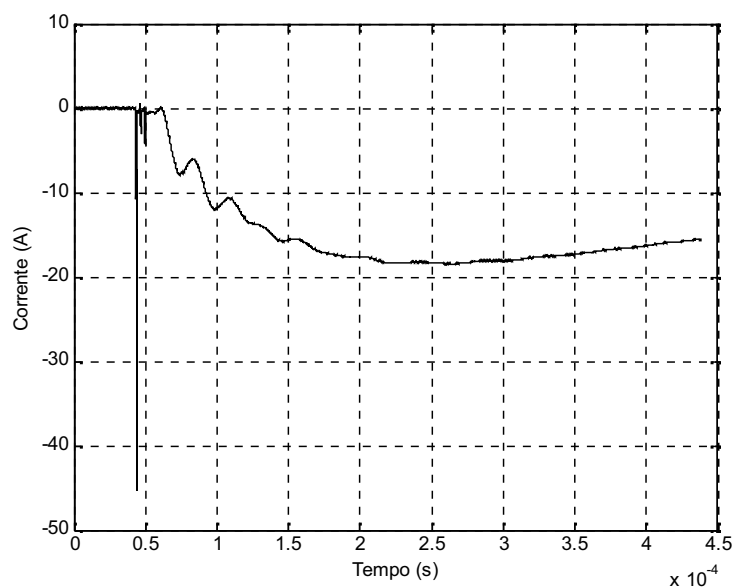


Figura 5.5. Gráfico de Corrente H1 Tap3 para Impulso Pleno - Crista $109,5 \text{ kV}$.

Os dados que serão utilizados no treinamento e validação da rede neural foram tirados de ensaios como os apresentados das Figuras 5.2 a 5.5 e de outras formas de ondas advindas de testes realizados em laboratório de alta tensão.

5.3 Arquiteturas Neurais Utilizadas

Após a obtenção dos dados (variáveis), duas Redes Neurais Artificiais do tipo Perceptron Multicamadas foram empregadas na identificação e estimação da corrente máxima nos enrolamentos que não estão sob ensaio de um transformador de distribuição. Estas redes foram implementadas no software Matlab.

As variáveis que compõem cada vetor de entrada das redes são definidas por variáveis que influenciam nas correntes máximas produzidas dentro do transformador. Estas variáveis são identificadas para a primeira rede como sendo, o tempo de frente de onda (T_f), o tempo de cauda (T_c) e a tensão de crista (V) no instante da descarga, e para a outra rede criada, foram utilizados, como entrada, o tempo de frente de onda (T_f), o tempo de cauda (T_c) e a taxa de crescimento da tensão ($\Delta V/\Delta T$).

A taxa de crescimento da tensão é calculada baseando-se no intervalo T , da forma de onda de impulso normalizada, apresentada anteriormente Figura 4.6 e pode ser descrita como:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{90\%} - V_{30\%}}{T_{90\%} - T_{30\%}} \quad (5.1)$$

Onde:

- $\Delta V/\Delta T$ – taxa de crescimento da tensão até próximo do valor de crista (kV/ μ s);
- $V_{90\%}$ – valor da tensão de crista equivalente a 90% do seu valor;
- $V_{30\%}$ – valor da tensão de crista equivalente a 30% do seu valor;
- $T_{90\%}$ – instante de tempo em que a tensão atinge 90% do valor de crista; e
- $T_{30\%}$ – instante de tempo em que a tensão atinge 30% do valor de crista.

O vetor de saída da rede neural artificial foi composto por uma única variável, a qual representa a corrente máxima ($I_{máx}$) nos enrolamentos do transformador que não estão sob ensaio.

A Figura 5.6 e 5.7 apresenta as arquiteturas neurais desenvolvidas para a estimação da máxima corrente relacionada à influência de descargas atmosféricas em um transformador de distribuição de 45 kVA e 25 kVA.

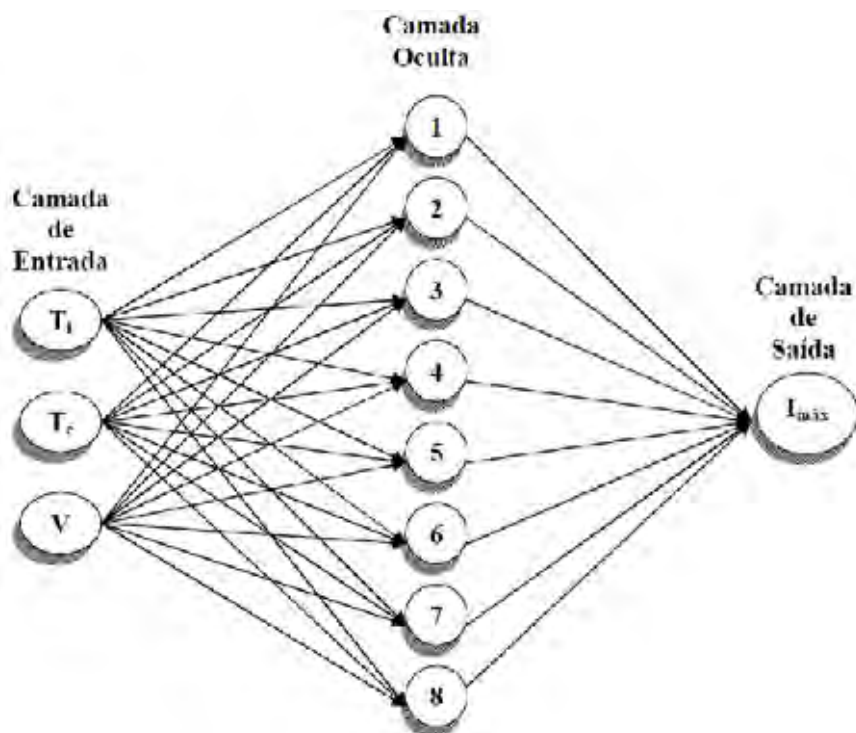


Figura 5.6. Primeira arquitetura neural implementada para a estimação do problema (RNA1).

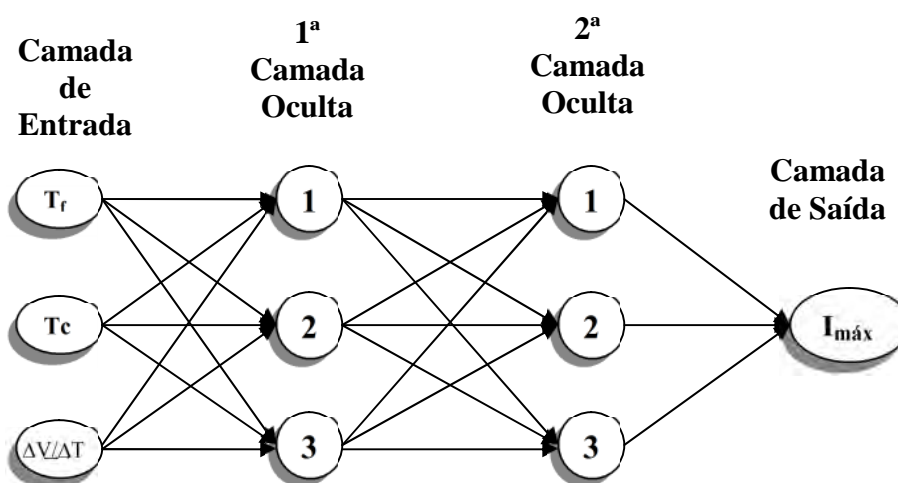


Figura 5.7. Segunda arquitetura neural implementada para a estimação do problema (RNA2).

A primeira arquitetura neural usada para estimar as correntes máximas nos enrolamentos não ensaiados do transformador apresentada como na Figura 5.6 contém as seguintes características:

- Arquitetura: Perceptron Multicamadas
- Número de Camadas Ocultas: 1
- Número de Neurônios na Camada Oculta: 8
- Algoritmo de Treinamento: Traingdx (*Backpropagation* com Aprendizagem Variável)

- Funções de Ativação: Tansig (camada oculta) e Purelin (camada de saída)

A segunda arquitetura neural usada para estimar as correntes máximas nos enrolamentos não ensaiados do transformador apresentada como na Figura 5.7 contém as seguintes características:

- Arquitetura: Perceptron Multicamadas
- Número de Camadas Ocultas: 2
- Número de Neurônios na Camada Oculta: 3
- Algoritmo de Treinamento: Traingdx (*Backpropagation* com Aprendizagem Variável)
- Funções de Ativação: Tansig (camadas ocultas) e Purelin (camada de saída)

É importante mencionar que inúmeras configurações foram empregadas no processo de validação, mas não tiveram o mesmo desempenho.

Definida as arquiteturas neurais, o próximo passo, foi efetuar um treinamento com estas redes para um total de 100.000 épocas. Apenas para primeira rede foi efetuado um treinamento com 20.000 épocas. Este valor de épocas foi aplicado em função de diversos testes aplicados para essa rede.

Foram utilizados para o transformador de 45 kVA:

- 142 vetores de treinamento; e
- 14 vetores de teste (não utilizados no treinamento da rede).

Enquanto no transformador de 25 kVA, foram utilizados:

- 120 vetores de treinamento; e
- 13 vetores de teste (não utilizados no treinamento da rede).

Estes números estão ligados às limitações de quantidade de ensaios realizados, os quais foram suficientes para a abordagem neural como será visto a seguir.

5.4 Desempenho das Redes Neurais Utilizadas

O erro médio quadrático é um parâmetro utilizado como critério de parada no treinamento (ciclo nos quais os dados de entrada são apresentados à rede e as saídas são comparadas), sendo que o resultado final da primeira rede criada foi de 0,00121401 para o transformador de 45 kVA e 0,00568265 para o de 25 kVA, enquanto para a segunda rede, foi de 0,00147629 para o transformador de 45 kVA e 0,00611686 para o de 25 kVA.

Apesar dos resultados do transformador para esse parâmetro serem diferentes as avaliações a seguir define se a rede está treinada adequadamente. Outra forma de se fazer uma

comparação entre a corrente máxima fornecida pela rede neural artificial e a corrente máxima ideal é calcular a correlação linear (R) entre estas duas respostas.

Os resultados obtidos pelas redes estão ilustrados nas Figuras 5.8 a 5.11, onde a primeira rede obteve-se uma correlação linear $R = 0,9934$ para o transformador de 45 kVA e $R=0,99957$ para o de 25 kVA e na segunda rede obteve a correlação linear $R = 0,99645$ para o transformador de 45 kVA e $R=0,9959$ para o de 25 kVA. Isso implica que a rede proposta neste trabalho fez uma boa aproximação para o modelo aplicado, devido o valor ser próximo a unidade.

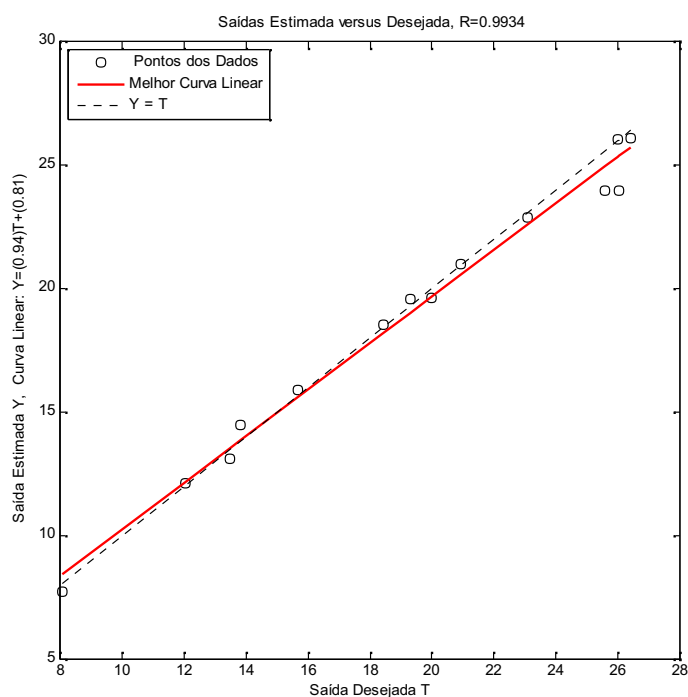


Figura 5.8. Correlação linear Y x T da primeira rede para o transformador de 45 kVA.

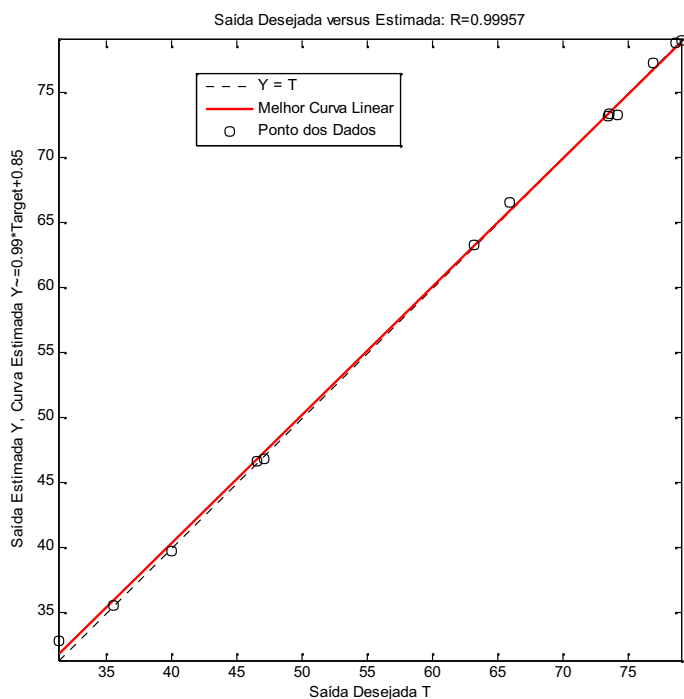


Figura 5.9. Correlação linear Y x T da primeira rede para o transformador de 25 kVA.

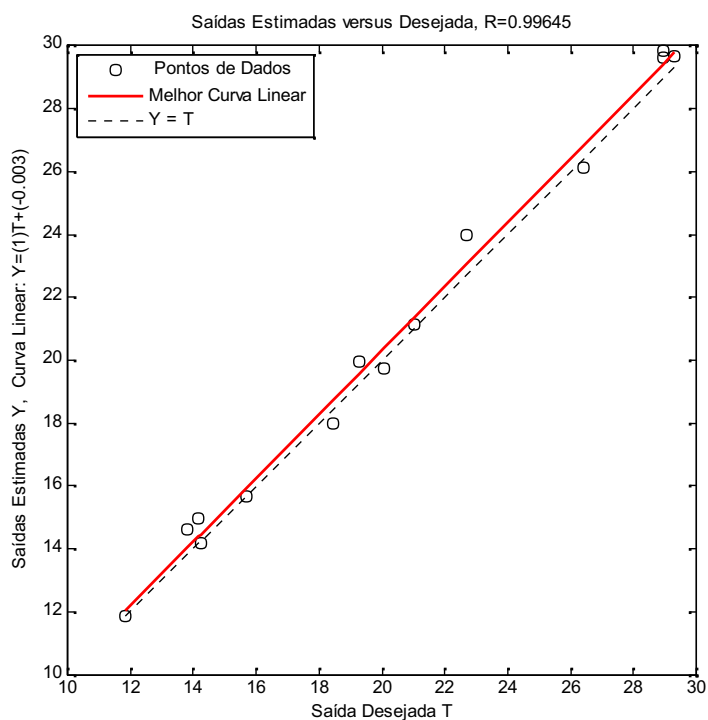


Figura 5.10. Correlação linear Y x T da segunda rede para o transformador de 45 kVA.

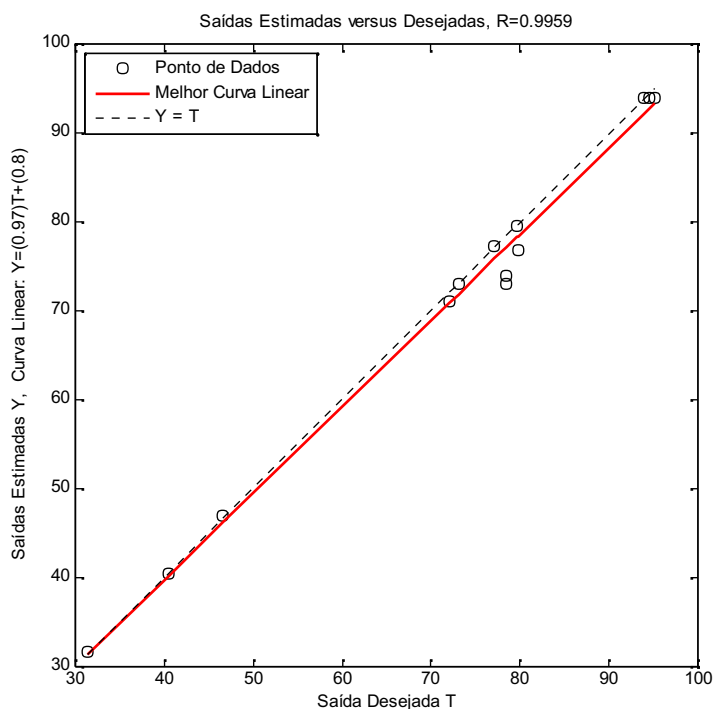


Figura 5.11. Correlação linear Y x T da segunda rede para o transformador de 25 kVA.

Finalmente, para analisar a qualidade do treinamento da rede aplica-se o método do erro médio relativo. Neste método são aplicados às redes, dados chamados de “dados de teste”, os quais são conjuntos de dados que não pertenciam ao conjunto de treinamento, porém, faziam parte do conjunto total de dados obtidos. A seguir têm-se nas Tabelas 5.1 a 5.4 os resultados.

Tabela 5.1. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA1 para 45 kVA.

$I_{máx}$ Real (A)	$I_{máx}$ RNA1 (A)	Erro Relativo (%)
23,072	22,89039	0,787156
18,451	18,55072	0,540433
20,932	21,00029	0,326236
26,015	26,07022	0,212245
26,417	26,11532	1,141994
13,471	13,09024	2,82654
8,066	7,724031	4,23964
13,823	14,45837	4,596463
15,668	15,88344	1,375003
19,288	19,58536	1,541684
19,991	19,63857	1,762918
12,032	12,10366	0,59558
25,588	23,97981	6,284945
26,028	23,97798	7,876197
Erro Médio Relativo		2,4362

Tabela 5.2. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA1 para 25 kVA.

$I_{máx}$ Real (A)	$I_{máx}$ RNA1 (A)	Erro Relativo (%)
65,916	66,57021	0,992483
35,473	35,5518	0,222128
76,924	77,30738	0,498392
39,931	39,79175	0,348726
63,135	63,31235	0,280914
31,333	32,84346	4,82067
46,569	46,69283	0,265902
73,579	73,36478	0,291146
74,163	73,28401	1,185208
73,418	73,20228	0,293831
79,091	79,02135	0,088064
78,617	78,83132	0,272614
47,077	46,8514	0,479209
	Erro Médio Relativo	0,7171

Tabela 5.3. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA2 para 45 kVA.

$I_{máx}$ Real (A)	$I_{máx}$ RNA2 (A)	Erro Relativo (%)
21.017	21,12193	0,49925
26.396	26,12184	1,03864
14.225	14,17914	0,32238
13.823	14,63758	5,89292
15.673	15,68336	0,06608
19.258	19,95558	3,62227
20.063	19,72478	1,68578
22.704	24,00022	5,709239
11.849	11,87038	0,18043
28.962	29,8518	3,0723
14.164	14,96769	5,6742
29.317	29,67366	1,21658
28.953	29,60646	2,25697
18.435	18,00316	2,34253
	Erro Médio Relativo	2,3985

Tabela 5.4. Erro relativo entre a corrente de real e a corrente na saída RNA2 para 25 kVA.

$I_{máx}$ Real (A)	$I_{máx}$ RNA2 (A)	Erro Relativo (%)
79.735	82,60134	3,59483
78.439	83,78642	6,8173
78.498	83,00786	5,74519
72.123	73,16902	1,45033
77.144	77,28879	0,18767
40.439	40,54505	0,26226
31.333	31,64097	0,98289

46.569	46,91762	0,74861
73.071	73,092	0,02874
79.709	79,90357	0,24406
95.085	96,2127	1,18599
94.527	95,059774	0,56362
93.892	93,97897	0,09257
	Erro Médio Relativo	1,5646

Observando as tabelas acima pode ser constatado que para a primeira rede treinada com os dados do transformador de 45 kVA, o maior erro foi de 7,87 e para o transformador de 25 kVA foi de 4,82, no caso da segunda rede o maior erro para o transformador de 45 kVA foi de 6,82 e para o transformador de 25 kVA foi de 5,89, sendo a média dos erros relativos bem abaixo destes valores. Desta forma, pode se dizer que a rede foi capaz de mapear a correlação entre as variáveis de entrada e saída (generalização). Levando-se em conta também que para a complexidade da interação entre as variáveis os erros encontrados são aceitáveis para este tipo de aplicação.

Baseando-se no desempenho das redes, a seguir serão apresentados os pesos e limiares encontrados para cada rede. A Tabela 5.5 apresenta os pesos e os limiares encontrados para cada transformador depois de treinada a RNA1.

Tabela 5.5. Pesos e limiares da RNA1 após treinamento.

Transformador de 45 kVA		Transformador de 25 kVA	
Pesos das Entradas 1ª Camada	Limiares 1ª Camada	Pesos das Entradas 1ª Camada	Limiares 1ª Camada
0,076	-2,959	-0,443	-2,318
0,259	-2,207	-1,150	1,645
0,192	1,284	-0,538	-1,513
-0,147	-0,562	0,226	0,379
0,187	1,203	-1,492	-0,909
-0,308	-1,137	-0,439	-0,511
0,498	-2,585	0,894	-2,178
-0,271	3,221	-0,899	-2,100

Sendo que o limiar da camada de saída para o transformador de 25 kVA é -0,147 e para o transformador de 45 kVA é 0,313, ambos na arquitetura RNA1. A Tabela 5.6 e 5.7 apresenta os pesos e os limiares encontrados para cada transformador depois de treinada a RNA2.

Tabela 5.6. Pesos da RNA2 após treinamento.

Transformador de 45 kVA			Transformador de 25 kVA			
Pesos da 1ª Camada		Pesos da 2ª Camada	Pesos da 1ª Camada		Pesos da 2ª Camada	
2,096	1,867	-1,102	0,596		-0,651	
-1,815	0,916	-1,379	0,910		1,869	
1,120	0,926	0,781	1,127		1,253	

Tabela 5.7. Limiares da RNA2 após treinamento.

Transformador de 45 kVA		Transformador de 25 kVA	
Limiares 1ª Camada	Limiares 2ª Camada	Limiares 1ª Camada	Limiares 2ª Camada
-2,536	-1,926	-1,633	-1,750
0,0330	-1,340	-0,458	-1,439
-2,374	1,800	-1,622	1,709

Sendo que o limiar da camada de saída para o transformador de 25 kVA é 0,078 e para o transformador de 45 kVA é -0,342.

A seguir será apresentado um tópico sobre o desenvolvimento da arquitetura da primeira rede.

5.5 Refinamento dos Sistemas Inteligentes Aplicados ao Estudo

A partir da primeira rede neural artificial elaborada foi possível observar o quanto a corrente máxima no enrolamento do transformador teve seu valor alterado em função do tempo de frente, do tempo de cauda e do valor de crista da tensão em função do tempo de frente da onda.

Depois de treinada, a rede neural exibiu resultados satisfatórios em relação a seu desempenho a partir do erro quadrático médio (0,00121401), da correlação linear e dos erros relativos aos dados de teste. Essa análise vem mostrando que a rede neural artificial foi capaz de mapear problemas que envolvem processos de alta tensão relacionados às descargas atmosféricas.

O refinamento da rede foi fundamentado justamente em diminuir os erros encontrados. A partir desse propósito, foram feitos exaustivos treinamentos e simulações considerando as funções de ativação, o algoritmo de treinamento e o número de neurônios, a fim de que fosse encontrada uma performance mais apurada para a primeira rede.

5.5.1 Refinamento da Rede Quanto à Influência das Funções de Transferência

As funções de transferência (ativação) exercem papel fundamental no tratamento dos dados pela rede neural, ativando ou não a saída, dependendo da soma ponderada das suas entradas, ou seja, são as funções de ativação que definem quais entradas são significativas para determinado tipo de treinamento.

Na escolha de uma função de ativação, deve-se observar o intervalo onde os valores estarão restringidos, pois isso implicará quando da normalização dos valores de entrada. As duas funções de ativação utilizadas na primeira rede criada para a pesquisa apresentada anteriormente foram a *tansig* (Camada Oculta) e a *purelin* (Camada de Saída).

A função de ativação *tansig*, ou tangente-sigmóide, pode ser utilizada tanto para redes com apenas uma camada quanto para redes multicamadas. Os valores que podem ser produzidos por este tipo de função estão restringidos no intervalo $-1 \leq y \leq 1$, como está ilustrado na Figura 5.12.

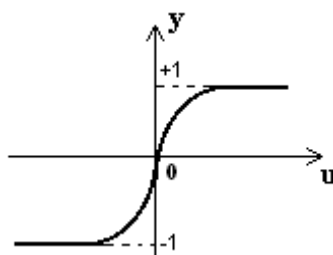


Figura 5.12. Função de ativação tangente-sigmóide.

A função de ativação *purelin*, ou linear, ocasionalmente pode ser utilizada em redes do tipo *backpropagation*. Os valores que podem ser produzidos por esta função estão no intervalo $-1 \leq y \leq 1$, como está ilustrado na Figura 5.13, assim como na função de ativação *tansig*.

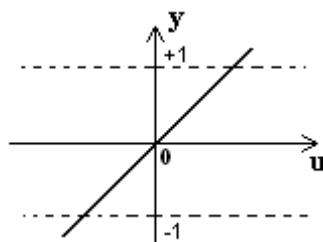


Figura 5.13. Função de ativação linear.

O refinamento da rede neural foi realizado a partir das funções de ativação *tansig* e *purelin*, trocando-as entre as camadas oculta e de saída. Esse procedimento foi feito mantendo-se os mesmos parâmetros da rede original, ou seja, número de épocas, limite de erro médio quadrático, número de neurônios e função de treinamento.

Os erros médios quadráticos são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Erros médios quadráticos para diferentes funções de ativação.

RNA	Camada Oculta	Camada de Saída	Erro Médio Quadrático
Original	<i>Tansig</i>	<i>Purelin</i>	0,00120
1	<i>Purelin</i>	<i>Tansig</i>	0,00799
2	<i>Purelin</i>	<i>Purelin</i>	0,0121
3	<i>Tansig</i>	<i>Tansig</i>	0,00120

A partir dos resultados obtidos na Tabela 5.8, percebe-se que as alterações das funções de ativação não são tão eficazes na obtenção de performances melhores para a rede neural original. Apesar dessa verificação, é importante observar o comportamento do decréscimo do erro médio quadrático para o melhor refinamento obtido (Arquitetura empregada na primeira rede desta pesquisa), conforme a Figura 5.14.

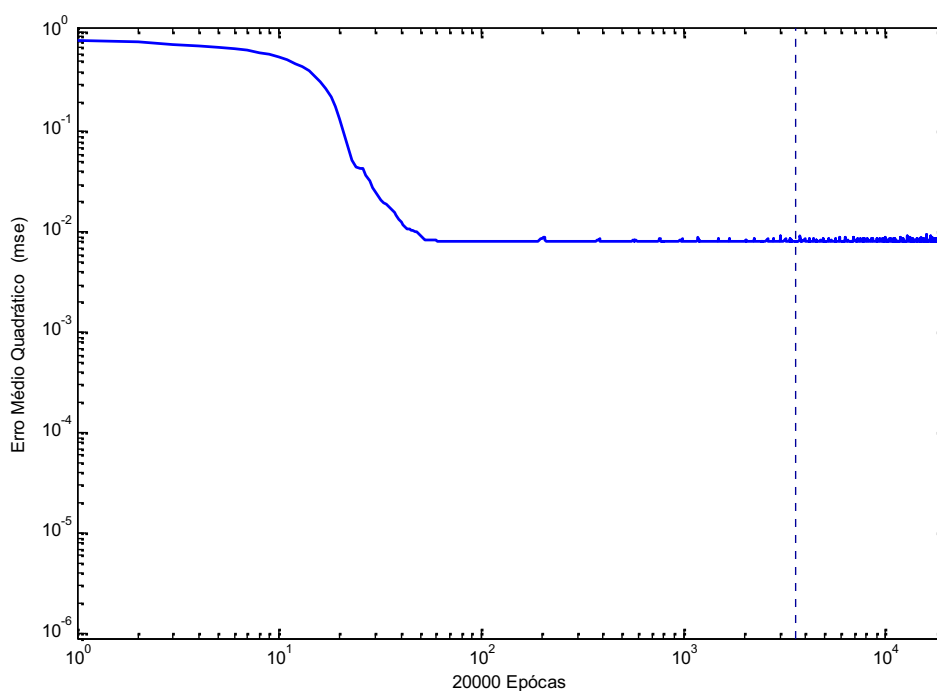


Figura 5.14. Desempenho da RNA em relação ao limite de 10^{-5} .

5.5.2 Refinamento da Rede Quanto à Influência à Influência do Algoritmo de Treinamento

O algoritmo de treinamento escolhido para uma rede neural irá repercutir de que maneira a rede alcançará o erro mais próximo do desejado. *Traingd*, *traingda*, *traingdm* e *traingdx* são funções que podem ser utilizadas para o treinamento de uma rede neural implementada no software Matlab as quais utilizam a regra do gradiente descendente para o algoritmo backpropagation.

Traingd é uma função de treinamento da rede que adapta pesos e variáveis de entrada de acordo com o gradiente descendente.

Traingda é uma função de treinamento da rede que adapta pesos e variáveis de entrada de acordo com o gradiente descendente com a taxa de pesos adaptativa. A função pode treinar toda a rede, enquanto o seu peso, a entrada e as funções de transferência possuem funções derivativas. Neste caso o Backpropagation é usado para calcular derivadas de desempenho no que diz respeito ao peso e as variáveis de entrada. Cada variável é ajustada de acordo com o gradiente descendente

A cada época, se o desempenho não está indo na direção da meta, a taxa de aprendizagem é aumentada. Se o desempenho aumenta muito mais do que um fator de máxima performance (regula a performance para que não ocorra uma degeneração do treinamento), a taxa de aprendizagem é diminuída.

Traingdm é uma função de treinamento da rede que adapta pesos e variáveis de entrada de acordo o gradiente descendente com momento.

Traingdx é uma função de treinamento da rede que adapta pesos e variáveis de entrada de acordo com o gradiente descendente (*Backpropagation*).

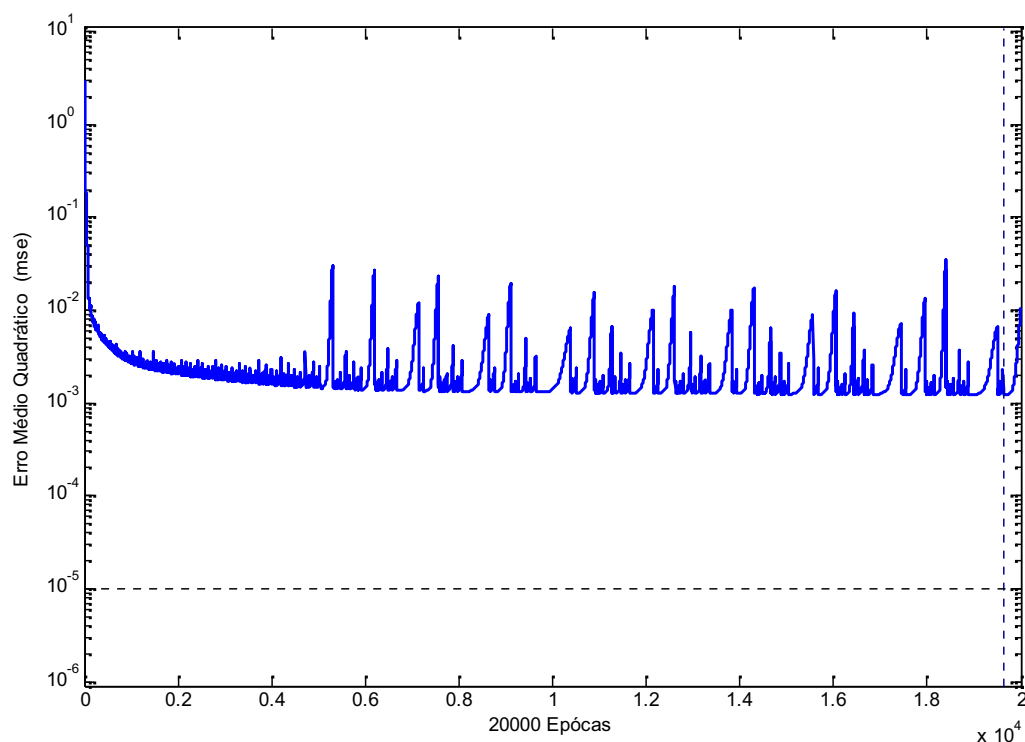
O refinamento da rede original foi realizado substituindo a função *traingdx* pelas funções de treinamento *traingd*, *traingda* e *traingdm*. Nesse procedimento, mantiveram-se os mesmos parâmetros da rede original, ou seja, número de épocas, limite de erro médio quadrático, funções de ativação e número de neurônios.

Após os treinamentos, elaborou-se a Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Erros médios quadráticos para diferentes funções de treinamento.

RNA	Função de Treinamento	Erro Médio Quadrático
Original	<i>Traingdx</i>	0,00120
1	<i>Traingd</i>	0,00179
2	<i>Traingda</i>	0,00122
3	<i>Traingdm</i>	0,00177

A mudança das funções de treinamento apresentadas na Tabela 5.9 para avaliar a influência na performance, assim como na Tabela 5.8, não teve efeito favorável a respeito dos erros médios quadráticos. Novamente, apesar desta verificação, é importante observar o comportamento do decrescimento do erro médio quadrático para o melhor refinamento obtido (Original), conforme a Figura 5.15.

Figura 5.15. Desempenho da RNA em relação ao limite de 10^{-5} .

Observando a Figura 5.15, percebe-se que a mudança no tipo de algoritmo de treinamento da rede neural acarreta no formato da curva do decrescimento do erro médio quadrático.

5.5.3 Refinamento da Rede Quanto à Influência do Número de Neurônios

O neurônio é uma unidade de processamento conectada por canais de comunicação que estão associados a um determinado peso. A quantidade de neurônios atuando em um treinamento de uma rede neural é fundamental para que se obtenha uma performance desejável.

O refinamento foi realizado com a mudança do número de neurônios da rede original, ou seja, manteve-se o número de épocas, o limite de erro médio quadrático, as funções de ativação e a função de treinamento. Através de vários treinamentos, elaborou-se a Tabela 5.10 que ilustra os erros médios quadráticos para diferentes números de neurônios.

Tabela 5.10. Erros médios quadráticos para diferentes números de neurônios.

RNA	Números de Neurônios	Erro Médio Quadrático
1	2	0,00390112
2	3	0,00224906
3	4	0,00123701
4	5	0,00124383
5	6	0,0012065
6	7	0,00117133
Original	8	0,001211401
7	9	0,00106654
8	10	0,00100216
9	11	0,00105297
10	12	0,00128784
11	13	0,00111643
12	14	0,00101369
13	15	0,00114763
14	16	0,00108302
15	17	0,00104601
16	18	0,00107917
17	19	0,00107779
18	20	0,00109271

A análise da Tabela 5.10 mostra uma melhoria na performance da rede quanto à variação dos neurônios. Essa mudança ocorre para quando o número de neurônios está abaixo do número de neurônios utilizados na rede neural original, ou seja, os erros médios quadráticos são menores. A Figura 5.16 ilustra a performance obtida pelo decréscimo do erro médio quadrático através da RNA 4 da Tabela 5.10.

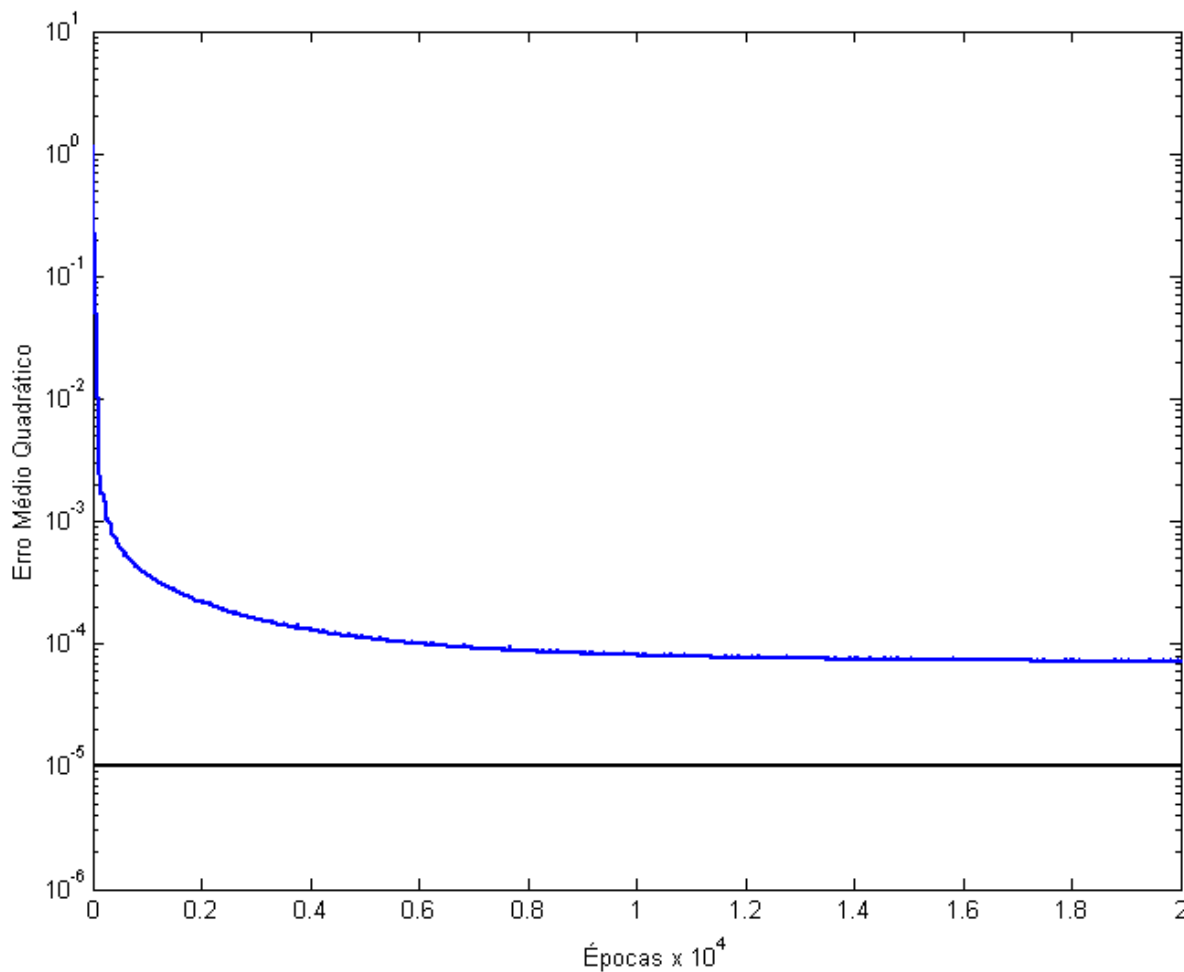


Figura 5.16. Desempenho da RNA 4 em relação ao limite de 10^{-5} .

O menor erro médio quadrático encontrado ocorre quando a rede utiliza quando utiliza 20 neurônios na camada oculta. Vários outros treinamentos foram realizados com a rede utilizando-se os 20 neurônios, elaborando-se assim a Tabela 5.11

Tabela 5.11. Alguns treinamentos para a rede neural utilizando 20 neurônios.

RNA	Erro Médio Quadrático
1	0,00117783
2	0,00115622
3	0,00118758
4	0,00116321
5	0,00116766

A rede neural com 20 neurônios demonstra ter uma performance satisfatória comparada à rede neural original. Portanto, a rede neural com 20 neurônios pode ser utilizada com maior eficiência para mapear o comportamento de descargas atmosféricas no secundário de um transformador.

A Figura 5.17 mostra a melhor performance obtida para o refinamento da rede neural artificial original.

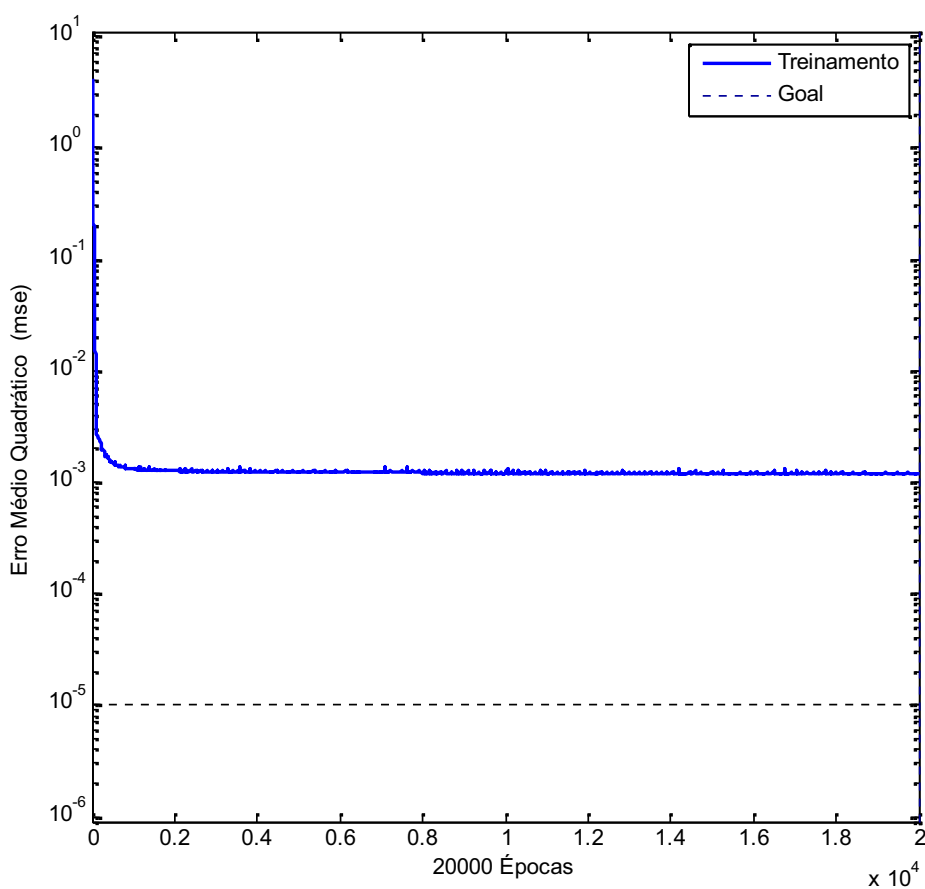


Figura 5.17. Desempenho da RNA 2 da Tabela 5.11.

Apesar da rede com 20 neurônios possuir uma melhor resposta em relação ao erro médio quadrático, o resultado para os dados de teste para rede original e a rede com 9 neurônios (subseqüente) foram praticamente iguais. Sendo assim, não haveria necessidade utilizar uma rede com maior número do que 8 neurônios, principalmente, considerando a minimização de recursos computacionais.

Na próxima seção serão apresentados diversos gráficos de perfis simulados através das redes treinadas previamente, e também serão discutidos estes resultados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos de simulações feitas com as redes neurais criadas e as respectivas discussões sobre as redes neurais desenvolvidas na estimação da amplitude máxima da corrente nos enrolamentos que não estão sob ensaio. Esses resultados serão utilizados para a fundamentação de critérios relacionados ao comportamento dos transformadores frente às descargas atmosféricas, no que diz respeito à análise da corrente na detecção de falhas.

Nestes resultados será observado, portanto, o comportamento da corrente máxima em função dos tempos de frente e de cauda. Portanto, poder-se-á avaliar a influência dessas variáveis quanto à amplitude máxima da corrente aplicada em ensaios de impulso em transformadores de distribuição. Os resultados das simulações estão divididos da seguinte forma:

- Corrente máxima influenciada por tempos de frente variáveis, considerando tempos de cauda constantes. Os resultados foram obtidos de simulações feitas na primeira rede neural, considerando o valor de crista da tensão.
- Corrente máxima influenciada pela variação do tempo de cauda, considerando tempos de frente constantes. Os resultados foram obtidos de simulações feitas na primeira rede neural, considerando o valor de crista da tensão.
- Corrente máxima influenciada por tempos de tempos de frente variáveis, considerando tempos de cauda constantes. Os resultados foram obtidos de simulações feitas na segunda rede neural, considerando a taxa de crescimento da tensão.
- Corrente máxima influenciada pela variação do tempo de cauda, considerando tempos de frente constantes. Os resultados foram obtidos de simulações feitas na segunda rede neural, considerando a taxa de crescimento da tensão.
- Corrente máxima em função da taxa de crescimento da tensão, considerando tempos de frentes e caudas constantes. Os resultados foram obtidos de simulações feitas na segunda rede neural.

6.2 Corrente Máxima em Função do Tempo de Frente para a RNA1

Uma onda de um impulso atmosférico no enrolamento de um transformador de distribuição possui um tempo de frente e seu respectivo tempo de cauda. Para demonstrar que durante esse fenômeno o tempo de frente é influenciado pelo tempo de cauda e ambos influenciam na corrente no enrolamento, serão feitos dois tipos de análise na seqüência. Uma análise considerando um NBI = 95 kV, e outra um NBI = 110 kV, para dois transformadores, um com 45 kVA e outro 25 kVA, ambos com tensão 13,8kV /220 V e forma de ligação Δ/Y .

6.2.1 Resultados para o Transformador de 45 kVA

As figuras a seguir foram simuladas para o NBI = 95 kV. A Figura 6.1 ilustra o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente de onda ($I_{m\acute{a}x} \times T_f$), para diferentes tempos de cauda.

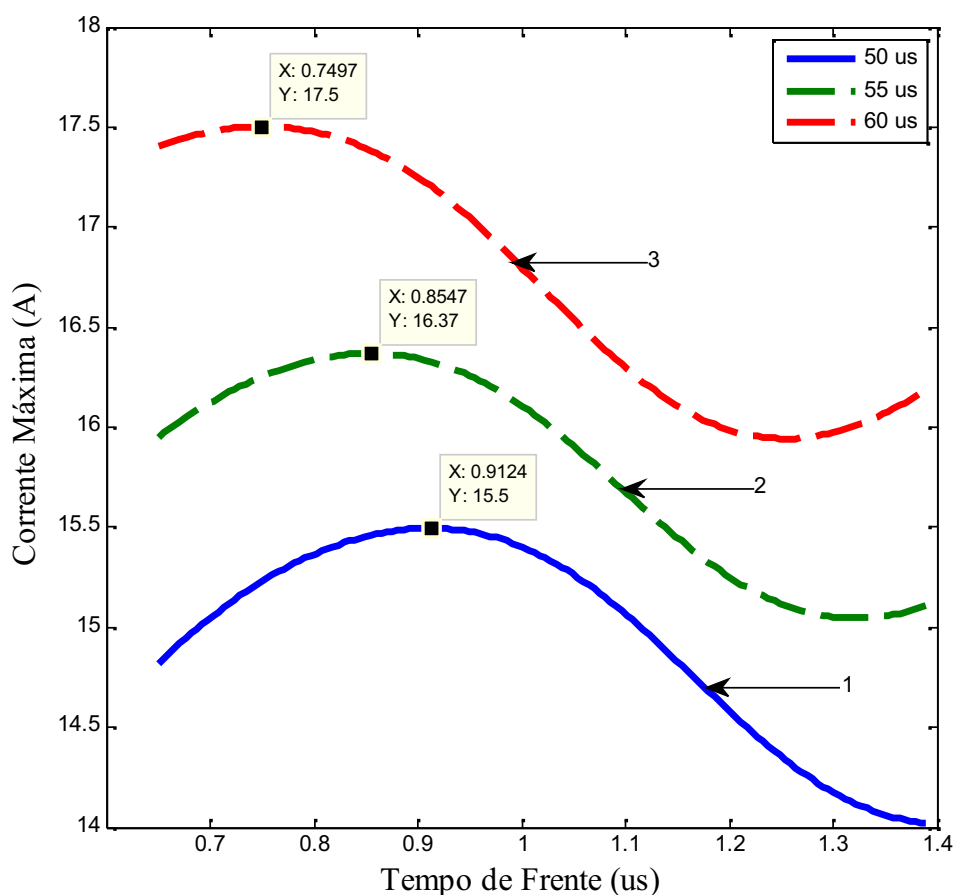


Figura 6.1. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Para facilitar o entendimento desta simulação, apresentam-se na Tabela 6.1 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.1 pelos pontos demarcados, com seus respectivos tempos de frente e tempo de cauda a que onda está sendo submetida.

Tabela 6.1. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	0,9124	50	15,50
2	0,8547	55	16,37
3	0,7497	60	17,50

Para uma melhor visualização dos resultados acima, a Figura 6.2 apresenta um gráfico em três eixos (corrente, tempo de frente e cauda) indicando os pontos de máximo.

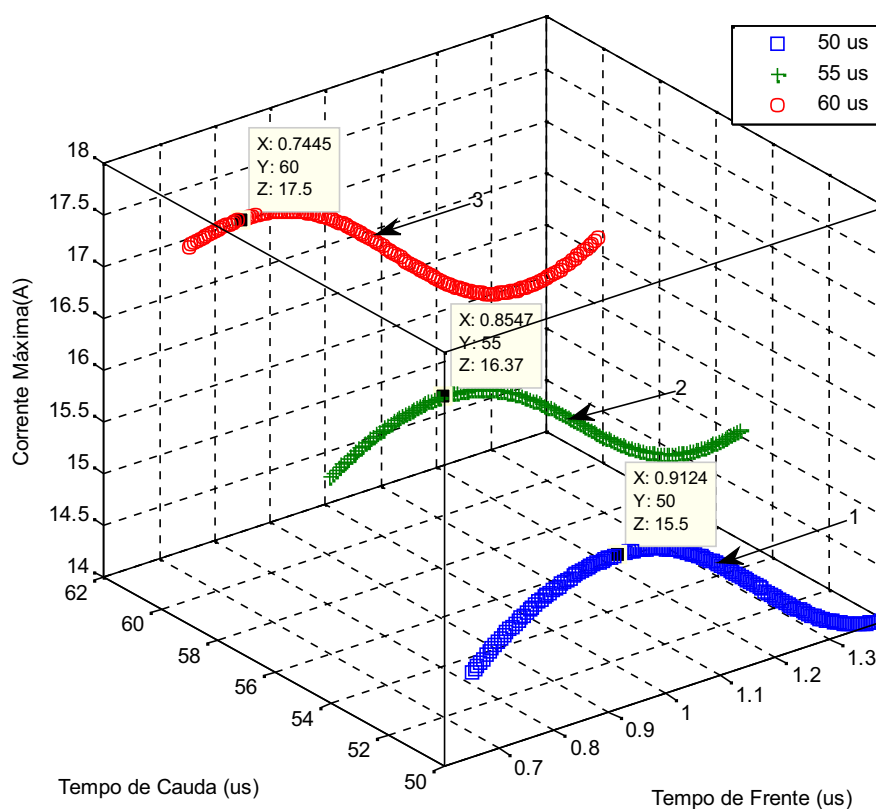


Figura 6.2 Gráfico em três eixos para 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Observando a Tabela 6.1 acima, constata-se que a pior situação, ou seja, maior corrente transferida, está na terceira curva. É importante mencionar que apesar de parecer uma pequena diferença, na realidade, para tempos de frente menores, a corrente é mais proeminente.

Neste sentido, pode-se estabelecer uma avaliação mais detalhada, considerando-se o dimensionamento do equipamento (transformador), que é o foco desta pesquisa. Outro aspecto de caráter adicional que pode ser observado é em relação ao impacto desta corrente quando transferida para o secundário de um transformador de distribuição.

A Figura 6.3 apresenta o perfil da corrente máxima em função do tempo de frente da onda para outros valores de tempo de cauda e para o NBI = 95 kV.

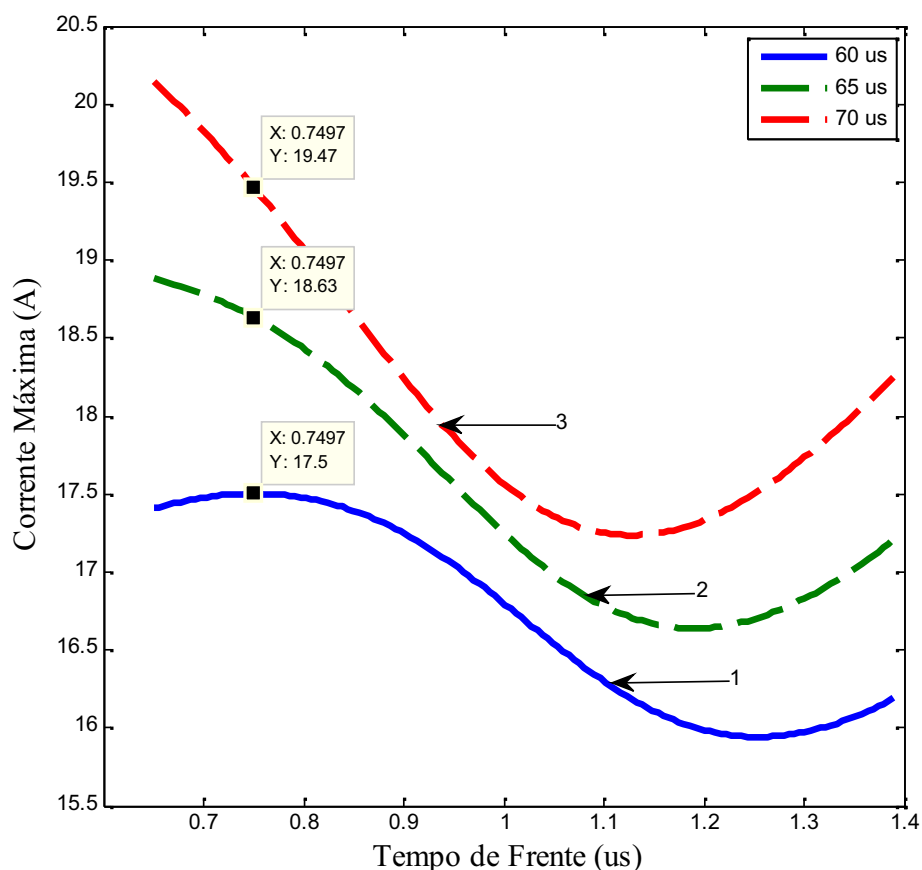


Figura 6.3. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Na Tabela 6.2 têm-se os valores de corrente máxima nas curvas da Figura 6.3.

Tabela 6.2. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	0,7497	60	17,50
2	0,7497	65	18,63
3	0,7497	70	19,47

Assim como na Figura 6.1, existe a importância em se determinar a maior corrente para cada situação (tempo de cauda). Através da Tabela 6.2, constata-se que a pior situação, ou seja, maior corrente transferida, está na terceira curva. Porém, esta avaliação tem que ser realizada conjuntamente, pois fica evidente, através das Figuras 6.1 e 6.3, que a influência do tempo de frente e de cauda na corrente do transformador é um processo dinâmico. Mesmo estando fora das prescrições da norma neste caso, trata-se de uma condição real que dificilmente é considerada em estudos desta natureza.

As próximas figuras foram simuladas para o NBI = 110 kV. A Figura 6.4 ilustra a intensidade de corrente em função do tempo de frente da onda, para diferentes tempos de cauda. É importante observar que o NBI foi modificado e, por conseguinte, os valores de corrente.

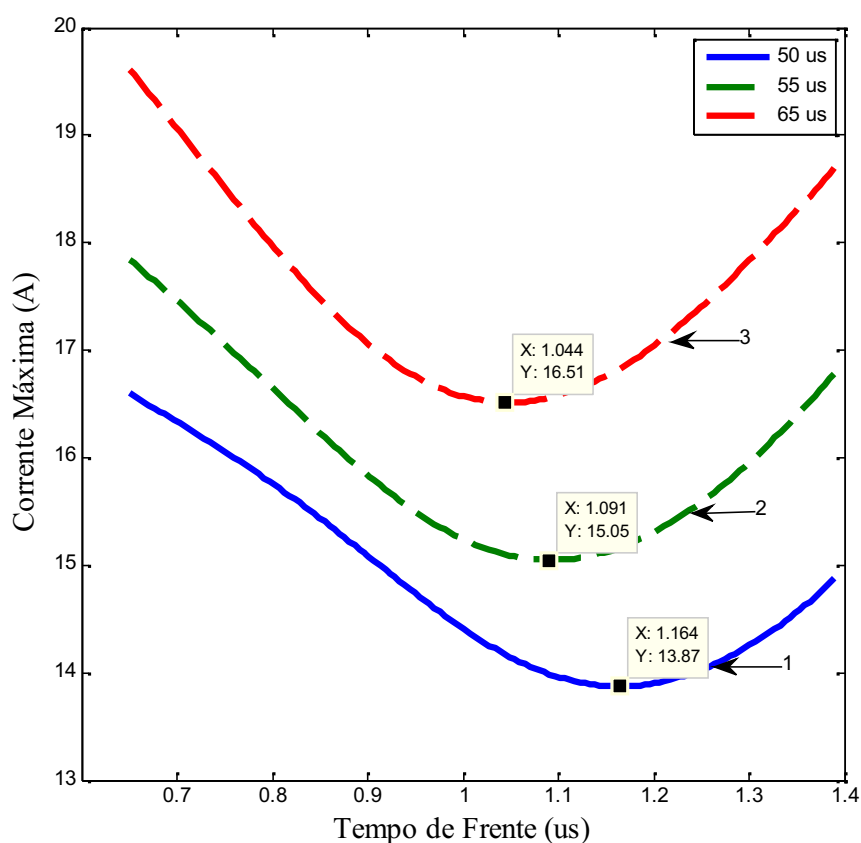


Figura 6.4. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Apresentam-se na Tabela 6.3 os valores mínimos de corrente ilustrados nas curvas da Figura 6.4 pelas linhas tracejadas, com seus respectivos tempos de frente e tempo de cauda a que onda está sendo submetida.

Tabela 6.3. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,164	50	13,87
2	1,091	55	15,05
3	1,044	60	16,52

De maneira análoga da análise feita para um NBI = 95 kV, para um NBI = 110 kV é importante determinar a corrente máxima para cada tempo de cauda. Entretanto, observando-se as curvas de corrente para cada tempo de cauda, todas tendem a ter seu valor de corrente máxima no menor tempo de frente (em função dos limites dos dados de ensaio apresentados para a rede neural). Neste caso, evidencia-se a inexistência de um padrão no comportamento do transformador frente às mudanças de valores de NBI, mantendo-se os demais parâmetros de ensaio.

Esta constatação pode ser entendida, levando-se em conta a influência das capacitâncias presentes nos enrolamentos (entre espiras) e dos terminais em relação ao tanque, que são parâmetros dependentes da crista e também da freqncia. Finalmente, para este tipo de transformador, e na condição ensaiada, para se obter uma maior amplitude de corrente, deve-se buscar valores de tempo de frente diferentes dos valores apresentados na Tabela 6.3 para os tempos de caudas específicos. Pois, se tratam de valores mínimos de corrente, os quais diminuem também pela diminuição do tempo de cauda.

A Figura 6.5 ilustra o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente, para valores diferentes de tempos de cauda e para o NBI = 110 kV.

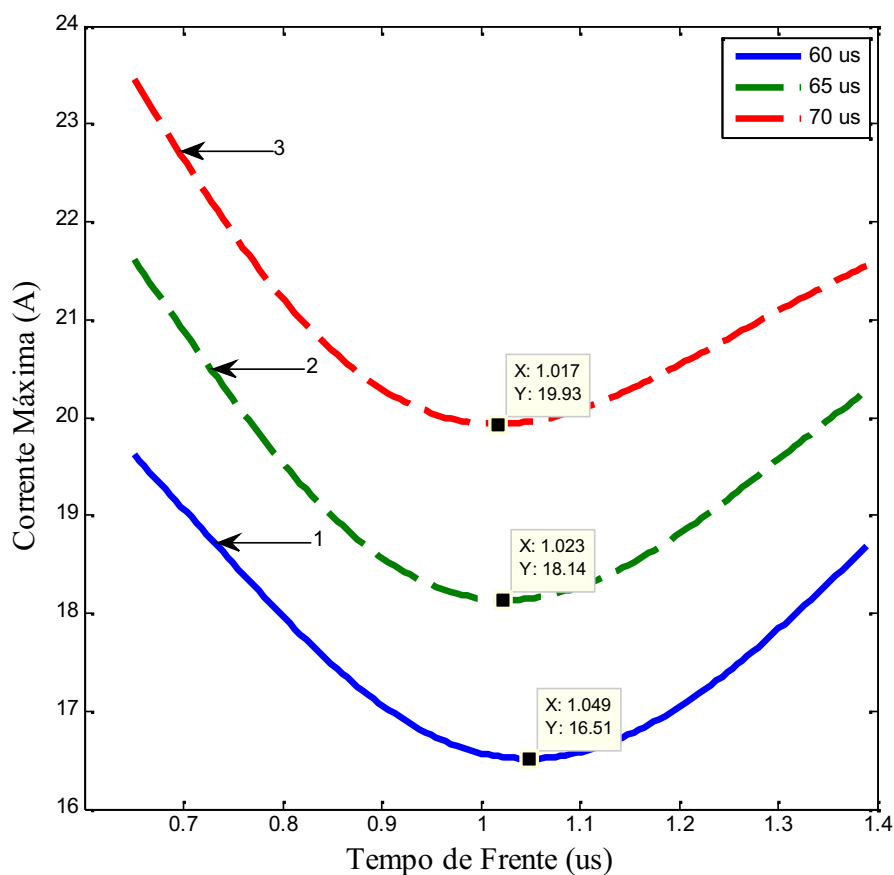


Figura 6.5. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

A Tabela 6.4 apresenta os valores mínimos de corrente demonstrados nas curvas da Figura 6.5, com seus respectivos tempos de frente e tempo de cauda a que onda está sendo submetida.

Tabela 6.4. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,017	60	16,51
2	1,023	65	18,14
3	1,049	70	19,93

Da mesma forma que na análise feita para o comportamento das curvas da Figura 6.4, é importante verificar a menor corrente para cada tempo de cauda. Observa-se assim, a dependência da frente de onda em relação à cauda na corrente máxima do transformador. Isto se torna perceptível através da Tabela 6.4.

6.2.2 Resultados para o Transformador de 25 kVA

Na seqüência as figuras foram simuladas para o NBI = 95 kV. A Figura 6.6 ilustra o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente de onda ($I_{m\acute{a}x} \times T_f$), para diferentes tempos de cauda.

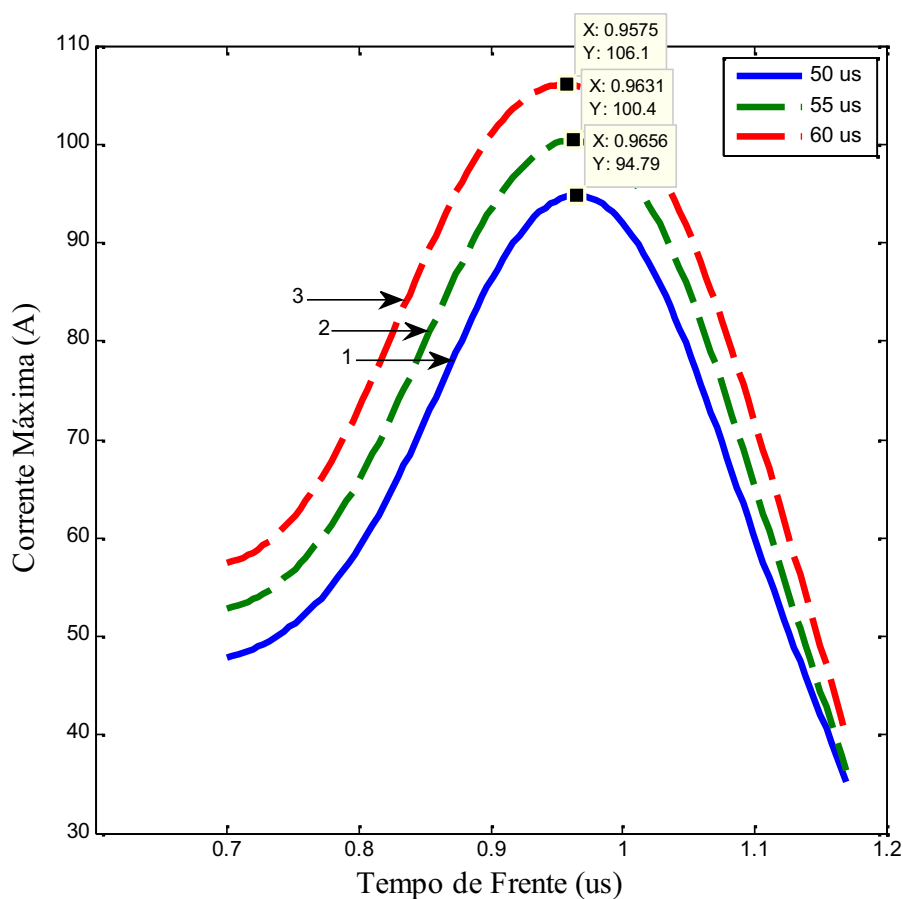


Figura 6.6. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Seguindo a mesma análise apresentada anteriormente, apresentam-se na Tabela 6.5 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.6 pelos pontos demarcados, com seus respectivos T_f e T_c a que onda está sendo submetida.

Tabela 6.5. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	0,9656	50	94,79
2	0,9631	55	100,4
3	0,9575	60	106,1

Através da Figura 6.6, observa-se que para este transformador, o maior tempo de cauda produziu a maior amplitude da corrente (corrente máxima), visto que a diferença entre os tempos de frente para os picos apresentados é muito pequena. Nesta situação pode-se dizer que para se obter a maior amplitude da corrente, com a finalidade de auxiliar a detecção de falha, precisa-se aplicar um impulso com tempo de frente de $0,95 \mu\text{s}$ e um tempo de cauda de $60 \mu\text{s}$ para um NBI de 95 kV . É importante mencionar que esta onda segunda [2] é prevista como sendo aceitável para ensaios de impulso normalizados, entretanto, neste caso, além de atender a norma, aplicará também uma corrente máxima.

Para uma melhor visualização dos resultados acima, a Figura 6.7 apresenta um gráfico em três eixos (corrente, tempo de frente e cauda) indicando os pontos de máximo.

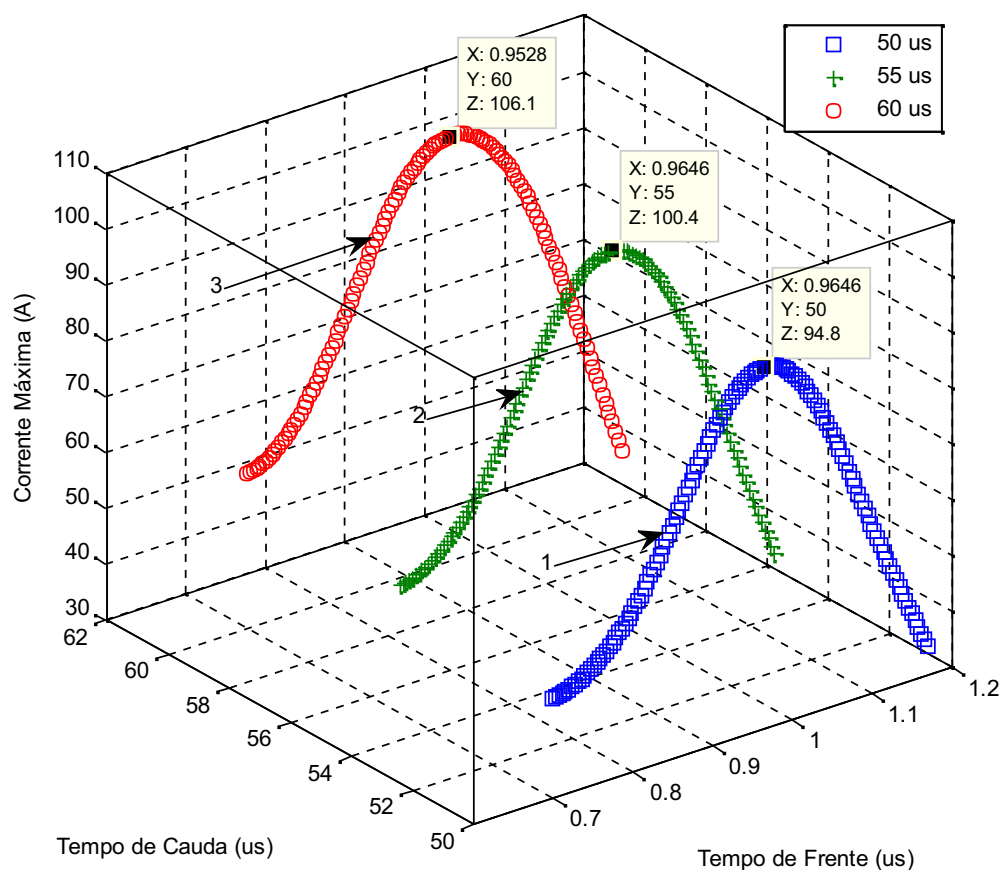


Figura 6.7 Gráfico em três eixos para 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e $60 \mu\text{s}$ (3).

A Figura 6.8 ilustra o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente, para valores diferentes de tempos de cauda e para o NBI = 95 kV .

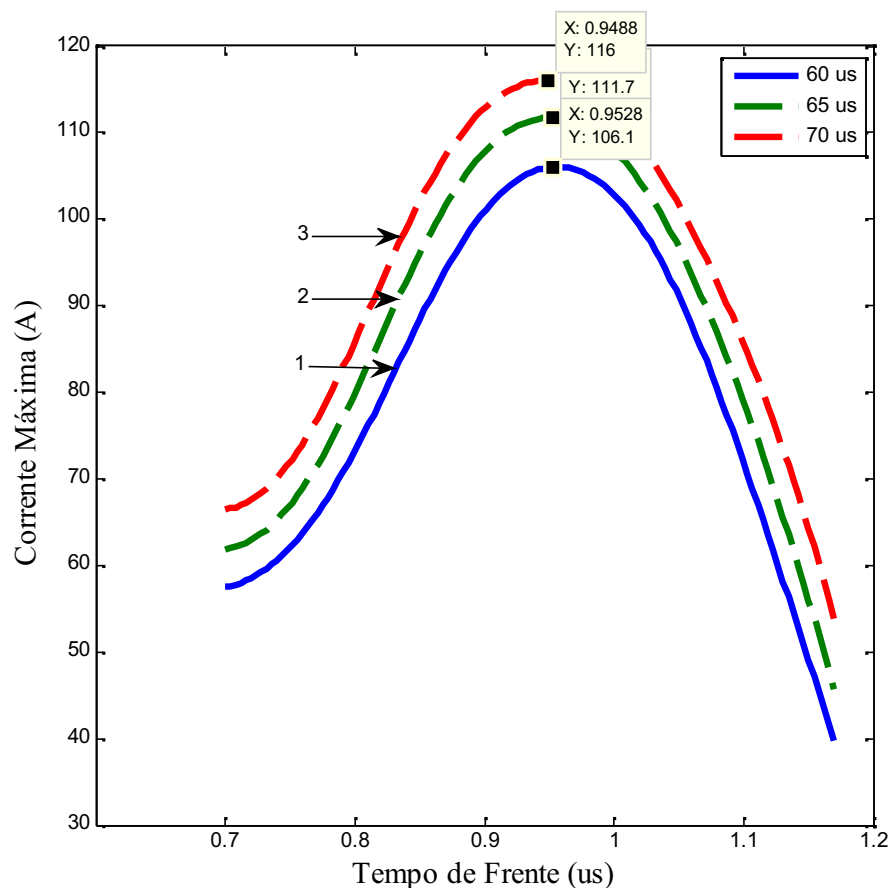


Figura 6.8. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Apresentam-se na Tabela 6.6 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.8 pelos pontos demarcados, com seus respectivos T_f e T_c .

Tabela 6.6. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	0,9528	60	106,00
2	0,9528	65	111,00
3	0,9488	70	116,00

Observando a Figura 6.8 têm-se um comportamento similar a Figura 6.7, apresentando pequenas diferenças nos tempos de frente no instante de máxima corrente para cada tempo de cauda, sendo assim, a corrente máxima ocorre no valor máximo de tempo de cauda aplicado. Todavia, a amplitude da maior corrente para a Figura 6.8 é maior que a menor amplitude da Figura 6.5, devido ao maior tempo de cauda aplicada 70 μ s.

As Figuras 6.9 e 6.10 foram simuladas para o NBI = 110 kV. A Figura 6.9 ilustra a intensidade de corrente em função do tempo de frente da onda, para diferentes tempos de cauda.

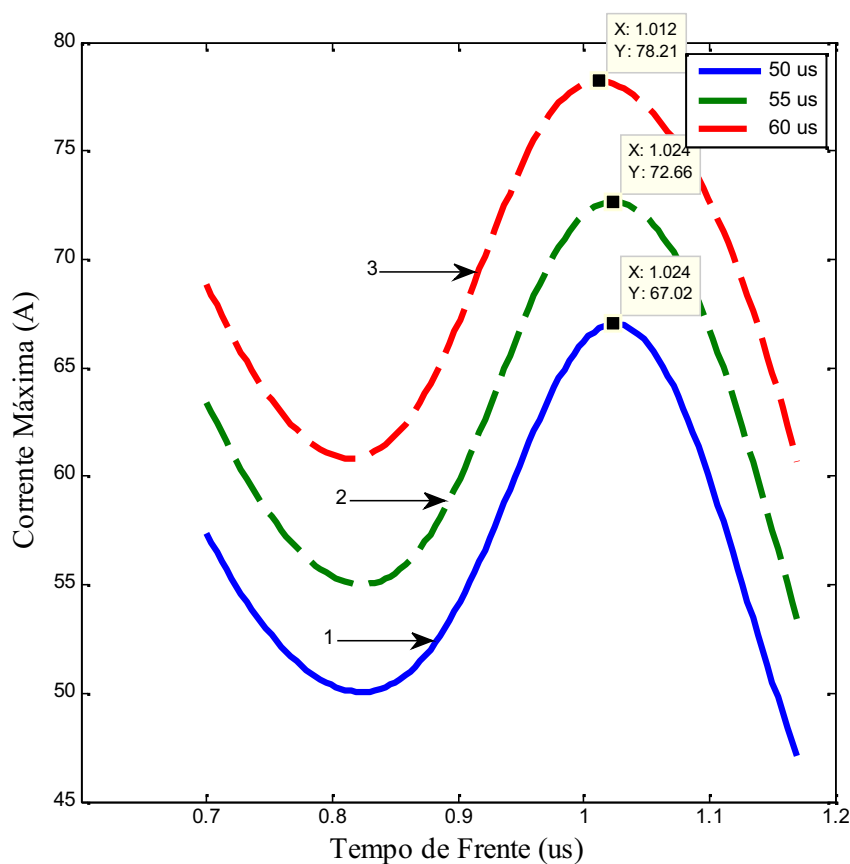


Figura 6.9. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Na Tabela 6.7 têm-se os valores de pico das curvas da Figura 6.7.

Tabela 6.7. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,024	50	67,02
2	1,024	55	72,66
3	1,012	60	78,21

Destaca-se mais uma vez a maior amplitude da corrente, para o maior tempo de cauda, entretanto, levando-se em consideração que seu valor de NBI aumentou em relação à mesma cauda na Figura 6.7, seria esperado um valor de corrente maior. Neste aspecto, verifica-se o comportamento não linear de transformadores frente à impulsos atmosféricos.

A Figura 6.10 apresenta-se a intensidade de corrente em função do tempo de frente da onda, para diferentes tempos de cauda.

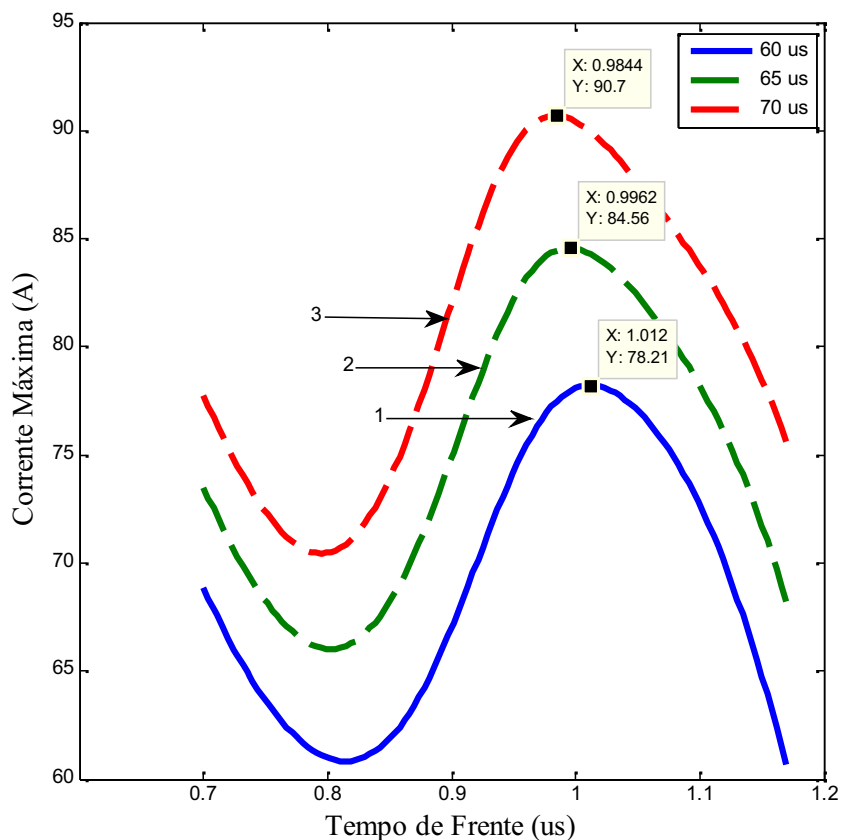


Figura 6.10. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Na Tabela 6.8 têm-se os valores de pico das curvas da Figura 6.8.

Tabela 6.8. Transformador de 25 kV com NBI 110 kV e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,012	60	78,21
2	0,9962	65	84,56
3	0,9844	70	90,70

Assim como na Figura 6.9, a Figura 6.10 apresenta as mesmas características, diferindo apenas na amplitude da corrente devido ao tempo de cauda maior. Contudo, a um comportamento oscilatório é evidenciado em ambas as formas de onda, quando levado em conta toda a variação do tempo de frente. Este comportamento remete à dependência da frequência dos fenômenos de alta tensão, o qual está evidenciado nestes casos.

6.3 Corrente Máxima em Função do Tempo de Cauda para a RNA1

Da mesma forma que a análise anterior, os resultados aqui foram simulados para NBI de 95 kV e 110 kV, para os transformadores de 45 kVA e 25 kVA.

6.3.1 Resultados para o Transformador de 45 kVA

Da mesma forma que no tópico anterior, será demonstrado que o tempo de cauda é influenciado pelo tempo de frente, e para isso, serão feitos dois tipos de análise, uma para o NBI = 95 kV, e outra, para o NBI = 110 kV. As Figuras 6.11 e 6.12 foram simuladas para o NBI = 95 kV.

A Figura 6.11 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

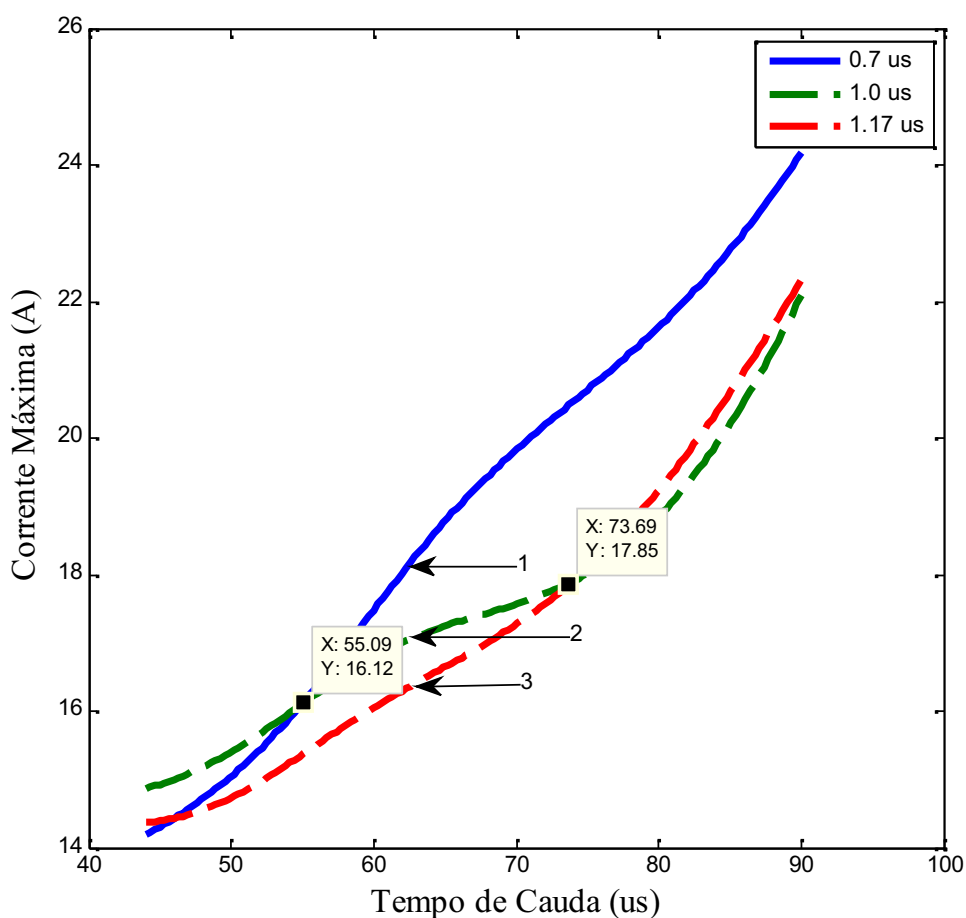


Figura 6.11. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).

Analisando a Figura 6.11, pode se perceber que para qualquer tempo de frente fixado, a corrente aumenta conforme aumenta-se o tempo de cauda. Apesar disso, à influência do tempo de frente é percebida nos pontos demarcados na Figura 6.11. No primeiro, da esquerda para a direita, tem-se um cruzamento da curva 2 com a 1 ($T_f = 0,7$ e $1 \mu\text{s}$), sendo que a partir daí a corrente para a curva 1 cresce mais rapidamente que a da curva 2 ($T_c = 55,09 \mu\text{s}$). No segundo ponto, tem se um cruzamento da curva 2 para 3 ($T_f = 1$ e $1,17 \mu\text{s}$), sendo que a partir deste ponto, a curva 3 cresce mais rapidamente que a 2 ($T_c = 73,69 \mu\text{s}$). Considerando a forma de onda normalizada, através da Figura 6.11, pode-se escolher a curva 1 para um tempo de cauda de $60 \mu\text{s}$ ($T_f = 1,17 \mu\text{s}$), para obter um valor máximo de corrente.

A Figura 6.12 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

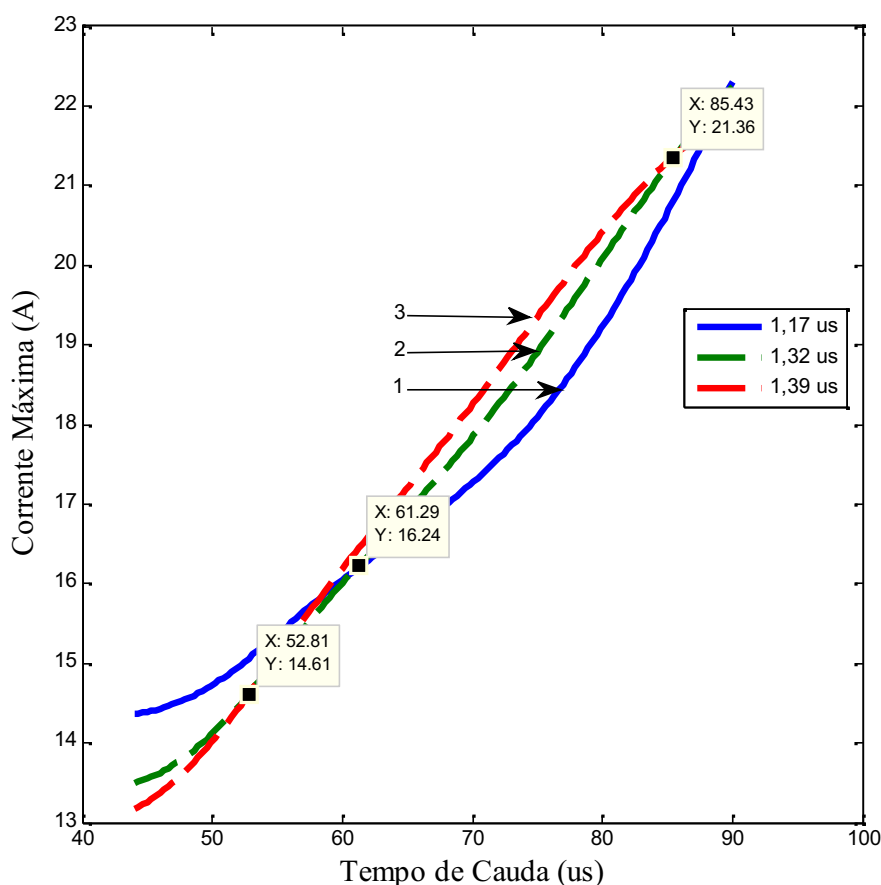


Figura 6.12. Transformador de 45 kVA com NBI 95 kV e T_f de 1,17 (1), 1,32 (2) e 1,39 μs (3).

Através da Figura 6.12, destaca-se o mesmo comportamento que a figura anterior (quanto maior o tempo de cauda maior a corrente). Algumas características interessantes que podem ser destacadas para os tempos de frente 1,17, 1,32 e 1,39 μs são:

- A partir do $T_c = 52,81 \mu\text{s}$ a curva 3 cresce mais rapidamente que a 2
- A partir do $T_c = 61,29 \mu\text{s}$ a curva 2 cresce mais rapidamente que a 1, permanecendo a curva 3 com amplitudes maiores que estas.
- A partir do $T_c = 85,43 \mu\text{s}$ ocorre novamente um cruzamento da curva 2 com a 3, tendendo a um maior crescimento para a curva 2 do que para a 3.

Com base na figura acima, pode se encontrar valores de corrente de amplitudes maiores do que a proposta na análise anterior ($T_c=60 \mu\text{s}$), entretanto, será necessária a aplicação de valores maiores de cauda, o que não atenderia a forma de onda normalizada.

As Figuras 6.13 e 6.14 foram simuladas para o NBI = 110 kV. A Figura 6.13 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

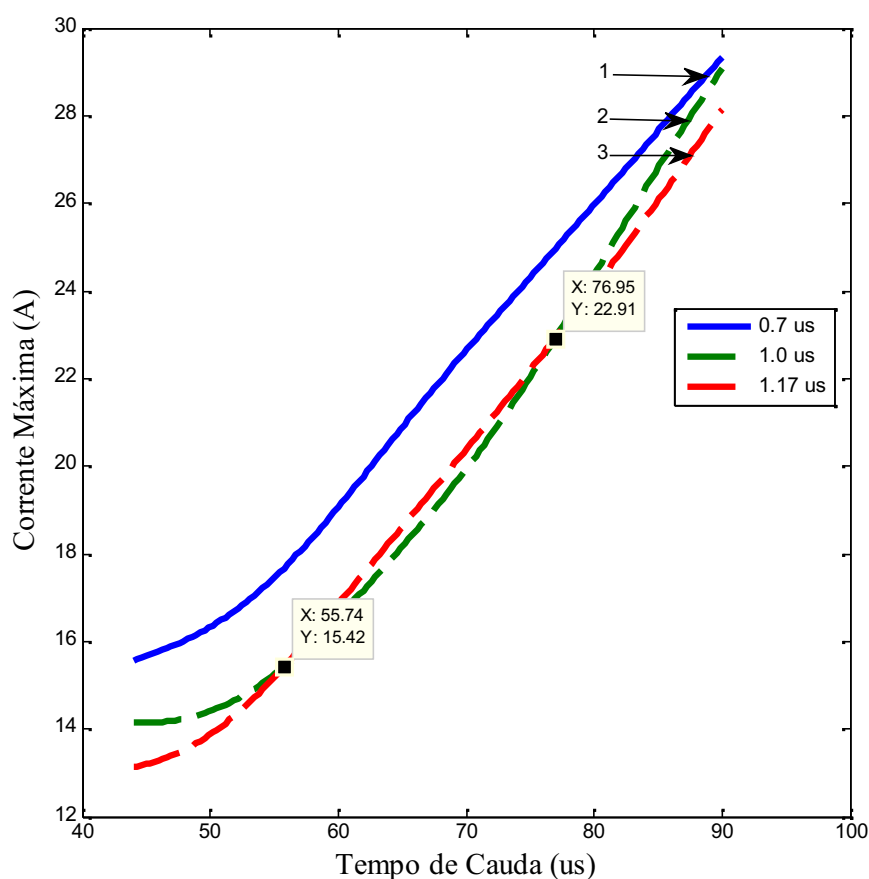


Figura 6.13. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μs (3).

Na Figura 6.13, nota-se que a corrente pode chegar à valores maiores que na aplicação da NBI 95 kV, porém, para tempo de frente menores (0,7 μs) percebe-se que a corrente se mantém acima das outras curvas, durante toda a faixa para os tempos de cauda.

Os pontos demarcados apresentam a mudança da inclinação da curva 3 para a curva 2, no instante em que a curva 3 passa a ter valores de corrente maiores que a curva 2 e depois ocorre a inversão novamente.

A Figura 6.14 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

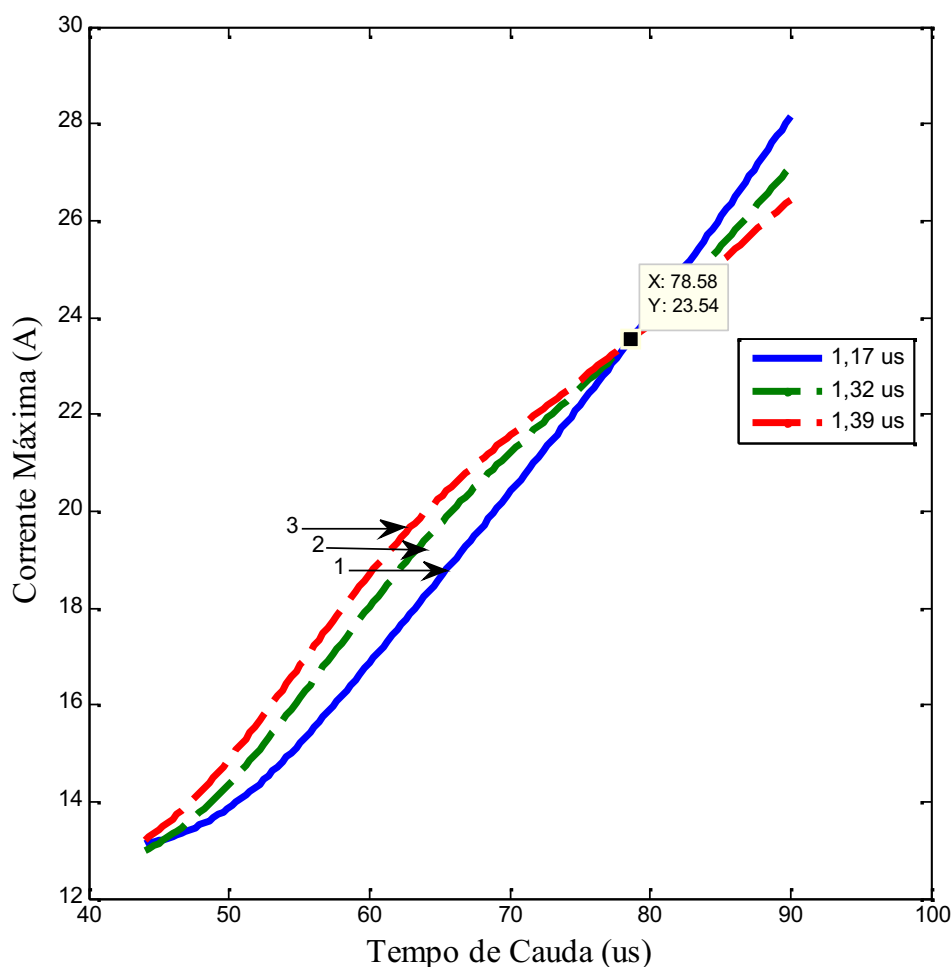


Figura 6.14. Transformador de 45 kVA com NBI 110 kV e T_f de 1,17 (1), 1,32 (2) e 1,39 μ s (3).

Na Figura 6.14, há um ponto aonde às três curvas se cruzam ($T_c=78,58 \mu$ s). A partir deste ponto a curva com o menor tempo de frente (curva 1) ultrapassa as demais devido às curvas 2 e 3 possuírem uma maior inclinação um pouco antes deste ponto. Para um NBI de 110 kV, as curvas da Figura 6.14 tiveram uma resposta diferente das curvas da Figuras 6.12 (NBI = 95 kV), visto que há uma inversão no comportamento destas curvas, inicialmente. As curvas com os menores tempos de frente possuem valores de correntes menores na Figura 6.14, enquanto na Figura 6.12 têm-se tempos de frente maiores para correntes menores.

6.3.2 Resultados para o Transformador de 25 kVA

As Figuras 6.15 e 6.16 foram simuladas para o NBI = 95 kV. A Figura 6.15 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

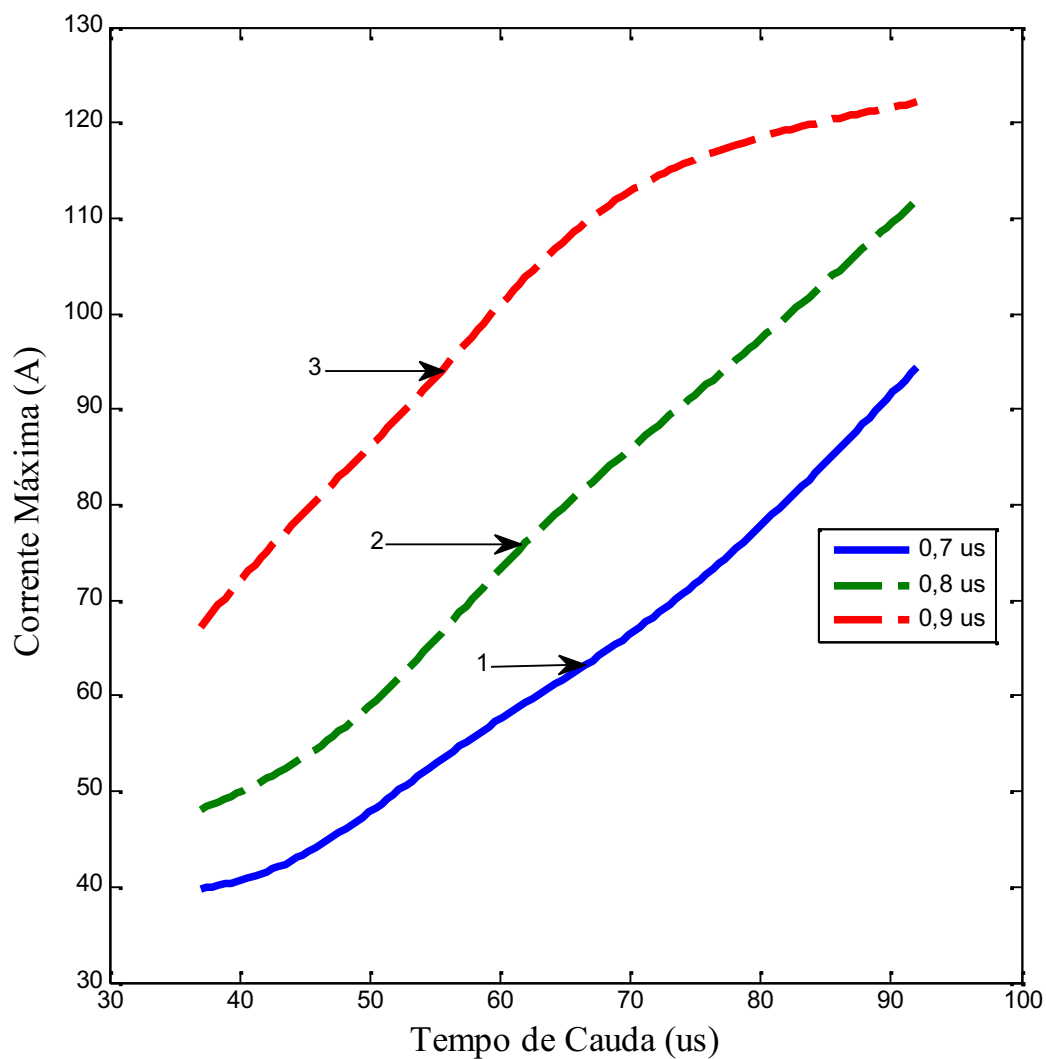


Figura 6.15. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3).

Analisando a Figura 6.15, tem-se que a corrente aumenta conforme se aumenta o tempo de cauda, e para tempo de frentes maiores (curva 3), a amplitude da corrente é maior em relação a tempos menores.

A Figura 6.16 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

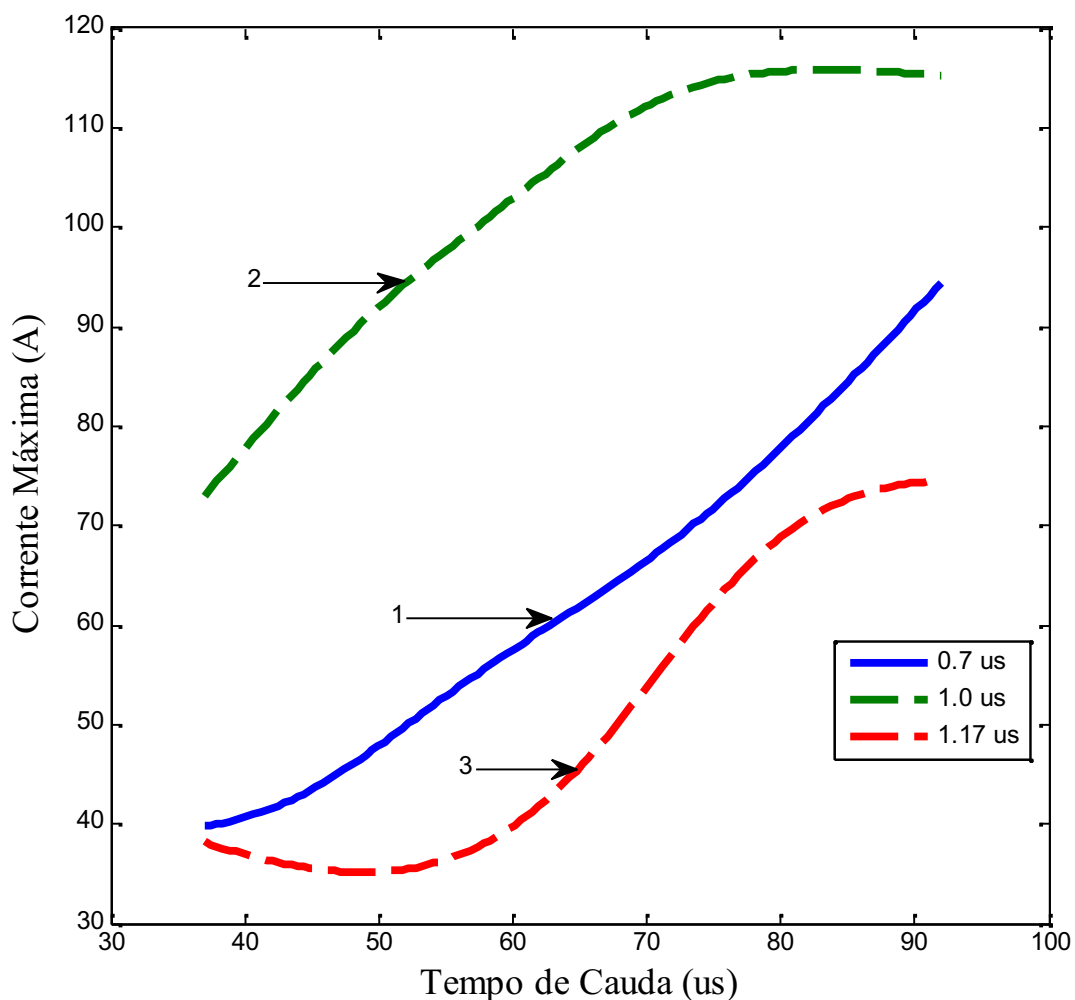


Figura 6.16. Transformador de 25 kVA com NBI 95 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).

Na Figura 6.16, nota-se um comportamento distinto em relação a tempos de frentes mais elevados (curva 3). Observa-se que acima de 1,0 μ s, para um transformador de 25 kVA, a corrente demonstra-se não linear frente aos demais tempos de frente. Dessa forma, um aumento no tempo de cauda não implica necessariamente em um aumento da corrente. Esse comportamento pode ser notado para o tempo de frente de 0,9 μ s (Figura 6.15) a partir de 70 μ s e também para o tempo de frente 1,0 μ s (Figura 6.16).

As Figuras 6.17 e 6.18 foram simuladas para o NBI = 110 kV. A Figura 6.17 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

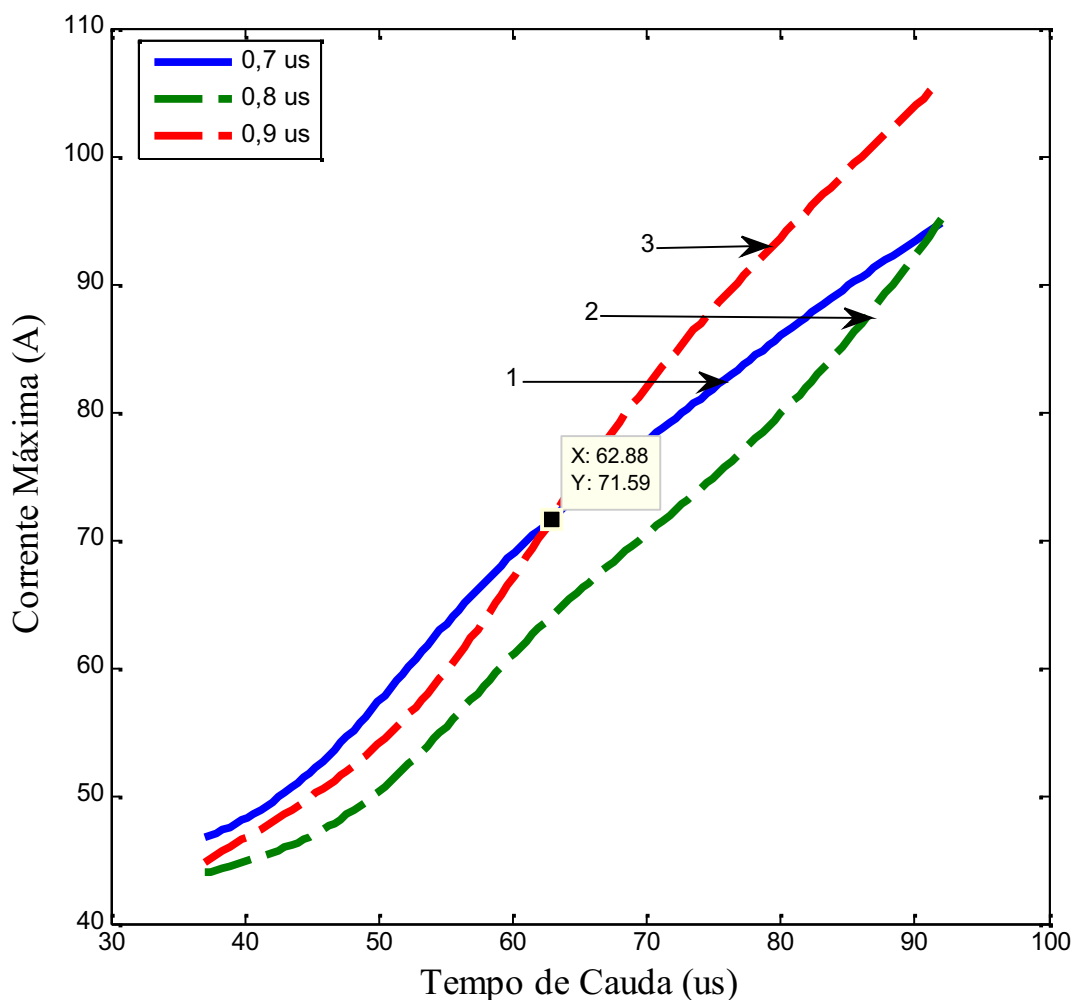


Figura 6.17. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3)

Através da Figura 6.17 pode ser notado o comportamento não linear frente à aplicação de uma maior tensão NBI de 110 kV, pois, para tempos de cauda menores, a corrente não é maior a cada aumento no tempo de frente. Neste caso, o tempo de frente de 0,7 μ s apresenta uma corrente maior que os demais, para tempos menores de cauda, entretanto, após um tempo de cauda de 62,88 μ s ocorre uma inversão e o tempo de frente de 0,9 μ s passa a ter uma corrente menor.

Salienta-se também que o valor intermediário de frente (0,8 μ s) se mantém em toda a variação do tempo de cauda com uma corrente menor que o tempo de frente de 0,7 e 0,9 μ s.

A Figura 6.18 apresenta curvas de corrente máxima em função do tempo de cauda para três tempos de frente distintos.

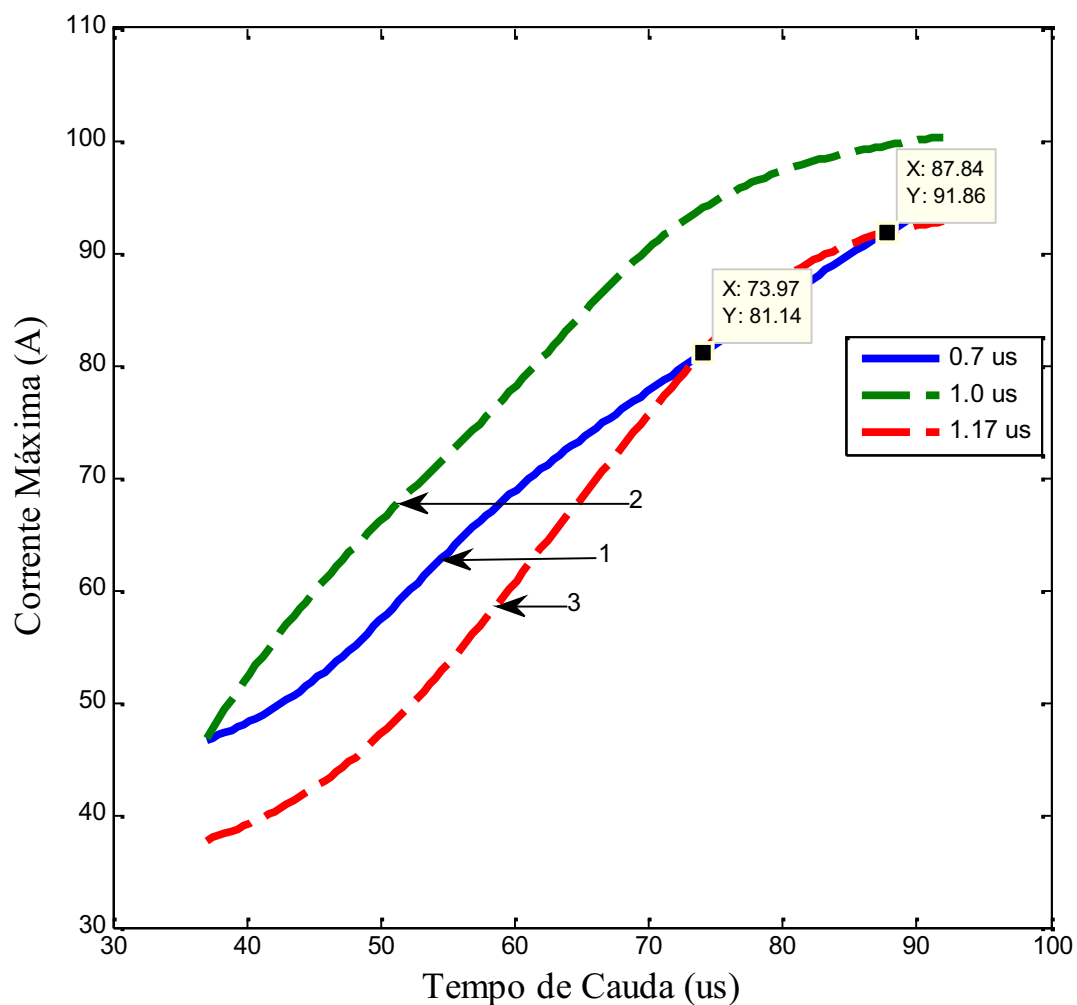


Figura 6.18. Transformador de 25 kVA com NBI 110 kV e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μs (3).

Observando a Figura 6.18, tem-se um destaque para o tempo de frente 1,0 μs , o qual se sobrepõe aos demais em termos de valores da corrente. Para o valor de frente de 1,17 μs a corrente é menor até a faixa de valores de cauda entre 73,97 a 87,84 μs , sendo que nesta região a corrente é maior do que para tempos de frente de 0,7 μs .

6.4 Corrente Máxima em Função do Tempo de Frente para a RNA2

Para demonstrar a influencia do tempo de frente, do tempo de cauda e da taxa de crescimento da tensão ($\Delta V/\Delta t$) em relação à corrente que circula no enrolamento durante o ensaio de impulso, serão feitos dois tipos de análise na seqüência. Uma análise considerando um $\Delta V/\Delta t = 95 \text{ kV}/\mu\text{s}$, e a outra um $\Delta V/\Delta t = 110 \text{ kV}/\mu\text{s}$ para ambos os transformadores avaliados anteriormente. Esta análise tem como objetivo substituir o valor de crista pela taxa de crescimento da tensão, para aprimorar a análise de ensaios de impulso. Os valores acima foram escolhidos para permitir uma comparação das análises anteriores.

6.4.1 Resultados para o Transformador de 45 kVA

A Figura 6.19 ilustra o comportamento da corrente máxima em função do tempo de frente de onda ($I_{\text{máx}} \times T_f$), para diferentes tempos de cauda e para $\Delta V/\Delta t = 95 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

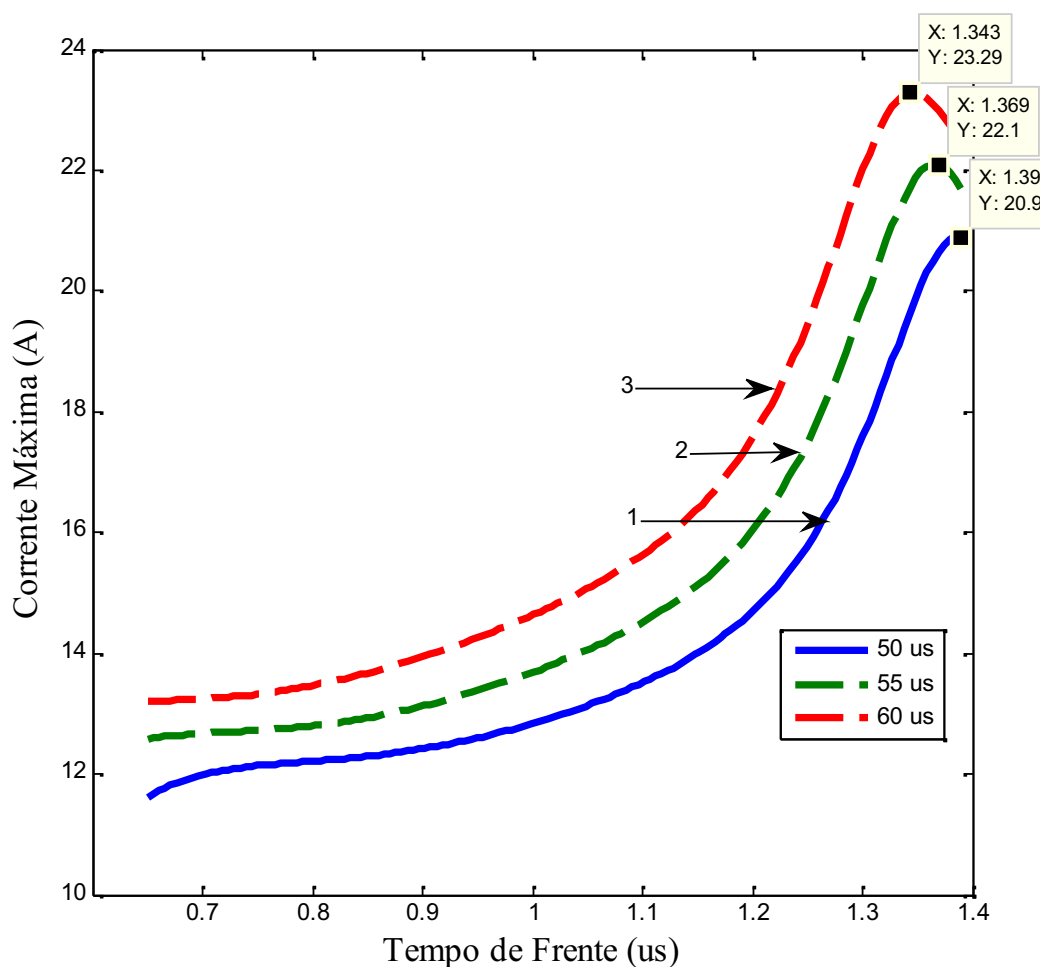


Figura 6.19. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de $95 \text{ kV}/\mu\text{s}$ e T_c de 50 (1), 55 (2) e $60 \mu\text{s}$ (3).

Apresentam-se na Tabela 6.9 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.19 pelos pontos demarcados, com seus respectivos T_f e T_c .

Tabela 6.9. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,343	50	20,90
2	1,369	55	22,10
3	1,390	60	23,29

Através da Figura 6.19 percebe-se um comportamento não linear para as três condições de T_c , tendo um valor máximo de pico de corrente para T_f próximo do máximo, além disso, a para cada aumento no valor de T_c há um aumento no valor da corrente. Cabe salientar aqui que apesar do caráter não linear das curvas da Figura 6.19 e Figura 6.1 (condições similares), fica evidente a diferença da substituição do valor de crista pela taxa de crescimento da tensão na rede. Isto fica claramente evidenciado pelos pontos de máximo de pico de corrente, distintos.

A Figura 6.20 ilustra $I_{m\acute{a}x}$ x T_f para diferentes tempos de cauda e $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s.

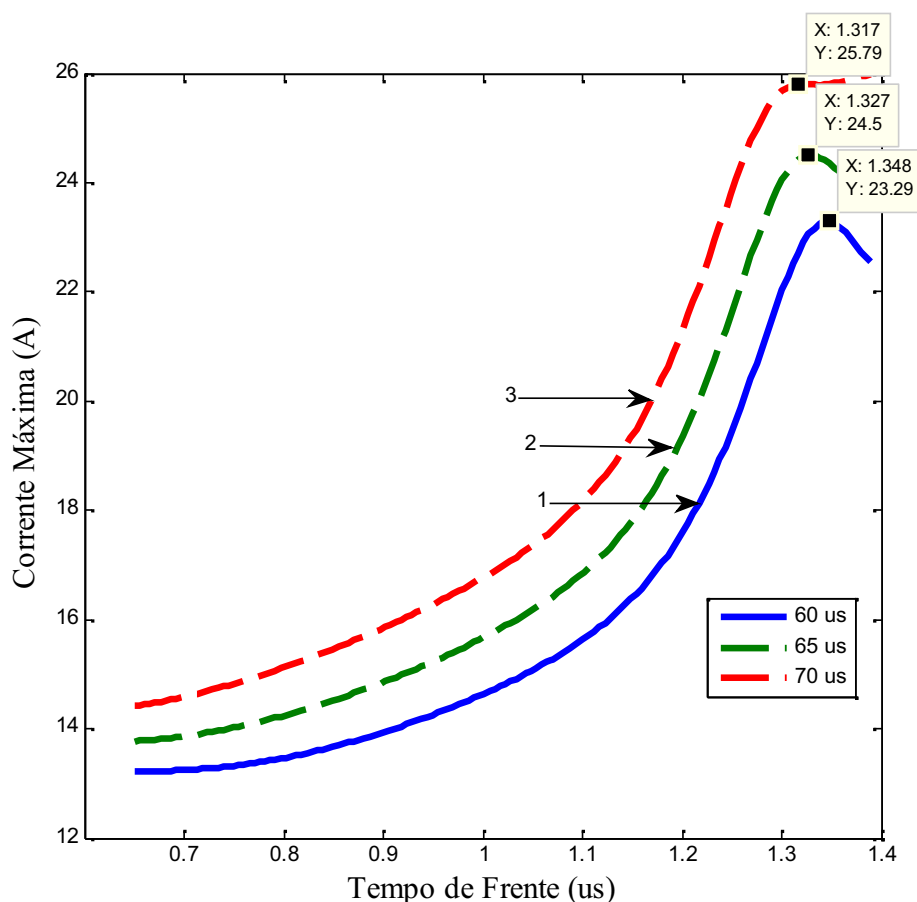


Figura 6.20. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Apresentam-se na Tabela 6.10 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.20 pelos pontos demarcados, com seus respectivos T_f e T_c .

Tabela 6.10. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,348	60	23,29
2	1,327	65	24,50
3	1,317	70	25,79

A Figura 6.20 quando comparada com a Figura 6.3, demonstra que os pontos de máximo do pico de corrente permanecem divergentes, pois, enquanto na Figura 6.20 eles tendem a surgir para T_f máximos, na Figura 6.3 tendem a T_f mínimos. Outro aspecto que a análise para taxa de crescimento de tensão apresenta em relação à anterior, diz respeito ao valor de pico alcançado da corrente máxima, sendo que no caso desta última análise, as correntes possuem valores de pico maiores do que a anterior.

A Figura 6.21 ilustra $I_{m\acute{a}x} \times T_f$ para diferentes tempos de cauda e $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s.

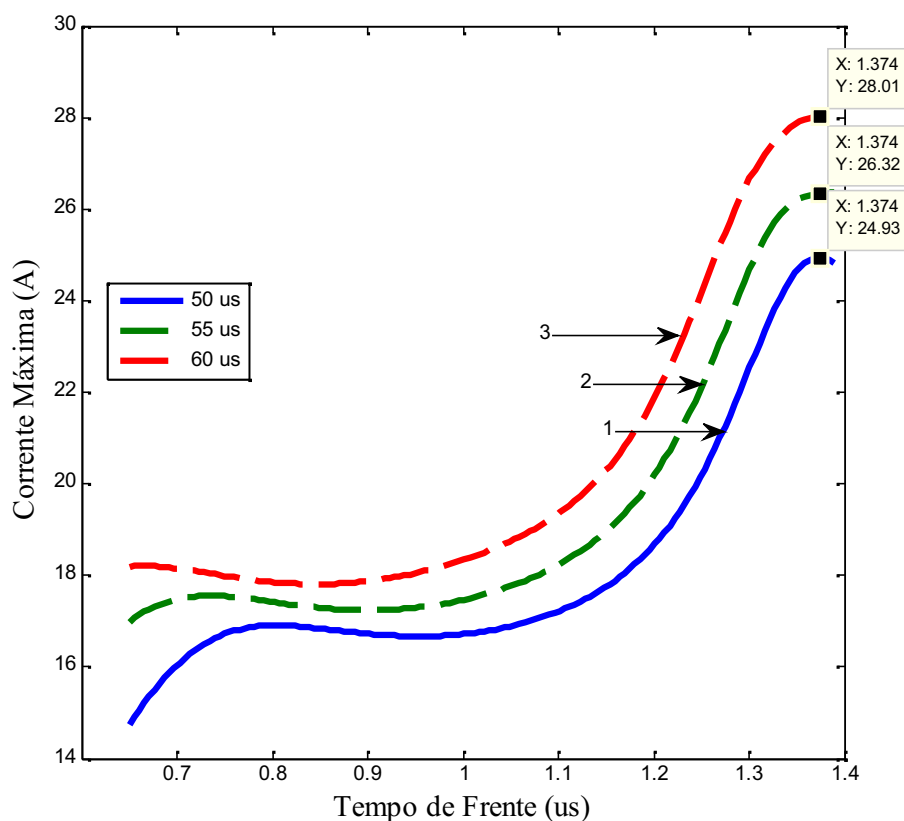


Figura 6.21. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Apresentam-se na Tabela 6.11 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.21 pelos pontos demarcados, com seus respectivos T_f e T_c .

Tabela 6.11. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,374	50	24,93
2	1,374	55	26,32
3	1,374	60	28,01

Analisando os resultados da Figura 6.21 nota-se uma resposta da corrente muito mais complexa do que para a Figura 6.19, principalmente, para valores tempo de frente máximos e mínimos. Neste caso, tem-se a variação da taxa de crescimento em 110 kV/ μ s, sendo que para esta taxa de crescimento da tensão, percebe-se um pequeno comportamento oscilatório que pode estar relacionado aos fenômenos de alta frequência provocados pela alta tensão.

A Figura 6.22 ilustra $I_{m\acute{a}x} \times T_f$ para diferentes tempos de cauda e $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s.

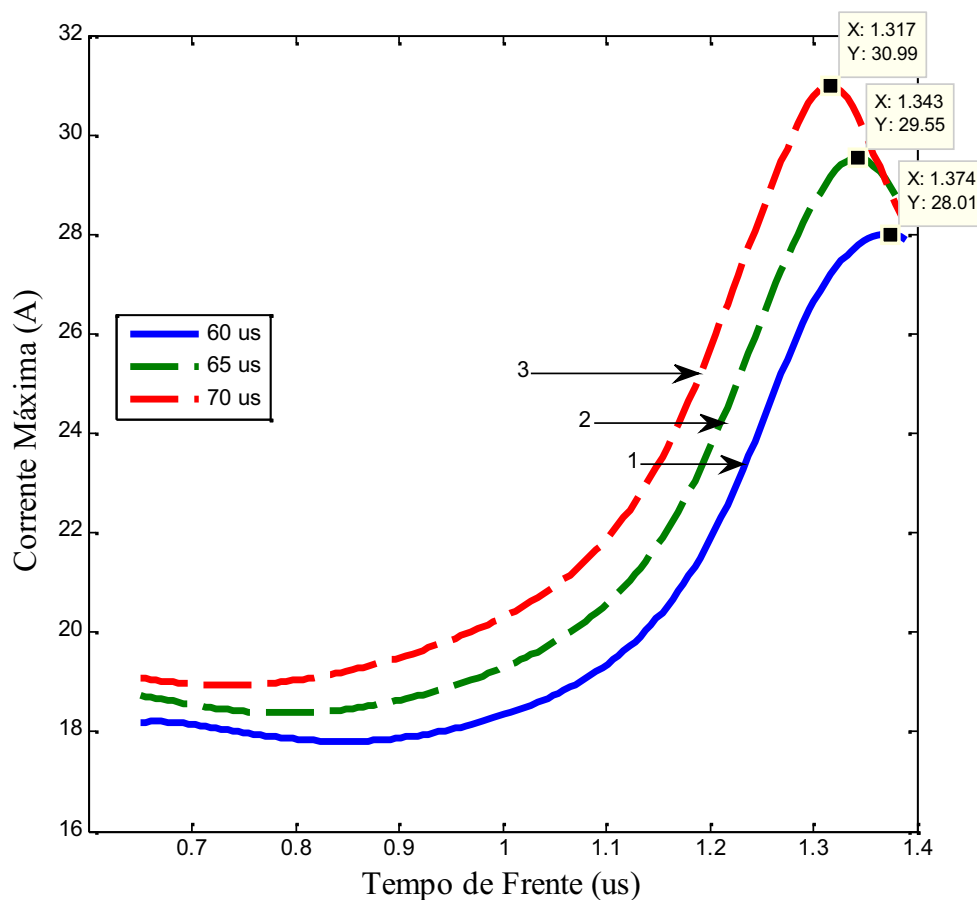


Figura 6.22. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Apresentam-se na Tabela 6.12 os valores de pico de corrente máxima ilustrados nas curvas da Figura 6.22 pelos pontos demarcados, com seus respectivos T_f e T_c .

Tabela 6.12. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Curva	T_f (μ s)	T_c (μ s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	1,374	60	28,01
2	1,343	65	29,55
3	1,317	70	30,99

Observando a Figura 6.22, percebe-se que esta se assemelha as curvas para uma $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s, diferenciado-se apenas nos valores de pico de corrente máxima, visto que tem-se aplicação de um $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s, além de tempos de cauda maiores. Outro aspecto observado é a taxa de crescimento, a qual forneceu valores de pico da corrente máxima. Enquanto na Figura 6.5, simulada para as mesmas condições, exceto que a rede criada para esta simulação considera o valor de crista da tensão e não a taxa de crescimento da tensão, os valores de corrente em toda faixa de valores de tempo frente não apresentou valores de pico da corrente máxima.

Apesar disto, ambos os casos pode auxiliar na escolha de um tempo de frente e de cauda que poderão produzir uma amplitude máxima de corrente, que estejam dentro da tolerância da norma.

6.4.2 Resultados para o Transformador de 25 kVA

A Figura 6.23 apresenta a corrente máxima em função do tempo de frente de onda ($I_{m\acute{a}x}$ x T_f), para diferentes tempos de cauda e para $\Delta V/\Delta t = 95$ kV/ μ s. Através desta, observa-se que a corrente também apresenta não linearidade, principalmente, no início do faixa de valores de tempo de frente e a partir de 0,9 μ s, além disso, a corrente máximo demonstra um tendência sempre crescente dentro da faixa simulada, diferente da Figura 6.6, a qual possui um perfil parabólico (possui pontos de máximos).

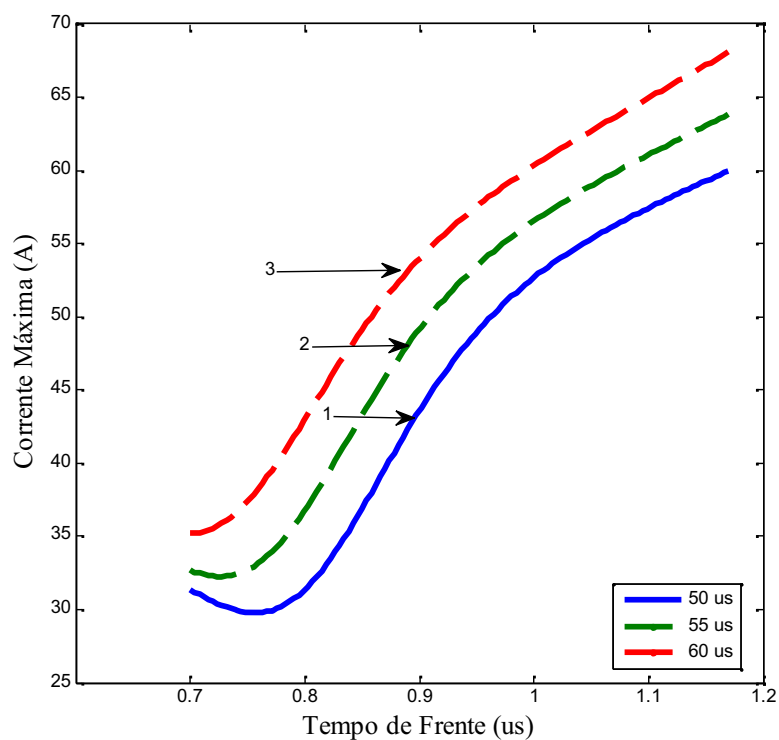


Figura 6.23. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 50 (1), 55 (2) e 60 μ s (3).

A Figura 6.24 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_f$ para diferentes tempos de cauda e $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s.

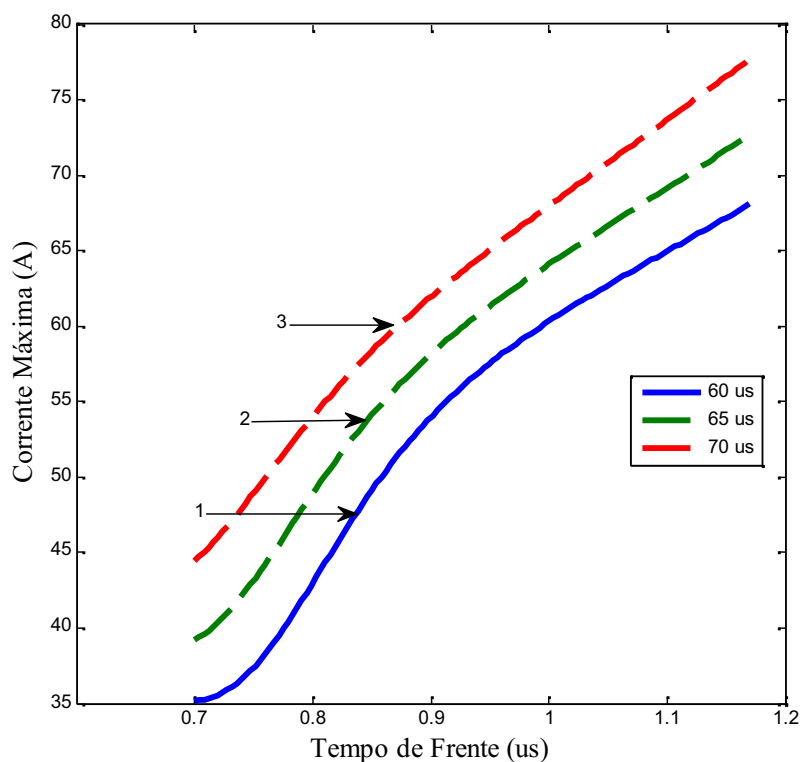


Figura 6.24. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

Avaliando o comportamento da Figura 6.24, nota-se o crescimento da corrente em relação à Figura 6.23, visto que aumentou-se o tempo de cauda, porém, olhando a Figura 6.8 a corrente considerando o valor de crista e não a taxa de crescimento, teve uma característica inversa. Observando os resultados para a segunda rede no caso do transformador de 45 kVA, a corrente apresenta valores maiores do que para a primeira rede, contudo, o transformador de 25 kVA demonstrou valores menores de corrente na segunda rede do que para a primeira. Pode-se inferir que a influência da taxa de crescimento da tensão não possui um comportamento linear em função da constatação acima, mas, um comportamento complexo, o qual está mais relacionado ao transformador em si, do que para variáveis controladas do ensaio de impulso.

A Figura 6.25 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_f$ para diferentes tempos de cauda e $\Delta V/\Delta t = 110 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

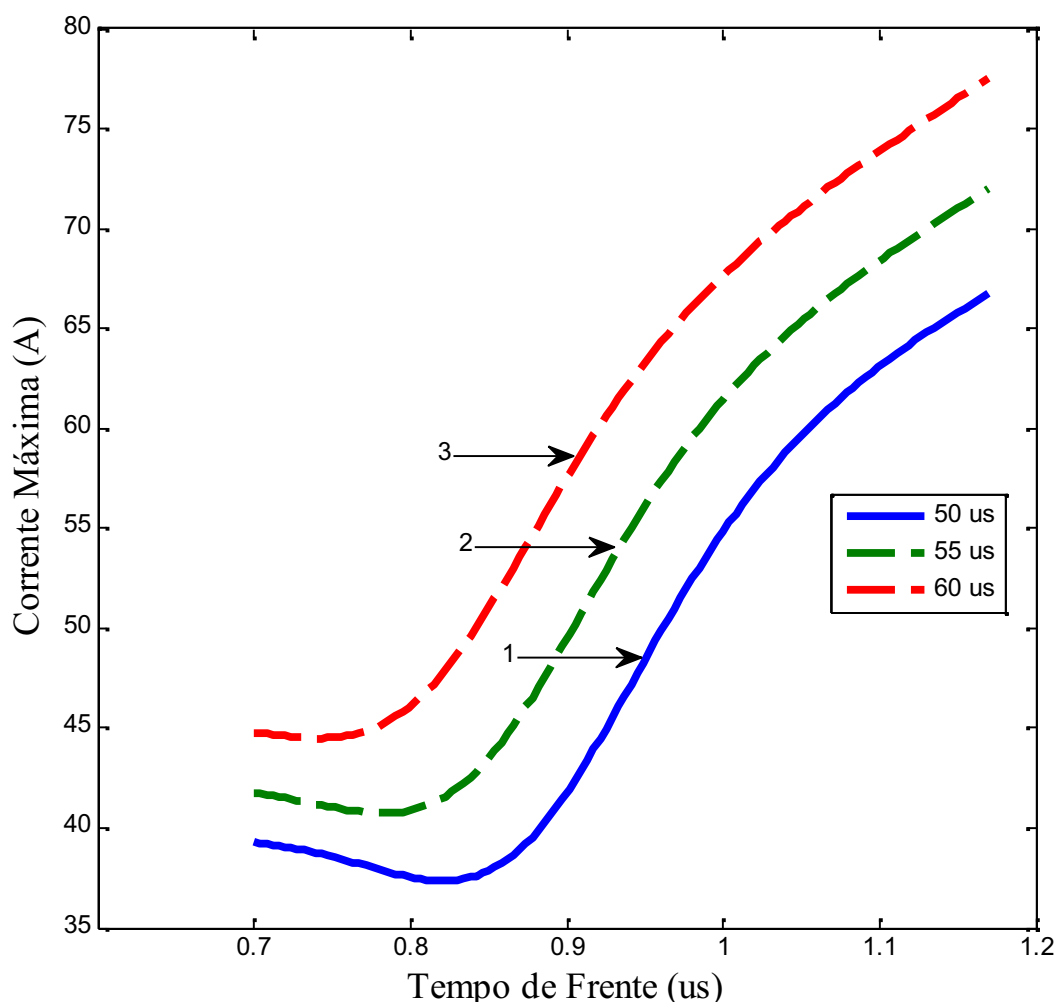


Figura 6.25. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de $110 \text{ kV}/\mu\text{s}$ e T_c de 50 (1), 55 (2) e $60 \mu\text{s}$ (3).

A Figura 6.26 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_f$ para diferentes tempos de cauda e $\Delta V/\Delta t = 110 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

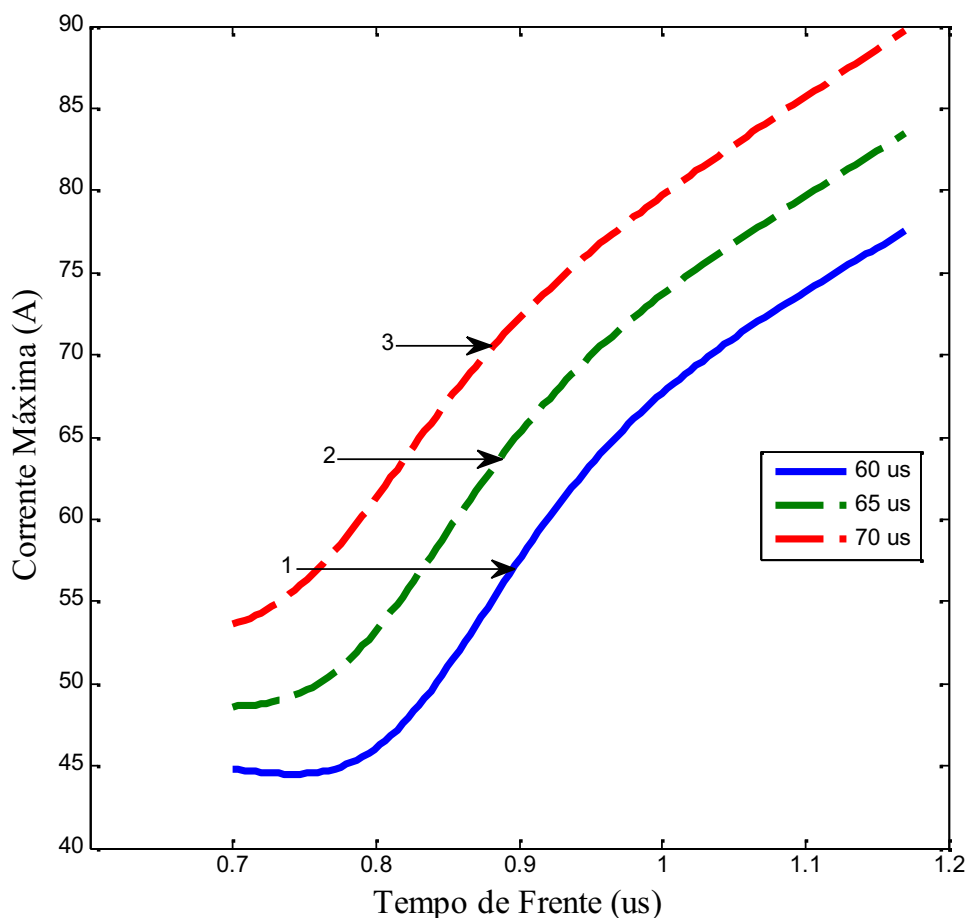


Figura 6.26. Transformador de 25 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_c de 60 (1), 65 (2) e 70 μ s (3).

As Figuras 6.25 e 6.26, novamente, seguem o comportamento próximo ao das simulações anteriores para o transformador de 25 kVA (segunda rede com taxa de crescimento de 95 kV/ μ s). A diferença em relação à primeira rede para as mesmas condições é extremamente grande, lembrando que na situação da primeira simulação, o aumento dos tempos de cauda produziu um aumento na corrente e um aumento no valor de crista da tensão aplicada, produziu um comportamento oscilatório nas curvas. Neste caso (segunda rede), ocorreu apenas o aumento do valor da corrente máxima, tanto para o aumento do tempo de cauda, quanto para o aumento da taxa de crescimento da tensão aplicada às simulações. Baseando-se nestes resultados, pode-se dizer que a influência da taxa de crescimento na corrente para um transformador de 25 kVA segue um comportamento linear, pois, produz aumentos proporcionais, para diversas condições.

6.5 Corrente Máxima em Função do Tempo de Cauda para a RNA2

Da mesma forma que a análise anterior, os resultados aqui foram simulados para uma $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e de 110 kV/ μ s, para os transformadores de 45 kVA e 25 kVA.

6.5.1 Resultados para o Transformador de 45 kVA

A Figura 6.27 ilustra o comportamento da corrente máxima em função do tempo de cauda ($I_{m\acute{a}x} \times T_c$), para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 95$ kV/ μ s.

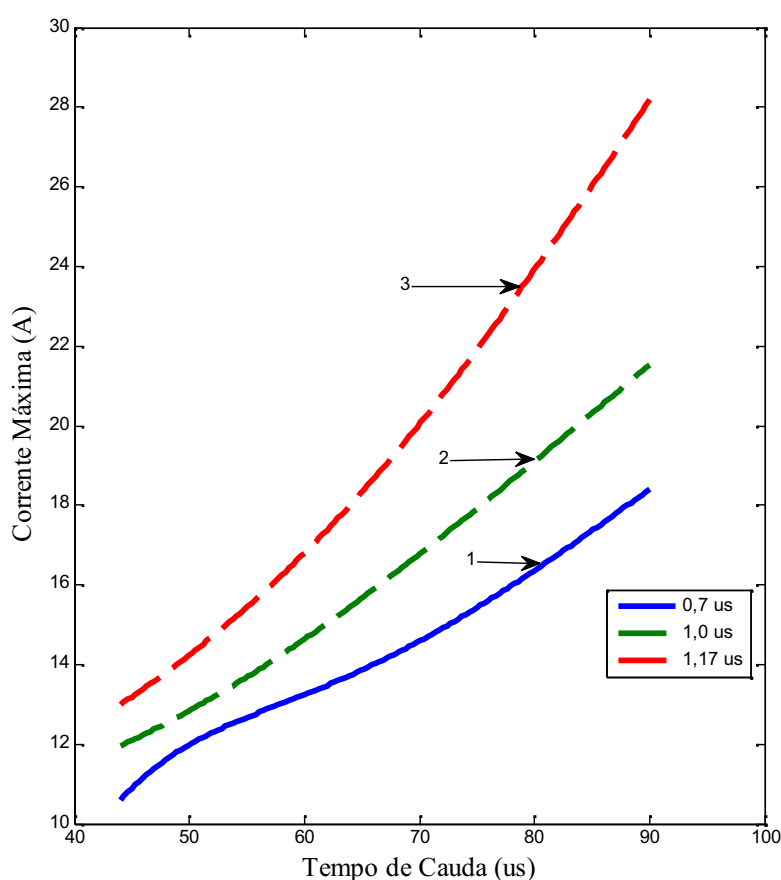


Figura 6.27. Transformador de 45 kVA - $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/us e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s(3).

Olhando para a Figura 6.27, constata-se um comportamento próximo ao linear, visto que a cada aumento no tempo de frente produz um aumento na corrente máxima. Nota-se também, uma diferença na inclinação das curvas, sendo que a curva com T_f de 1,17 μ s tem-se a maior inclinação. Outra constatação desta simulação é o aumento da corrente quando comparada com a Figura 6.11 (primeira rede).

A Figura 6.28 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_c$ para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 95$ kV/ μ s.

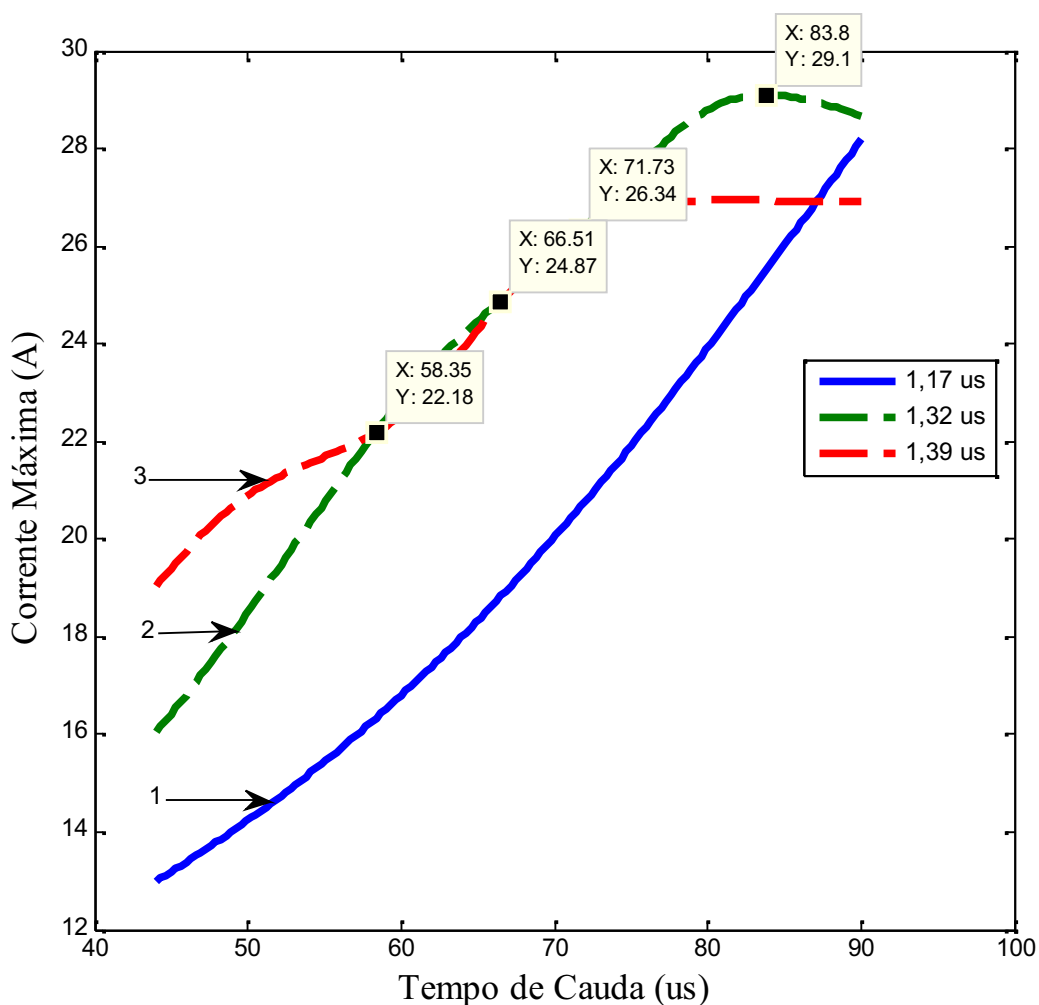


Figura 6.28. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_f de 1,17 (1), 1,32 (2) e 1,39 μ s(3).

Na figura acima a partir do tempo frente de 1,17 μ s as curvas seguintes apresentam uma resposta não linear da corrente frente ao aumento do tempo de cauda. Na curva 2 ($T_f = 1,32 \mu$ s) tem-se uma resposta próxima a linear até um valor aproximado de $T_c = 80 \mu$ s (ponto de mudança da curva), no qual chega-se a um valor de máximo de 29,1 A com $T_c = 83,8 \mu$ s. Na curva 3 ($T_f = 1,39 \mu$ s) este comportamento se repete para $T_c = 71,73 \mu$ s (corrente 26,34 A), sendo que a partir daí a corrente se mantém constante.

Além destes pontos, destaca-se o cruzamento entre a curva 2 e 3, na região aonde o tempo de cauda varia de 58,35 a 66,51 μ s e a corrente varia de 22,18 a 24,87 A. Nesta região a corrente da curva 3 passa a ser menor do que a curva 2, após isso, a corrente da curva 3 passa a ser maior até o ponto aonde $T_c = 71,73 \mu$ s. Quando comparada com a Figura 6.12, a Figura 6.28 apresenta-se bem diferente, entretanto, as regiões de inversões ocorrem nas duas figuras. Outro aspecto a destacar é a saturação da corrente apresentada para um $T_f = 1,39 \mu$ s.

A Figura 6.29 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_c$ para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 110 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

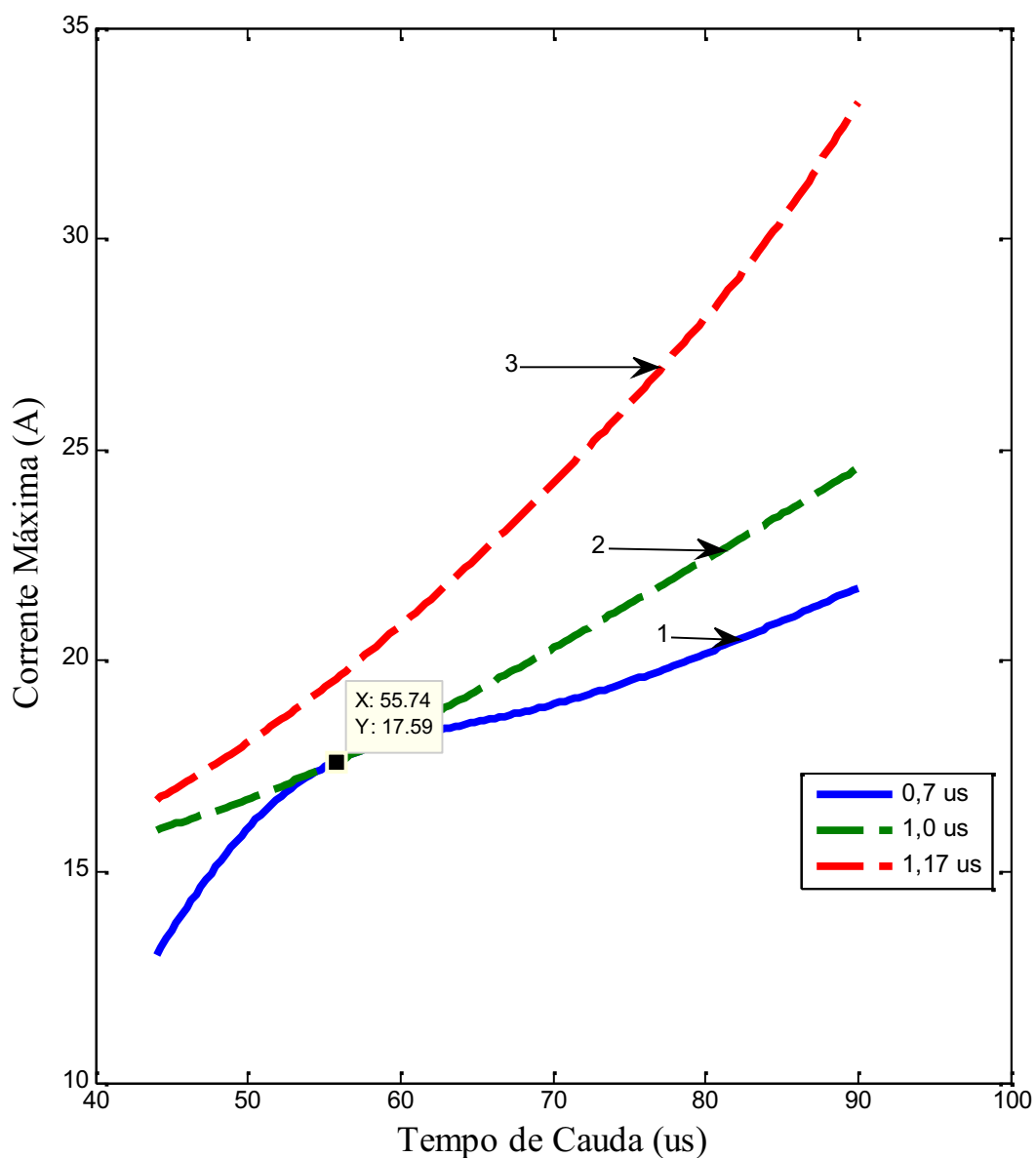


Figura 6.29. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μs e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μs (3).

Similar a Figura 6.27, a Figura 6.29 apresenta apenas uma pequena diferença no ponto destacado na figura (corrente = 17,59 A e $T_c = 55,74$), aonde há toque da curva 1 com a curva 2 e o aumento da corrente.

A Figura 6.30 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_c$ para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 110 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

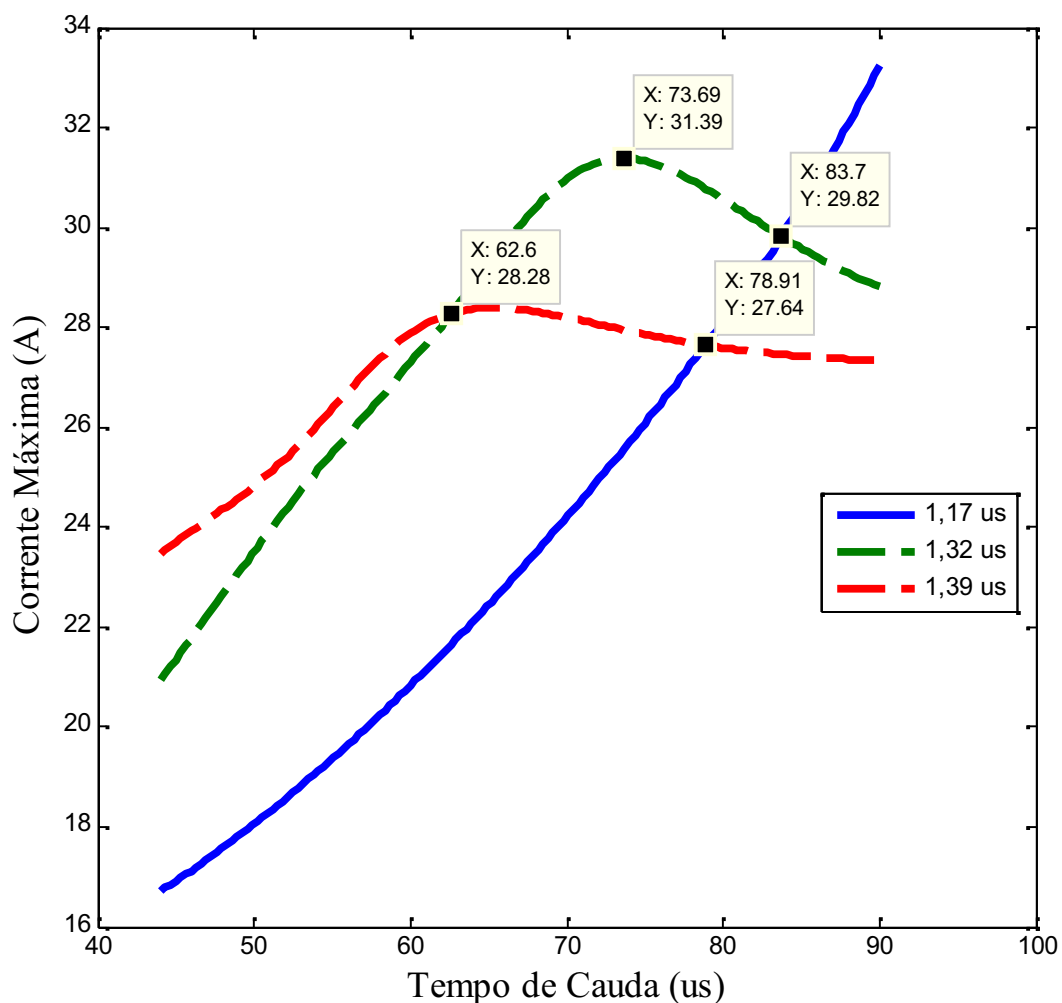


Figura 6.30. Transformador de 45 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_f de 1,17(1), 1,32(2) e 1,39 μ s(3).

Através da Figura 6.30 tem-se um comportamento similar ao da Figura 6.28 e bem diferenciado quando comparada com a Figura 6.14. Notam-se novamente as inversões nos pontos para $T_c = 62,92$ (curva 3) aonde a corrente chega a 28,3 A e para $T_c = 73,69 \mu$ s com um corrente máxima de 31,39 A (curva 2). Além disso, a partir dos pontos para de $T_c = 78,91 \mu$ s e 83,8 μ s, as curvas 3 e 2 respectivamente, são cruzadas pela curva 1, ou seja, a partir destes valores de T_c , apenas a curva 1 mantém o crescimento da corrente em função do tempo de cauda, contudo, a partir destes pontos o tempo de cauda é muito elevado quando relacionado com a tolerância da norma, não sendo aplicável.

6.5.2 Resultados para o Transformador de 25 kVA

A Figura 6.31 apresenta a corrente máxima em função do tempo de cauda ($I_{m\acute{a}x} \times T_c$), para diferentes tempos de frente e para $\Delta V/\Delta t = 95 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

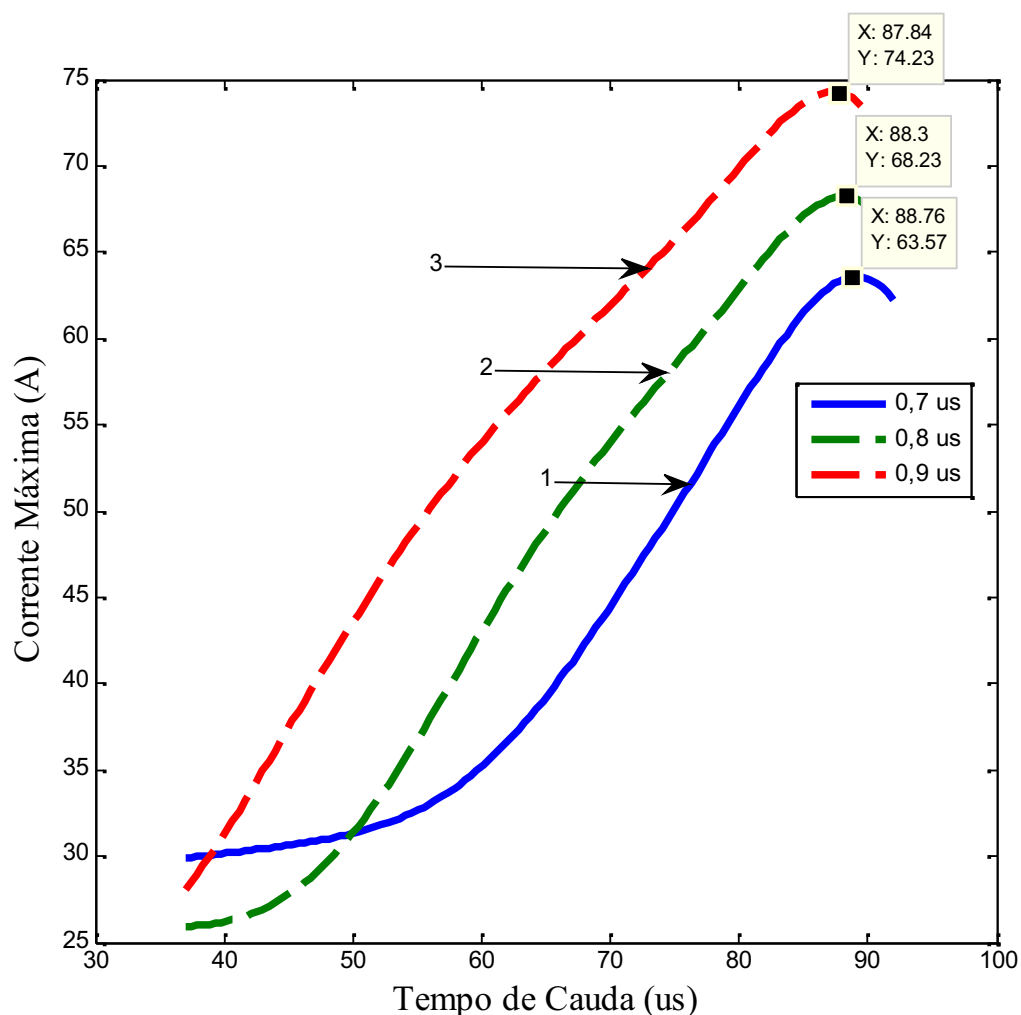


Figura 6.31. Transformador de 25 kVA- $\Delta V/\Delta t$ de $95 \text{ kV}/\mu\text{s}$ e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μs (3).

A Figura 6.31 apresenta pontos de máximo (picos de corrente máxima) para cada curva gerada em função de cada tempo de frente. Pode-se notar que entre 60 e 90 μs há uma região linear para todas as curvas e também que tempos de frente menores, para este transformador, produz uma pequena variação do valor de corrente para a região do tempo de cauda entre 40 e 60 μs . Em relação à Figura 6.15 (simulação semelhante para primeira rede), tem-se um comportamento similar até um tempo de cauda de 90 μs , pois, até este valor percebe-se que um aumento do tempo de cauda produz um aumento de corrente, porém, a corrente máxima alcançada na primeira rede é muito maior que a segunda.

A Figura 6.32 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_c$ para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 95 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

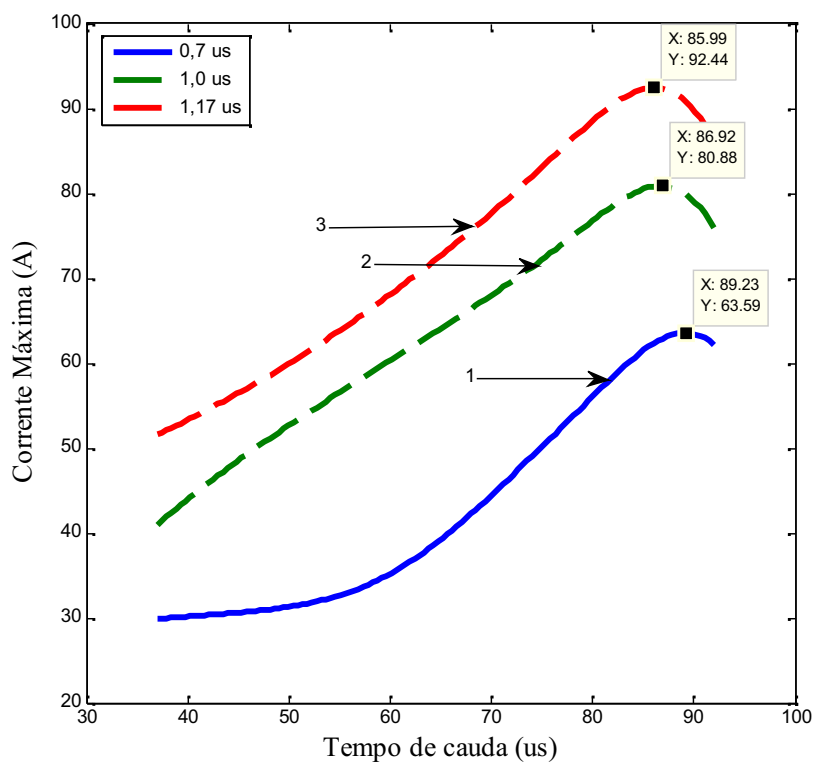


Figura 6.32. Transformador de 25 kVA $-\Delta V/\Delta t$ de 95 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μ s (3).

A Figura 6.33 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_c$ para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 110$ kV/ μ s.

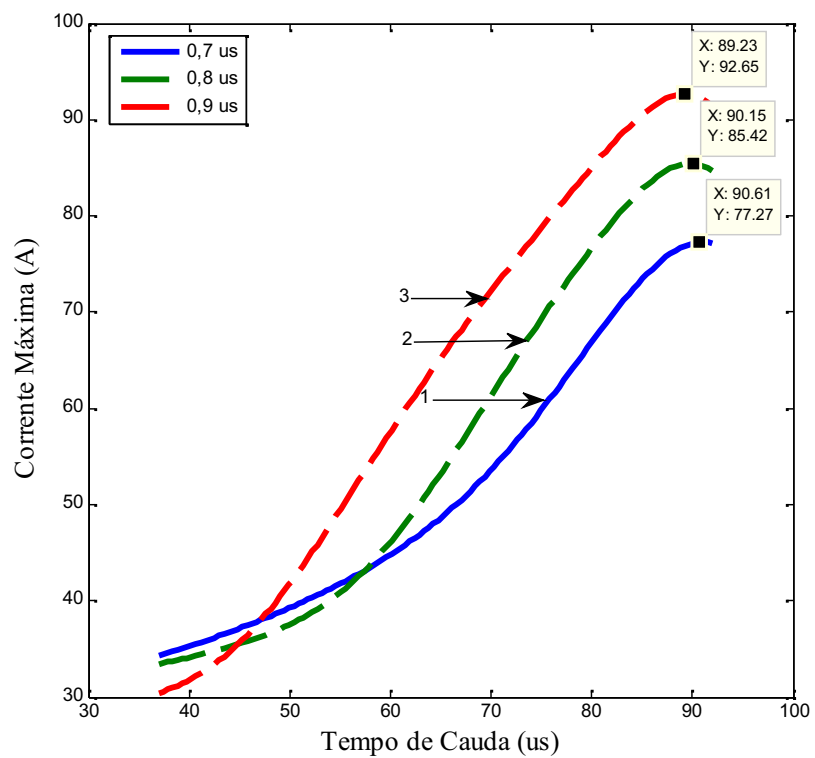


Figura 6.33. Transformador de 25 kVA $-\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μ s e T_f de 0,7 (1), 0,8 (2) e 0,9 μ s (3).

A Figura 6.34 demonstra $I_{m\acute{a}x} \times T_c$ para diferentes tempos de frente e $\Delta V/\Delta t = 110 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

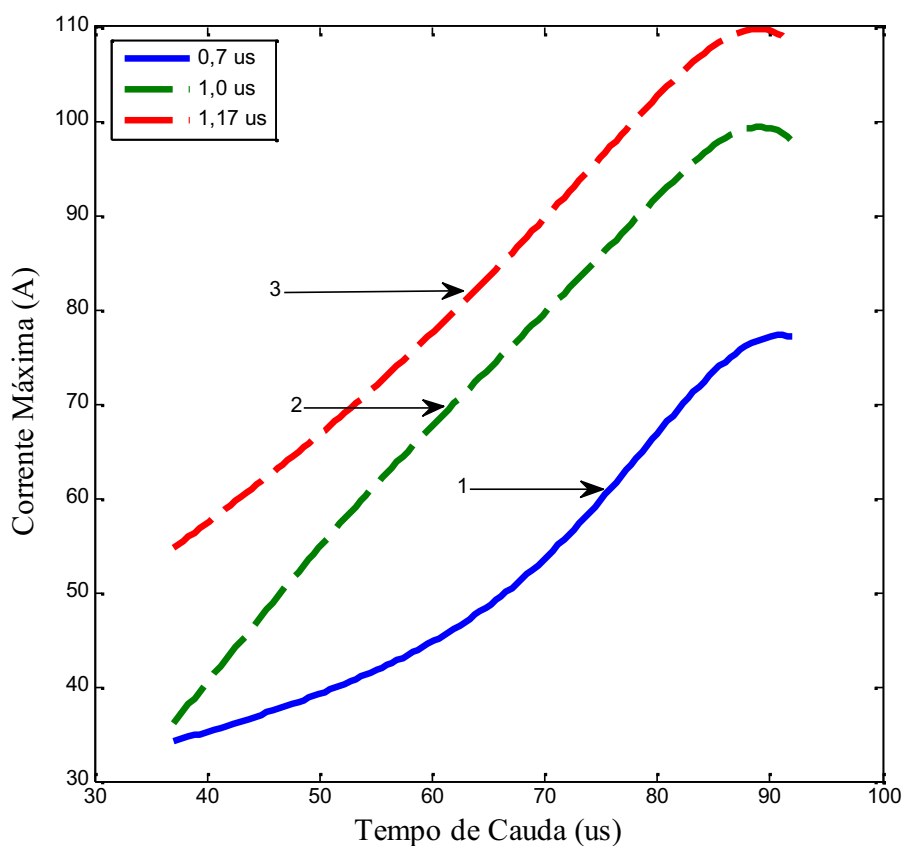


Figura 6.34. Transformador de 25 kVA $\Delta V/\Delta t$ de 110 kV/ μs e T_f de 0,7 (1), 1,0 (2) e 1,17 μs (3).

Nas Figuras 6.32 e 6.34, pode-se observar que para tempos de frente maiores que 1,0 μs , o comportamento linear das curvas frente à corrente, se mantêm até um tempo de cauda de 90 μs , sendo a diferença de uma figura para outra, o valor máximo da corrente, o qual é maior para uma taxa de crescimento de tensão de 110 kV/ μs . Além disso, a partir de 90 μs , todas as curvas alcançam o ponto máximo de corrente.

Na Figura 6.33 existe uma região de não linearidade entre os tempos de cauda de 40 e 60 μs , para as curvas 1 e 2, porém, esta não linearidade, na faixa do tempo de cauda aceito pela norma, desaparece para aplicação com tempos de frente acima de 1,0 μs .

Comparando-se os resultados obtidos para a taxa de crescimento da tensão com aqueles obtidos através da aplicação do valor de crista, quando em destaque o transformador de 25 kVA, tem-se evidenciada a baixa influência da taxa de crescimento da tensão, pelo menos para tempos de frente acima de 1,0 μs . Sendo assim, para este transformador devem-se evitar tempos de frente muito baixos, principalmente, se associados a tempo de caudas normalizados, para se garantir um valor máximo da corrente no ensaio de impulso.

6.6 Corrente Máxima em Função da Taxa de Crescimento da Tensão para a RNA2

As Figuras a seguir apresentam a corrente máxima em função da taxa de crescimento da tensão. Esta análise tem como finalidade avaliar como a corrente se comporta para diferentes taxa de crescimento de tensão, levando-se em conta tempos de frente e de cauda constante para os transformadores de 45 kVA e 25 kVA. Os tempos de frente e cauda foram:

- $0,84 \times 50 \mu\text{s}$
- $1,0 \times 55 \mu\text{s}$
- $1,17 \times 60 \mu\text{s}$

Estes tempos foram escolhidos de acordo com as limitações de variação da norma e dos dados experimentais obtidos dos ensaios.

A Figura 6.35 apresenta o gráfico da corrente pela taxa de crescimento da tensão, considerando os tempos de frente e de cauda mencionados anteriormente, para o transformador de 45 kVA.

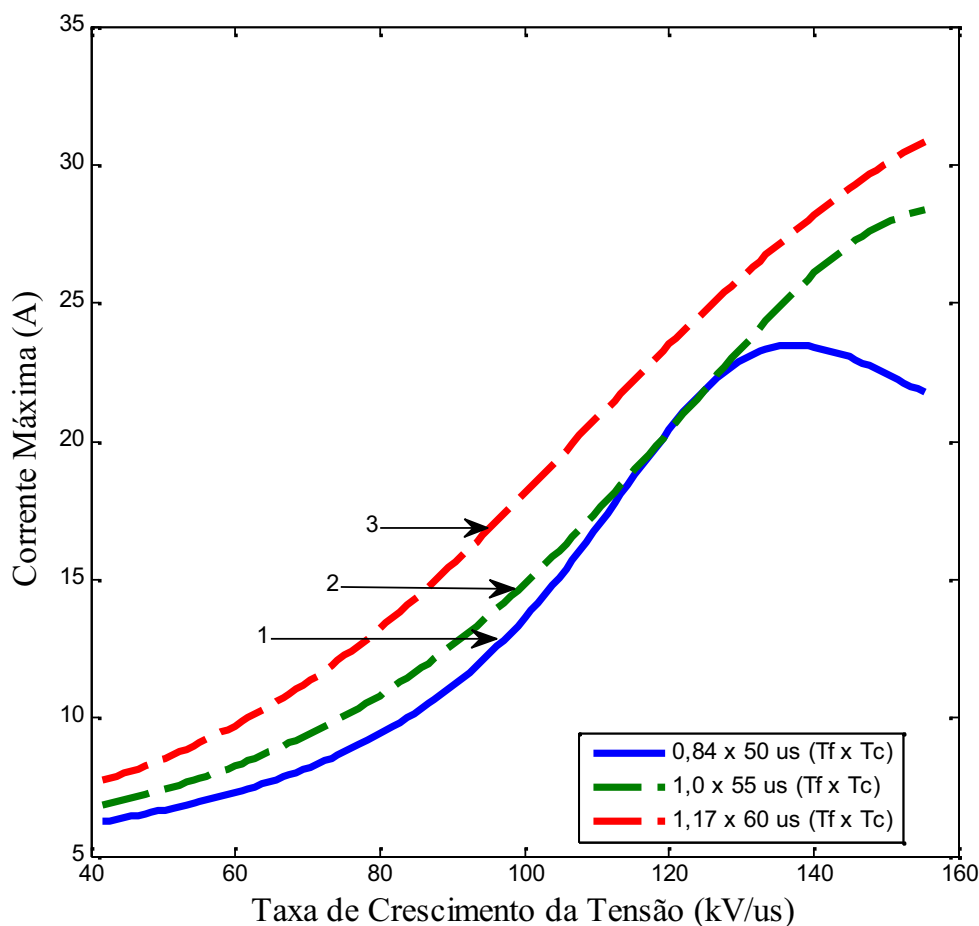


Figura 6.35. $I_{m\acute{a}x} \times \Delta V/\Delta t$ para o Transformador de 45 kVA.

Na figura acima, tem-se que quanto maior a taxa de crescimento da tensão, maior será a corrente alcançada nos ensaios de impulso, entretanto, é importante mencionar que para taxa de crescimento da tensão acima de $110 \text{ kV}/\mu\text{s}$, pode ser prejudicial a isolação do transformador, além de contribuir para o aumento do seu envelhecimento. Outro aspecto que deve ser destacado é a não linearidade, quando aplicados tempos de frente abaixo de $1,0 \mu\text{s}$, como, por exemplo, na curva 1, tem-se que a partir de $130 \text{ kV}/\mu\text{s}$ a corrente máxima é alcançada, ou seja, nestas condições, além de correr o risco de prejudicar o transformador, não é possível alcançar valores maiores de corrente.

A Figura 6.36 apresenta o gráfico da corrente pela taxa de crescimento da tensão, considerando os tempos de frente e de cauda mencionados anteriormente, para o transformador de 25 kVA.

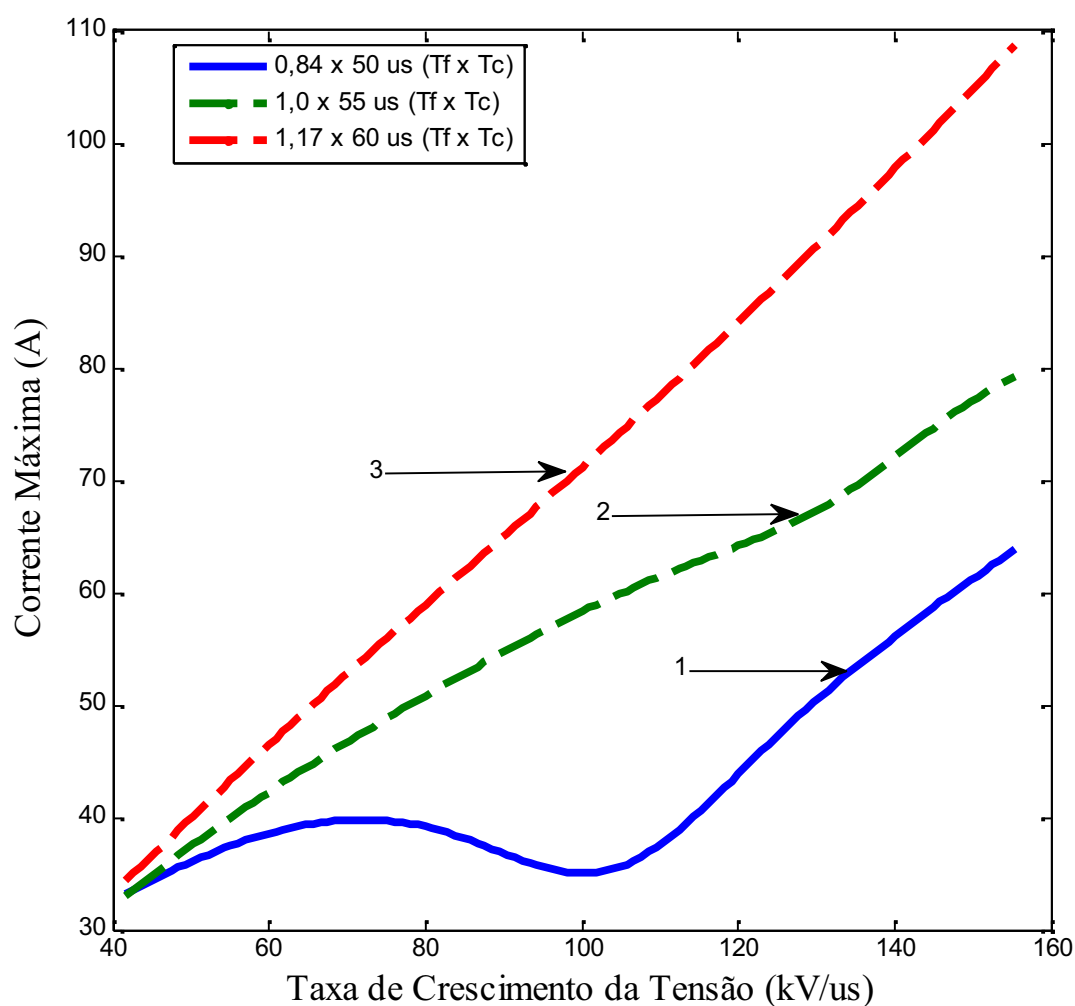


Figura 6.36. $I_{m\acute{a}x} \times \Delta V/\Delta t$ para o Transformador de 25 kVA.

Na Figura 6.36, observa-se novamente, que para a condição de tempos de frente maiores, temos um comportamento muito próximo do linear, ao contrário do que se vê na curva 1 (tempo de frente 0,84 μ s).

A partir dos resultados para análise utilizando a taxa de crescimento da tensão, evidencia-se um critério interessante para auxílio na análise de falhas em transformadores submetidos ao ensaio de impulso. Deve-se, portanto, apenas levar em consideração a isolação, a qual pode ser facilmente danificada por uma taxa de crescimento elevada.

Apesar da taxa de crescimento da tensão ser um parâmetro interessante para ensaios de impulso, a qual deve ser respeitada, esta é dificilmente controlada. Sendo o valor da taxa de crescimento da tensão altamente influenciado pelo tempo de frente, o qual é um parâmetro controlado no ensaio, e o valor de crista da tensão (valor também controlado), fica difícil de controlá-la. Esta afirmação reside no fato da inexistência exata do tempo inicial de aplicação da tensão, devido à dificuldade de sincronizar o tempo da centelha do gerador de impulso com o disparo do sistema de medição. Desta forma, torna-se mais interessante a primeira análise, considerando o valor de crista da tensão, por ser um parâmetro facilmente controlado.

7 CONCLUSÕES, TRABALHOS FUTUROS E PUBLICAÇÕES

7.1 Conclusões

O estudo bibliográfico realizado nesse trabalho demonstra o quanto é fundamental a análise da corrente para detecção de possíveis falhas em ensaios de impulso atmosférico para transformador de distribuição. A avaliação da corrente pode influenciar decisivamente na aprovação do dimensionamento de transformadores em relação às falhas incipientes na sua isolação.

A complexidade e a não linearidade do fenômeno, dificulta a modelagem matemática através de ferramentas convencionais e experimentais [10], sendo assim, os ensaios de impulso ainda são essenciais para avaliação de transformadores. Entretanto, na análise da corrente para determinação de falhas, que é feita por comparação entre um impulso pleno e um reduzido, muitas vezes, apresenta uma diferença tão insignificante que dificulta a detecção de falhas.

A partir deste panorama, a rede neural artificial pode ser uma ferramenta alternativa para auxiliar a análise de ensaios de transformadores frente às descargas atmosféricas, através da estimação dos parâmetros mais adequados que forneçam uma melhor condição de análise para a corrente.

Através dos resultados e discussões realizadas no Capítulo 6, foi possível verificar em exaustivas simulações, as diferenças existentes entre os picos de corrente máxima no transformador sob ensaio, através da variação dos parâmetros, tais como: tempo de frente, tempo de cauda, valor de crista da tensão de impulso e a taxa de crescimento da tensão.

Neste sentido, a variação dos parâmetros, dentro da faixa de tolerância da norma, de forma a se obter a maior amplitude da corrente, para auxiliar a análise de falhas, pode ser tornar uma prática interessante. Visto que dentro da tolerância da norma para os parâmetros, há uma grande variação de amplitude da corrente, a qual pode ser manipulada através de aplicação de tempos de frente e de cauda específicos.

O fator mais relevante, na identificação de falhas através da corrente, é o tempo de ensaio em laboratório de alta tensão devido seu alto custo. Portanto, qualquer esforço na minimização deste tempo, e conseqüentemente o custos de ensaios, de forma a evitar a repetição de ensaios, em situações que a análise da corrente se torna impraticável, será de grande valia.

Deve-se atentar para o fato de que as simulações, resultados e discussões baseiam-se em Normas Técnicas Nacionais e Internacionais [4,5] em função das tolerâncias exigidas em

relação aos tempos de frente e de cauda. Assim, fica atribuído a este trabalho mais uma contribuição no sentido avaliar a tolerância dessas normas.

Outro fato que é importante destacar é que nesta pesquisa foram realizados ensaios não normalizados, com frentes de onda muito pequenas e com tempos de cauda muito longos e, mesmo assim, os transformadores suportaram esta condição de estresse adicional, sem apresentar nenhum defeito. Essa constatação indica a possibilidade de uma revisão nos ensaios de impulso atmosférico, uma vez que esses parâmetros são adotados há muitos anos.

O estudo apresentado permitiu mostrar a influência do tempo de frente em relação ao tempo de cauda, no resultado da amplitude da corrente, para transformadores de distribuição reais, comumente utilizados. Assim, o mesmo, pode auxiliar na avaliação de ensaios de impulso atmosférico em transformadores de 25 e 45 kVA, levando-se em conta a frente e a cauda da onda de maneira integrada e não isolada. Pois, em função da aplicação de tempos de frente e de cauda que produzam uma maior amplitude de corrente, poder-se-á identificar pequenas falhas através de diferenças mais evidenciadas, na comparação das formas de onda de corrente de impulso.

7.2 Trabalhos Futuros

Uma sugestão para os trabalhos futuros é a aplicação de tempos de frente e cauda que indiquem a maior amplitude de corrente para os transformadores abordados nesta pesquisa. Esta aplicação tem como objetivo demonstrar na prática a influência de uma maior amplitude de corrente na detecção de falhas, visto que, para falhas com pequenas variações nos registros de corrente a aprovação ou não do transformador sob ensaio é extremamente difícil. Além disso, simular pequenas falhas nestes transformadores e aplicar as condições proposta anteriormente, para avaliar o impacto de um tempo de frente e cauda normalizado que produzam uma amplitude de corrente máxima.

Como sugestão adicional, pode-se aplicar a abordagem acima para outras potências de transformadores (75 kVA, 300 kVA, etc.), tornando abordagem assim, mais abrangente.

7.3 Publicação Durante a Pesquisa

Durante a execução desta pesquisa foi publicado um trabalho com os resultados preliminares obtidos.

Trabalho Relacionado com o Tema da Pesquisa

- Fernando C. L. Amaral, André N. de Souza, Pedro da Costa Jr., Maria G. Zago. **Development of Computing Tools to Evaluate the Behaviour of Transformers Related to Lightning.** *Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection –SIPDA*, Curitiba, 2009, CD.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Venkatesan, S. Usa, “Impulse Strength of Transformer Insulation With Nonstandard Waveshapes”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.22, no.4, pp.2214-2221, Oct. 2007.
- [2] E. Al-Ammar, G. G. Karady, “Transfer Function Analysis Using STFT for Improvement of the Fault Detection Sensitivity in Transformer Impulse Test”, *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, vol., no., pp. 1855- 1862 vol. 2, 12-16, June 2005
- [3] N. Prema Kumar, J. Amarnath, K. D. Shrivastava, B. P. Singh, “Identification of Winding Faults in Power Transformers by Low Voltage Impulse Test and Neutral Current Method Using Wavelet Transform Approach”, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on*, vol., no., pp. 140- 143, Oct. 2005.
- [4] *Guia Para Ensaio de Impulso Atmosférico e de Manobra Para Transformadores e Reatores*, ABNT NBR 5356 – 4:2007.
- [5] “IEEE Guide for Transformer Impulse Tests”, *IEEE Std C57.98-1993*, 1994.
- [6] R. Miller, D.M. Ryder, “The Effect of High-Voltage Lightning Impulses on the Core Properties of Transformers”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, N° 5, September, 1989.
- [7] “Secondary (Low-Side) Surges in Distribution Transformers”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.7, no.2, pp.746-756, Apr 1992.
- [8] D. Hayes, “Investigation of Secondary High Voltage Caused by Turn-to- Turn Failures in Pole-Type Distribution Transformers”, Missouri Valley Electric Association, April 21-23, 1987.
- [9] C. J. Ribeiro, A. P. Marques, et. al., “Falhas e Defeitos Ocorridos em Transformadores de Potência de 34,5 kV do Sistema Elétrico da CELG, no Período de 1979 a 2007: Um Estudo de Caso”, *Revista Eletricidade Moderna*, Julho 2008.
- [10] A. Morched, L. Marti, J. Ottevangers, “A High Frequency Transformer Model for the EMTP”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.8, no.3, pp.1615-1626, Jul 1993.
- [11] E. Al-Ammar, G. G. Karady, H. J. Sim, “Novel Technique to Improve the Fault Detection Sensitivity in Transformer Impulse Test”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.23, no.2, pp.717-725, April 2008.
- [12] E. C. Rippon, G. H. Hickling, “The Detection by Oscillographic Methods of Winding Failures During Impulse Tests on Transformers”, *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*, vol.96, no.53, pp.769-778, October 1949.
- [13] A. Mazur, L. Kerszenbaum, J. Frank, “Maximum Insulation Stresses Under Transient Voltages in the High-Voltage Barrel-Type Winding of Distribution and Power Transformers”, *IEEE Transactions Industry Applications*, vol. 24, N° 3, pp. 427-433, May/June, 1988.

- [14] “IEEE Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution Transformers”, *IEEE Std C57.138-1998*, 1998.
- [15] C. Koley, P. Purkait, S. Chakravorti, “Time-Frequency Representation of Resistance for Modeling of Transformer Winding Under Impulse Test”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.21, no.3, pp.1367-1374, July 2006.
- [16] A. Bhoomaiah, G. Sreelatha, P. Appala Naidu, M. Mohan Rao, B. P. Singh, “Wavelet Technique for Noise Separation in the Neutral Current of a Power Transformer During Impulse Test”, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on*, vol., no., pp. 577- 580, 16-19 Oct. 2005.
- [17] B. Valecillos, J. Ramirez, “Evaluation of Lightning Impulse Test by Frequency Response Analysis”, *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*, vol., no., pp.1-6, 15-18 Aug. 2006.
- [18] A. De, N. Chatterjee, “A Fuzzy ARTMAP Fault Classifier for Impulse Testing of Power Transformers”, *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol.11, no.6, pp. 1026- 1036, Dec. 2004.
- [19] C. Koley, P. Purkait, S. Chakravorti, D. Brahma, M. Ghanti, B. Pratihari, S. Saha, “Fractal-ANN Tool for Classification of Impulse Faults in Transformers”, *INDICON, 2005 Annual IEEE*, vol., no., pp. 152- 156, 11-13 Dec. 2005.
- [20] P. Rajamani, D. Dey, B. Chatterjee, S. Chakravorti, “Classification of Impulse Fault Patterns in Transformers Using Wavelet Network”, *Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on*, vol., no., pp.1-6, 12-15 Oct. 2008.
- [21] M. Surya Kalavathi, B. Ravindranath Reddy, B. P. Singh, “Modeling Transformer Internal Short Circuit Faults Using Neural Network Techniques”, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on*, vol., no., pp. 601- 604, 16-19 Oct. 2005.
- [22] N. R. Tubb, “A Development Path to Success in Neural Computing”. *Expert Systems Applications*, v. 9, n. 5, p. 5-9, 1993.
- [23] S. Haykin, “Redes Neurais Princípios e Práticas”, Bookman, pp.142, 2001.
- [24] B. Widrow, et al., “Layered Neural Nets For Pattern Recognition”. *IEEE Transactions on Acoustics*, vol. 36, pp. 1109-1117, 1998.
- [25] Z. L. Kovacs, “Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações”, Texto Básico Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2a. Edição, São Paulo, SP, 1996.
- [26] B. Kosko, “Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence”, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1992.
- [27] M. H. Hassoun, “Fundamentals of Artificial Neural Networks”, MIT Press, Massachusetts, 1995.

- [28] J. J. Hopfield, "Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities", *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 79, pp. 2554-2558, 1982.
- [29] F. Rosenblatt, "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain". *Psychological Review*, vol. 65, pp. 386-408, 1958.
- [30] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, "Learning Internal Representations by Error Propagation", in Rumelhart, D. E., and McClelland, J. L. (eds.), *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition I*, pp. 318-362, MIT Press, Cambridge MA, 1986.
- [31] M. Wellauer, *Introdução às técnicas das altas tensões*, São Paulo, EDUSP, 1973
- [32] *Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Procedimento ABNT NBR 6936:1992*.
- [33] "Power Transformers – Insulation Levels and Dielectric Tests". *IEC Publication 76-3*, 1980.
- [34] S. Munshi, C. K. Roy, J. R Biswas, "Computer studies of the performance of transformer windings against chopped impulse voltages", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C* , vol.139, no.3, pp.286-294, May 1992.
- [35] W. S. Zaengl, E. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Pergamon Press, 1984.
- [36] J. H. Hagenguth, "Progress in Impulse Testing of Transformers", *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the* , vol.63, no.12, pp.999-1005, Dec. 1944.
- [37] J. H. Hagenguth, J. R. Meador, "Impulse Testing of Power Transformers", *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* , vol.71, no.1, pp.697-704, Jan. 1952.
- [38] B. Vahidi, J. Beiza, "Using PSpice in Teaching Impulse Voltage Testing of Power Transformers to Senior Undergraduate Students", *Education, IEEE Transactions on* , vol.48, no.2, pp. 307- 312, May 2005.
- [39] P. T. M. Vaessen, "Transformer Model for High Frequencies", *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.3, no.4, pp.1761-1768, Oct 1988.
- [40] L. C. Aicher, "Some Aspects of Ground-Current Measurements During Transformer Impulse Tests", *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* , vol.79, no.3, pp.1101-1103, April 1960.
- [41] G. W. Lengnick, S. L. Foster, "The Use of Neutral Current Measurements During Chopped-Wave Impulse Tests on Transformers", *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* , vol.76, no.3, pp.977-979, April 1957.

[42] T. Ueda, et AL., “An Improved Transformer Model for Transfer Voltage Study”. *Proceedings of International Conference on Power Systems transients*, IPST, p.107-112, Lisbon, 1995.

[43] D. J. Wilcox, D. J. Leonard, “A New EMTP Transformer Model Based on Modal Analysis”. *Proceedings of International Conference on Power Systems Transients*, IPST, Lisbon, p.101-106, 1995.