

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

WILLIAM MOREIRA DE ASSIS

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS ELÉTRICOS DE CIRCUITOS DE
ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL EM PARA-RAIOS

DM: 11/2019

UFPA / ITEC / PPGE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

WILLIAM MOREIRA DE ASSIS

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS ELÉTRICOS DE CIRCUITOS DE
ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL EM PARA-RAIOS

DM: 11/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAM MOREIRA DE ASSIS

Validação Experimental de Modelos Elétricos de Circuitos de Ensaio de Tensão
Residual em Para-raios.

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica – PPGEE da
Universidade Federal do Pará como
requisito para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica

DM: 11/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da UFPA

A848v Assis, William Moreira de, 1992-

Validação experimental de modelos elétricos de circuitos de ensaio de tensão residual em para-raios / William Moreira de Assis.-2019.]

Orientador: Marcos Vinicius Alves Nunes

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2019.

1. Sistemas de energia elétrica – Proteção. 2. Impedância (eletricidade) – Testes. 3. Descargas elétricas – Proteção- Simulação por computador.I. Título.

CDD 23. ed. 621.3191

-

-Elaborada por Lucicléa S. de Oliveira – CRB -2/648

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

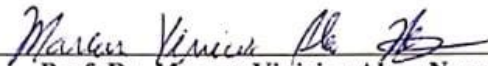
**"VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS ELÉTRICOS DE CIRCUITOS PARA ENSAIOS
DE TENSÃO RESIDUAL EM PARA-RAIOS"**

AUTOR: WILLIAM MOREIRA DE ASSIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

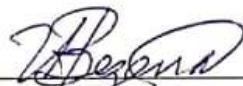
APROVADA EM: 22/03/2019

BANCA EXAMINADORA:




Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes

(Orientador – PPGEE/UFPA)



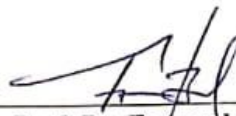
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Eduardo Tannus Tuma

(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)



Prof. Dr. Fernando de Souza Brasil

(Avaliador Externo – ELETRONORTE)

VISTO:



Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes

(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha Vó Josefa (in memorian), que sempre foi minha primeira mãe, nos deixou há pouco tempo e sempre me deu todo o amor e apoio para continuar trilhando as batalhas da minha vida. Foi sempre um exemplo de amor fraterno que vou levar para a minha vida toda.

Dedico também este trabalho a meus pais Lilian e Jonas e minha irmã Liliane, que apesar das dificuldades nunca deixaram nada faltar para mim, e minha namorada Fernanda, que me ajudou a encontrar forças para a conclusão deste trabalho.

William Moreira de Assis

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Lilian que batalhou muito para me oferecer uma educação de qualidade.

A minha avó Josefa (in memoria), que sempre acreditou no meu potencial e nunca negou uma palavra de incentivo.

A minha namorada Fernanda pelo companheirismo e amor, que me compreende, me ajuda e me motiva.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcus Vinicius, pela amizade e que durante muito tempo compartilha seus conhecimentos comigo, meu muito obrigado.

Aos amigos que trabalham comigo no LEAT pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

Aos meus amigos mais próximos, Alberto, Marcelo, Dudu, por me proporcionarem o apoio necessário.

A Dona Diana e Seu Aurélio por cuidarem de mim e me apoiarem como se fossem meus pais.

Por fim, manifesto aqui a minha gratidão à Deus, que me deu força e energia para realizar com sucesso mais essa etapa em minha vida acadêmica.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Motivação e Justificativa	23
1.2 Objetivos.....	25
1.2.1 Objetivos Gerais	25
1.2.2 Objetivos Específicos.	25
1.3 Contribuições	26
1.4 Estrutura e Organização do Trabalho	26
CAPÍTULO 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS SUPRESSORES DE SURTO	
27	
2.1 Introdução.....	27
2.2 Supressores de surto de ZnO	27
2.3 Características físicas, térmicas e elétricas dos Supressores de surto de ZnO. 28	
2.4 Terminologias Utilizadas	32
2.4.1 Tensão Nominal (U_n) e Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV)	
32	
2.4.2 Tensão de Referência	32
2.4.3 Corrente de Referência	32
2.4.4 Corrente de Descarga	32
2.4.5 Tensão Residual.....	33
2.5 Ensaio em Para-Raios.....	33
2.6 Ensaio de tensão residual	34
2.6.1 Ensaio de tensão residual para impulso de corrente íngreme.....	35
2.6.2 Ensaio de tensão residual para impulso atmosférico.....	35

2.6.3	Ensaio de tensão residual para impulso de manobra	36
2.7	Considerações finais do capítulo	36
CAPÍTULO 3- MODELAGEM DE PARA-RAIOS DE ZnO		37
3.1	Introdução.....	37
3.2	Modelo convencional.....	37
3.3	Modelos com característica dinâmica.....	38
3.4	Modelos baseados nas características do ZnO	39
3.5	Modelos de para-raios para a região de altas correntes.	42
3.6	Considerações Finais	48
CAPÍTULO 4- GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE.....		50
4.1	Caracterização das Formas de Onda Normalizadas de Impulso de Corrente	51
4.1.1	Impulso de Corrente Exponencial.....	51
4.2	Gerador Multiestágio de Marx.....	53
4.3	Gerador de Impulso de Corrente do LEAT.....	56
4.4	Análise do Circuito <i>RLC</i> série do gerador	59
4.4.1	Resposta de corrente superamortecida.....	61
4.4.2	Resposta de corrente criticamente amortecida	62
4.4.3	Resposta de corrente subamortecida.....	63
4.5	Considerações finais do capítulo	67
CAPÍTULO 5- METODOLOGIA DA MODELAGEM COMPUTACIONAL E ENSAIOS DE TENSÃO RESIDUAL EM PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO.....		68
5.1	Introdução.....	68
5.2	Ensaio de Tensão Residual em Para-raios de Óxido de Zinco.	68
5.3	Montagem do ensaio de Tensão residual no LEAT UFPA.....	71
5.4	Modelagem do circuito de ensaio de tensão residual em para-raios de ZnO	79
5.4.1	Modelagem do gerador de impulsos de corrente.....	79

5.4.2	Modelagem do para-raios de 30kV	79
5.5	Considerações finais do capítulo	84
CAPÍTULO 6- ANÁLISE DO CIRCUITO DE ENSAIO E RESULTADOS.		85
6.1	Comparação dos modelos dependentes da frequência	85
6.2	Análise do Circuito do Gerador de Impulsos de corrente	90
6.3	Simulações e Ensaio.....	93
6.4	Considerações finais do capítulo	106
CAPÍTULO 7- CONCLUSÃO		107
7.1	Trabalhos Futuros.....	108
REFERENCIAS.....		109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração de um supressor de surto de ZnO com invólucro de porcelana.....	28
Figura 2.2 - Varistor de ZnO. (a) Representação esquemática da microestrutura. (b) Estrutura.....	29
Figura 2.3 - características do elemento ZnO e SiC.....	30
Figura 2.4 - Curva V_{xl} típica de um supressor de surto de ZnO utilizado em um sistema	31
Figura 3.1- Modelo elétrico convencional de para-raios.....	37
Figura 3.2 - Modelo elétrico proposto por Tominaga.....	38
Figura 3.3 - Modelo elétrico proposto Kim (2000).	39
Figura 3.4 - - Modelo elétrico proposto Levinson e Philipp (1976)	40
Figura 3.5 - Modelo elétrico proposto Matsuura e Yamaoki. (1977).....	40
Figura 3.6 - Modelo elétrico apresentado por Haddad <i>et al.</i> (1990).	41
Figura 3.7 - Modelo elétrico proposto Haddad <i>et al.</i> (1999).....	41
Figura 3.8 - Modelo elétrico do pára-raios de ZnO – IEEE Working Group.....	42
Figura 3.9- Característica tensão/corrente para $A0$ e $A1$, modelo IEEE WORKING GROUP.....	44
Figura 3.10 - Modelo de Pinceti.....	45
Figura 3.11 - Curvas características de $A0$ e $A1$ para o modelo de Pinceti	46
Figura 3.12 - . Dedução do circuito equivalente completo de para-raios.....	46
Figura 3.13 - Modelo proposto por Fernandez e Diaz	47
Figura 3.14 - Figura 7. Curva de seleção para 5kA.....	48
Figura 3.15 - Figura 8. Curva de seleção para 10kA.....	48
Figura 4.1 -Exemplo de uma corrente de impulso exponencial com a cauda cruzando a linha do zero.....	51
Figura 4.2 - Circuito multiplicador de tensão proposto por Marx	55
Figura 4.3 - Sistema de testes para geração de impulsos de corrente.	56
Figura 4.4 - Gerador de Impulsos de Corrente do LEAT.....	57
Figura 4.5 - Respostas ao impulso de corrente para o circuito equivalente: (a) subamortecido, (b) criticamente amortecido e (c) superamortecido.....	64
Figura 5.1: Circuito para realização do ensaio de tensão residual.	70
Figura 5.2- Para-raios Balestro	71

Figura 5.3 - Características elétricas do para-raios.....	71
Figura 5.4 - Características Mecânicas do para-raios	72
Figura 5.5 - Curto-circuito nos estágios não utilizados do gerador de impulsos para tensões residuais entre 25kV e 100kV	73
Figura 5.6 - Retirada do resistor de equipotencial entre os estágios 2 e 3 do gerador de impulsos de corrente.	73
Figura 5.7 - Barras de curto-circuito dos estágios superiores.	73
Figura 5.8 - Desconexão do resistor de carregamento e indutâncias sugeridas pelo manual Haefely.	74
Figura 5.9 – Para-raios para ensaios no LEAT.	75
Figura 5.10 - Retorno do circuito (seção plana).	75
Figura 5.11 - Indutância de descarga de 10 μ H.	76
Figura 5.12 - Indutância de descarga de 30 μ H.	76
Figura 5.13 - Resistências em série de 2400 Ω	76
Figura 5.14 - Shunt de medição de 0,1 Ω	77
Figura 5.15 - Divisor capacitivo com resistor de amortecimento.	77
Figura 5.16 - Dados de placa do divisor capacitivo com resistor de amortecimento	78
Figura 5.17 - Arranjo do divisor capacitivo com resistor de amortecimento. (1) Divisor de tensão capacitivo, (2) cabo coaxial com impedância de surto, (3) Gravador digital, (4) terminação C3R3 para cabos coaxiais longos.....	78
Figura 5.18 - Dados de placa do capacitor de carregamento.....	78
Figura 5.19-Modelo do Gerador de impulsos e para-raios.	79
Figura 5.20- Curvas para a definição de $L1$ no modelo para o bloco de 5 kA	83
Figura 5.21- Curvas para a definição de $L1$ no modelo para o bloco de 10 kA	83
Figura 6.1 - Modelo proposto pelo IEEE Working Group 3.4.11 em ATP Draw.	86
Figura 6.2 - Modelo proposto por Pincetti em ATP Draw.	87
Figura 6.3 - Modelo proposto por Fernandez em ATP Draw.	87
Figura 6.4 - Comparação das curvas de corrente de descarga e tensão residual dos modelos propostos - 8/20 μ s.	88
Figura 6.5 - Comparação das curvas de corrente de descarga e tensão residual dos modelos propostos - 1/2 μ s	88
Figura 6.6 - Influência do resistor externo na corrente de descarga	90
Figura 6.7 - Influência do resistor externo na tensão residual	90

Figura 6.8 - Influência da capacitância do capacitor de carga na corrente de descarga.	91
Figura 6.9 - Influência da capacitância do capacitor de carga na tensão residual. ...	91
Figura 6.10 - Influência da indutância na corrente de descarga.....	92
Figura 6.11 - Influência do indutor na tensão residual.....	92
Figura 6.12 - Influência do divisor capacitivo com resistor amortecimento na corrente de descarga.....	93
Figura 6.13 - Influência do divisor capacitivo com resistor amortecimento na tensão residual.....	93
Figura 6.14 - Modelo do Gerador de impulsos, divisor de tensão e modelo do para-raios de Fernandez (2001) no ATP.	95
Figura 6.15 – Corrente de Descarga 5kA, Para-raios Balestro de Un= 30kV.....	96
Figura 6.16 – Tensão Residual para Corrente de Descarga de 5kA, Para-raios Balestro de Un= 30kV	96
Figura 6.17 – Forma de onda da corrente de descarga 5kA no DIAS 773.	97
Figura 6.18 – Forma de Onda da Tensão residual no DIAS 773.....	97
Figura 6.19 – Barras de curto-circuito dos estágios não utilizados no gerador de impulsos de corrente	99
Figura 6.20 – Barras de conexão do último estágio do gerador até o suporte isolador do objeto de ensaio	99
Figura 6.21 – Cordoalha de alumínio para conexão com o para-raios.....	100
Figura 6.22 – Circuito de ensaio implementado no ATP Draw.	101
Figura 6.23 – Tensão residual para corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s no ATP Draw.	101
Figura 6.24 – Corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s	102
Figura 6.25 - Tensão residual para corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s no ensaio em laboratório.	103
Figura 6.26 - Corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s.....	103
Figura 6.28 – Corrente de Descarga para várias configurações de indutores no ATP Draw.	104
Figura 6.29 – Tensão residual para Corrente de Descarga para várias configurações de indutores no ATP Draw.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Ensaio em Para-raios.....	34
Tabela 4.1 - Especificações das correntes e tensões do gerador do LEAT.....	58
Tabela 4.2 - Parâmetros do circuito <i>RLC</i> subamortecido.....	65
Tabela 4.3 - Parâmetros do circuito <i>RLC</i> criticamente amortecido	66
Tabela 4.4 - Parâmetros do circuito <i>RLC</i> superamortecido.....	66
Tabela 5.1 – Configuração 1s2p do gerador de impulsos de tensão	72
Tabela 5.2 - Característica predefinida de tensão e corrente dos blocos elementares	81
Tabela 5.3 – Curva V_{xl} do resistor não-linear A0.....	82
Tabela 5.4 - Curva V_{xl} do resistor não-linear A0.....	82
Tabela 6.1 - . Parâmetros do gerador de Impulso de Corrente.	85
Tabela 6.2 - Erro Relativo das tensões residuais para os modelos propostos – Corrente 10kA 8/20 μ s.	89
Tabela 6.3 - Erro Relativo das tensões residuais para os modelos propostos – Corrente 10kA 1/2 μ s.	89
Tabela 6.4 – Parâmetros da forma de onda para o ensaio de tensão residual; Comparação de valores de ensaio e de simulação.....	97
Tabela 6.5 - Parâmetros da forma de onda para o ensaio de tensão residual; Comparação de valores de ensaio e de simulação.....	104
Tabela 6.6 – Simulações de ensaios de tensão residual para diferentes formas de onda.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	Asea Brown Boveri
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ATP	Alternative Transients Program
CELPA	Centrais Elétricas do Pará
CEMAR	Centrais Elétricas do Maranhão
et al.	Abreviação da expressão latina “et alli” correspondendo em português a “e outros”.
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LEAT	Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão
NBR	Norma Técnica
SiC	Carboneto de Silício
V-I	Tensão versus Corrente
ZnO	Óxido de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt	Passo de cálculo ou passo de integração.
A_0, A_1	Resistências não-lineares
$A_1, A_2, B_1, B_2, D_1, D_2$	Constantes que dependem das condições iniciais do circuito.
Al_2O_3	Trióxido de dialumínio.
$BaCo_3$	Cobalteto de bário.
BaO	Monóxido de bário.
BeO	Monóxido de berílio.
Bi_2O_3	Trióxido de dibismuto.
C	Capacitância.
$C_{(s/n)}$	Banco de capacitores conectados em paralelo.
CaO	Monóxido de cálcio.
C_{div}	Capacitância do divisor capacitivo com resistor de amortecimento.
C_g	Capacitância formada pelos grãos de óxido de zinco separadas pela região intergranular.
CoO	Monóxido de cobalto.
Cr_2O_3	Trióxido de dicromo.
C_s'	Capacitor de surto.
C_s	Soma de todas as capacitâncias individuais dos capacitores de surto.
Ga_2O_3	Trióxido de digalio
h	Altura em metros do supressor de surto.
\hat{i}	Valor de pico máximo instantâneo da corrente.
I_b	Corrente conduzida no bloco varistor.
I_n	Corrente de descarga nominal do para-raios.

K	Constante característica do para-raios.
K ₂ O	Monóxido de dipotássio.
L	Indutância.
L'	Indutância por estágio.
L ₀ , L ₁	Indutâncias para simulação de característica dinâmica
L _{ext}	Indutância externa.
L _{int}	Indutâncias internas.
L _{load}	Indutância do equipamento sob ensaio.
MCOV	Máxima tensão de operação contínua.
MnO	Monóxido de manganês.
mol (%)	Percentagem de massa molecular.
n	Número de colunas de varistores em paralelo.
n	Número de colunas paralelas de blocos de ZnO
Nb ₂ O ₅	Pentaóxido de níbio.
O ₁	Origem virtual.
PbO	Óxido de chumbo
Pr ₆ O ₁₁	Óxido de praseodímio.
R	Resistência para implementação numérica
R _(d/ext)	Resistência de carregamento externa.
R(i)	Resistência não linear.
R ₀ , R ₁	Resistências para implementação numérica e composição de filtros
R _c	Resistência de amortecimento associada ao capacitor.
R _{div}	Resistência do divisor capacitivo com resistor de amortecimento.
R _{ext}	Resistência externa.

R_g	Resistência dos grãos de óxido de zinco.
R_g'	Resistor de carregamento.
R_{int}	Resistências internas.
R_L	Resistência de amortecimento.
R_{load}	Resistência do equipamento sob ensaio.
R_{nl}	Resistência não linear formada pelas barreiras da região intergranular.
R_p	Resistor não-linear principal ou varistor
S	Centelhador.
s_1 e s_2 –	Frequências naturais.
Sb_2O_3	Trióxido de antimônio.
SiO_2	Dióxido de silício.
SrO	Monóxido de estrôncio.
T_0	Tempo referente ao zero virtual
T_1	Tempo referente à frente de onda
T_2	Tempo referente à meia cauda
T_{close}	Tempo de fechamento da chave.
T_d	Duração do pico do impulso retangular.
TiO_2	Dióxido de titânio.
T_{open}	Tempo de abertura da chave.
T_t	Duração total do impulso retangular.
U	Tensão sobre os terminais do pára-raios (ou do sistema)
U_{ch}	Tensão de carga mínima do gerador equivalente.
U_{ch}'	Tensão de carregamento por estágio.

$U_{In,8/20}$	Tensão residual para descarga de corrente com amplitude nominal e forma de onda 8x20 μ s
$U_{In,T1}$	Tensão residual para descarga de corrente com frente de onda T1 e amplitude nominal
U_n	Tensão nominal.
$U_{R1/T2}$	Tensão residual para surto de 10kA com frente rápida (1/T2 μ s)
$U_{R8/20}$	Tensão residual para surto de 10kA e forma 8x20 μ s
U_{res}	Tensão residual.
W	Energia armazenada no banco de capacitores.
ZnO	Óxido de zinco.
ZrO ₂	Dióxido de zircônio.
$\alpha -$	Coefficiente de não linearidade.
α	Frequência de neper ou fator de amortecimento.
ΔU_{res}	Elevação residual de tensão
ω_0	Frequência ressonante ou frequência natural não-amortecida.
ω_d	Frequência angular amortecida ou frequência de amortecimento.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado propõe a adoção de um modelo elétrico para ensaios de tensão residual em para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) para formas de onda padronizadas e não-padronizadas, utilizando modelos de para-raios já consolidados na literatura. O modelo proposto foi validado a partir de ensaios realizados no Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão da UFPA (LEAT), obtendo resultados de medições de tensão residual e corrente de descarga. Nos ensaios foi utilizado um para-raios de tensão nominal 30kV_{rms} submetido a corrente de descarga de 10kA com formas de onda que variam de $8\mu\text{s}$ até $5\mu\text{s}$ de tempo de frente de onda. Para variar os valores de frente e da cauda das formas de onda impulsivas foram utilizados indutores disponíveis no LEAT, para alteração dos valores de frente e da cauda das formas de onda impulsivas. Adicionalmente, simulações foram realizadas no *software* ATP Draw para avaliar a acurácia do modelo para outros tipos de forma de onda, as quais inicialmente não puderam ser realizados no LEAT. O resultado do modelo foi comparado com os resultados de medição. O modelo se mostrou satisfatório para todas as formas de onda impulsivas. Os parâmetros do modelo são de fácil determinação, e todas as informações necessárias dos para-raios e do gerador de impulso estão contidas nos manuais e catálogos dos fabricantes.

Palavras-Chave: Modelo elétrico; para-raios; ensaio de tensão residual; impulsos de corrente.

ABSTRACT

This dissertation proposes the adoption of an electric model for residual voltage tests in zinc oxide (ZnO) arresters for standardized and non-standardized waveforms, using models of lightning already consolidated in the literature. The proposed model was validated from tests performed at the UFPA High and Extra High Voltage Laboratory (LEAT), obtaining results of residual voltage and discharge current measurements. In the tests, a 30kVrms nominal voltage arrester was used, subjected to a discharge current of 10kA with waveforms ranging from 8 μ s to 5 μ s of wavefront time. In order to vary the front and tail values of the impulsive waveforms, It was used the available inductors in the LEAT to change the values of the front and the tail of the impulsive waveforms. Additionally, simulations were performed in the ATP Draw software to evaluate the accuracy of the model for other waveform types, which initially could not be performed in the LEAT. The model result was compared to the measurement results. The model proved to be satisfactory for all impulsive waveforms. The parameters of the model are easy to determine, and all necessary information for the lightning arrester and pulse generator is contained in manufacturers' manuals and catalogs.

Keywords: Electrical model; surge arresters; residual voltage test; current impulses.

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Justificativa

O sistema elétrico, em geral, está sujeito à incidência de descargas atmosféricas ou sobretensões de manobra. Para evitar que equipamentos de alto custo como transformadores sofram danos significativos em sua isolação, dispositivos de proteção como para-raios são instalados, sendo estes os mais indicados para desempenhar esta função (DINIZ, 2011). Neste âmbito, o para-raios apresenta papel predominante na confiabilidade dos sistemas elétricos, visto que, sua saída de operação deixaria os equipamentos sob sua proteção vulneráveis as sobretensões que podem ocorrer no sistema. Em geral, sua instalação é realizada na entrada das subestações ou nos terminais de alta tensão de transformadores de potência.

Em tempos mais remotos, especificamente no final do século XIX, a proteção de equipamentos contra sobretensões era realizada somente por um centelhador a ar, sendo este conectado entre fase e terra de um determinado sistema ao qual iria proteger. Dada a importância destes dispositivos, muitos estudos foram realizados até a descoberta dos resistores não lineares que substituíram o centelhador que era utilizado. Desde então, diferentes tipos de dispositivos foram inventados ao longo dos anos, sendo a tecnologia de resistores não lineares a óxido de zinco a que mais se destaca atualmente. Tal tecnologia, dispensou a utilização de centelhadores internos, eliminando a complexidade de produção as quais se observava em para-raios mais antigos, como os fabricados com resistores não lineares a carboneto de silício (MARTINEZ, 1992).

Os supressores de surto à base de óxido de zinco (ZnO), também conhecidos como para-raios de ZnO, são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões atmosféricas e de manobra. Eles são constituídos principalmente por elementos não lineares, os varistores de ZnO. A característica altamente não linear desses elementos permite que o supressor de surto esteja conectado, continuamente, entre os terminais fase e terra do sistema elétrico (LIRA et al, 2012).

Em regime normal de operação, o supressor de surto de ZnO apresenta alta impedância, conduzindo correntes na ordem de microampères. Na ocorrência de surtos de manobra o supressor de surto de ZnO funciona drenando corrente na ordem

de dezenas ou centenas de ampères, com duração de algumas dezenas de microssegundos, sendo a capacidade de absorção de energia pelo supressor de surto o principal parâmetro a ser especificado nesta situação. Na ocorrência de surtos atmosféricos, o supressor de surto pode conduzir correntes na ordem de unidades ou dezenas de quiloampères, com duração de poucos microssegundos, sendo o valor de pico da tensão residual o principal parâmetro a ser especificado, neste caso. Tal valor depende da taxa de crescimento do impulso de corrente (LIRA et al, 2012).

Descargas atmosféricas são algumas das maiores causas de queima de equipamentos em virtude das sobretensões geradas. Essas correspondem a fenômenos naturais gerados com a formação de um arco elétrico resultante da diferença de potencial existente entre as cargas contidas nas nuvens e no solo. Em virtude dos elevados níveis de tensão gerados com a sua incidência, elas tornam-se uma das maiores responsáveis pelas perdas de equipamentos elétricos em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), ocasionando interrupção da distribuição e transmissão de energia. Desse modo, faz-se necessário o uso de dispositivos de proteção com o intuito de evitar que os equipamentos elétricos sejam submetidos a tensões que ultrapassem a sua suportabilidade.

O equipamento de proteção mais utilizado é o para-raios de Óxido de Zinco (ZnO). Sendo este uma estrutura formada pelo empilhamento de resistências não-lineares, denominados varistores, envoltos por um invólucro polimérico ou de porcelana (NETO et al, 2006). De modo que a sua atuação se dá pela retenção de sobretensões de origem atmosférica e de manobra, reduzindo as amplitudes das sobretensões transitórias nos terminais dos equipamentos ou dos sistemas protegidos em níveis pré-estabelecidos.

Sobretensões encontradas nos sistemas elétricos tem formas de onda aleatórias, de difícil reprodutibilidade, porém, normas de ensaios padronizam essas descargas de forma que ensaios e testes possam ser realizados em equipamentos elétricos (para-raios, transformadores, isoladores). Com o desenvolvimento do estudo de descargas atmosféricas e de modelos de forma de onda destes fenômenos, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) resumiu e introduziu os parâmetros típicos de forma de onda e amplitude de descargas elétricas nos padrões de proteção contra raios (NBR 16050, 2012).

O ensaio de tensão residual em para-raios revela os níveis de sobretensão permitidos por para-raios quando por ele flui a corrente nominal, sendo esta tensão

um importante parâmetro para cálculos de coordenação de isolamento da rede. Esses testes são realizados em laboratórios de alta tensão utilizando um gerador de impulso de corrente, de forma que os para-raios são submetidos a impulsos de corrente padronizados de alta magnitude, e são medidos os valores de tensão residual nos seus terminais (SCHON, 2013). Porém a configuração do gerador e o nível de tensão de carregamento do circuito ainda é empiricamente ajustado e estimado através da experiência do fabricante, o que gera uma pequena discrepância dos valores de capacitâncias e indutâncias do gerador de impulsos quando se realiza simulações com os mesmos parâmetros conforme será apresentado nesta dissertação.

Desta forma, as aplicações de corrente em para-raios tornam-se problemáticas, pois, com a passagem dessas correntes, consecutivamente, observa-se um sobreaquecimento nas pastilhas de óxido de zinco devido a avalanche de elétrons, resultando na necessidade de um intervalo entre as aplicações de impulso, fazendo-se necessário o aumento do tempo dos ensaios a fim de comparar com os resultados de simulação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Visando uma melhor eficiência nos ensaios, este trabalho avalia a modelagem do circuito para ensaios de tensão residual em para-raios através do software ATP (*Alternative Transient Program*).

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Criar uma ferramenta computacional para de maneira prévia encontrar os parâmetros do circuito de ensaio de tensão residual em para-raios no LEAT;
- Avaliar alguns modelos de para-raios encontrados na literatura, para uso na ferramenta computacional;
- Avaliar o efeito das conexões metálicas entre o gerador de impulsos, e o objeto de teste, o quanto elas impactam na tensão residual.
- Realizar o Ensaio de Tensão Residual em para-raios de 30kV
- Comparar a modelagem computacional implementada no ATP e o ensaio realizado no LEAT-UFPA (Laboratório de Extra Alta Tensão da UFPA)

1.3 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho consiste na adoção de uma etapa que antecederá a execução do ensaio de tensão residual em para-raios de ZnO em laboratório, a qual, por meio da modelagem computacional do referido ensaio, será possível conhecer, antecipadamente, os parâmetros do circuito de ensaio, quais sejam: número de estágios, tensão de carregamento dos capacitores e indutâncias do gerador. Isso possibilitará que estes ensaios em laboratório sejam realizados com maior rapidez e eficiência. Além disso, é possível avaliar várias outras configurações do gerador para que seja possível prever a compra ou confecção de elementos do circuito de ensaio (resistores, indutores e capacitores) para adaptação de outras formas de onda, capacidade de geração de corrente e sistemas de medição.

1.4 Estrutura e Organização do Trabalho

Para melhor entendimento deste trabalho, este será estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 serão abordados alguns conceitos de funcionamento dos para-raios, bem como fenômenos elétricos associados a ele, tipos de ensaios, entre outros tópicos importantes para o trabalho.

No capítulo 3 serão mostrados alguns conceitos do funcionamento do gerador de impulsos de corrente e a modelagem do mesmo, mostrando os circuitos envolvidos e seu equacionamento.

No capítulo 4 será mostrada a metodologia aplicada a modelagem do circuito de ensaio e montagem do circuito de ensaio no LEAT UFPA.

No capítulo 5 serão mostradas as simulações do modelo de para-raios e do gerador de impulso de corrente no software *ATPDraw*, além disso, serão comparados os resultados das simulações obtidas neste software com os resultados obtidos no LEAT.

No capítulo 6 serão apresentadas propostas de trabalhos futuros, e conclusões acerca dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS SUPRESSORES DE SURTO

2.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentado um breve histórico sobre os supressores de surto de ZnO e suas principais características físicas e elétricas. O conhecimento dessas características fundamenta a escolha dos circuitos de ensaio para os do modelo de supressor de surto de ZnO, bem como fornece os conhecimentos necessários para avaliar se os resultados condizem com o esperado.

2.2 Supressores de surto de ZnO

O para-raios de Carboneto de Silício (SiC) perdurou sem concorrência no mercado até meados da década de 70, quando surgiram os varistores de óxido metálico para proteção contra sobretensões desenvolvido pela *Matsushita Electrical Company*. Na década de 80 diversas empresas europeias, americanas e japonesas desenvolveram e iniciaram produção dos para-raios de ZnO para aplicação em subestações e linhas de transmissão de 66, 77 e 138kV.

Os supressores de surto de ZnO são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos dos sistemas elétricos, principalmente contra sobretensões de origem atmosférica e de manobra. Sua função é limitar as sobretensões a níveis que possam ser suportados pelos isolamentos elétricos dos equipamentos que o mesmo protege.

Em 1976 surgiram as primeiras aplicações de supressores de surto de óxido de zinco (ZnO) nos sistemas elétricos de potência, elemento não linear, capaz de suportar a tensão do sistema sem a necessidade de centelhadores em série (SAKSHAUG, 1991). Os supressores de surto de ZnO apresentam como principais vantagens em relação ao seu antecessor, supressores de surto de carboneto de silício (SiC) (PEREIRA, 1985; COSTA, 1999):

- simplicidade na construção, aumentando a confiabilidade;
- o nível de proteção é mais bem definido devido a ausência de gaps;
- melhor desempenho sob contaminação;
- maior capacidade de absorção de energia;
- possibilidade de dividir a energia entre os diversos supressores de surto instalados na subestação;
- entra e sai do estado de condução suavemente.

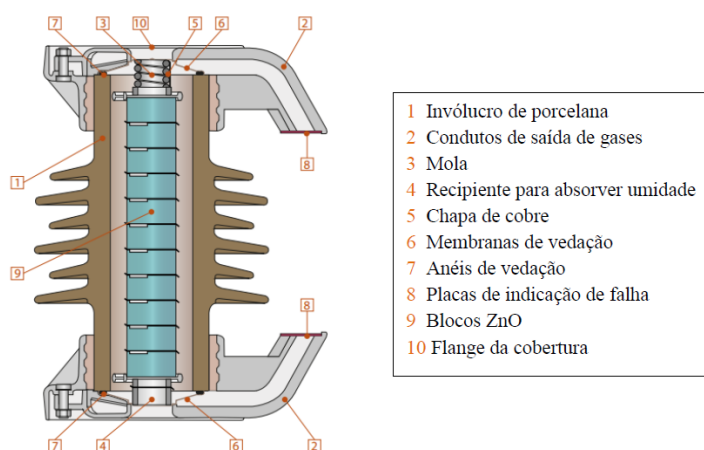
Os supressores de surto de ZnO são os mais utilizados atualmente em sistemas elétricos de potência. Apesar de eles terem se desenvolvido em meados da década de 70, as suas características físicas, e os comportamentos elétricos e térmicos frente a surtos ainda não são totalmente compreendidos, e por isso são objetos de estudos de muitos pesquisadores. Nas seções seguintes será apresentado um breve resumo sobre as características construtivas, elétricas e térmicas do supressor de surto de ZnO.

2.3 Características físicas, térmicas e elétricas dos Supressores de surto de ZnO.

Este dispositivo é obtido através de moldagem a altas pressões e sinterização a altas temperaturas, em geral sob atmosfera oxidante. São obtidos da mistura de óxido de zinco (ZnO) (de 90% a 97% em peso) e outros óxidos metálicos como o antimônio – Sb_2O_3 , o manganês – MnO_2 , o bismuto – Bi_2O_3 , o cobalto – Co_2O_3 , o cromo – Cr_2O_3 , o níquel – NiO e o alumínio Al_2O_3 . O ZnO é obtido pela oxidação do vapor de zinco metálico, que permite a manutenção de baixo nível de impurezas e tamanho médio da partícula de $0,3 \mu m$ (SALLES, 2011).

Os supressores de surto a óxido de zinco são equipamentos de estrutura simples. Basicamente são constituídos de uma coluna (ou colunas em paralelo) de varistores envolvida por um invólucro de porcelana ou material polimérico, havendo ainda alguns outros componentes estruturais. Sua configuração depende do sistema ao qual será aplicado, mas no aspecto geral é como mostrada na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Configuração de um supressor de surto de ZnO com invólucro de porcelana.



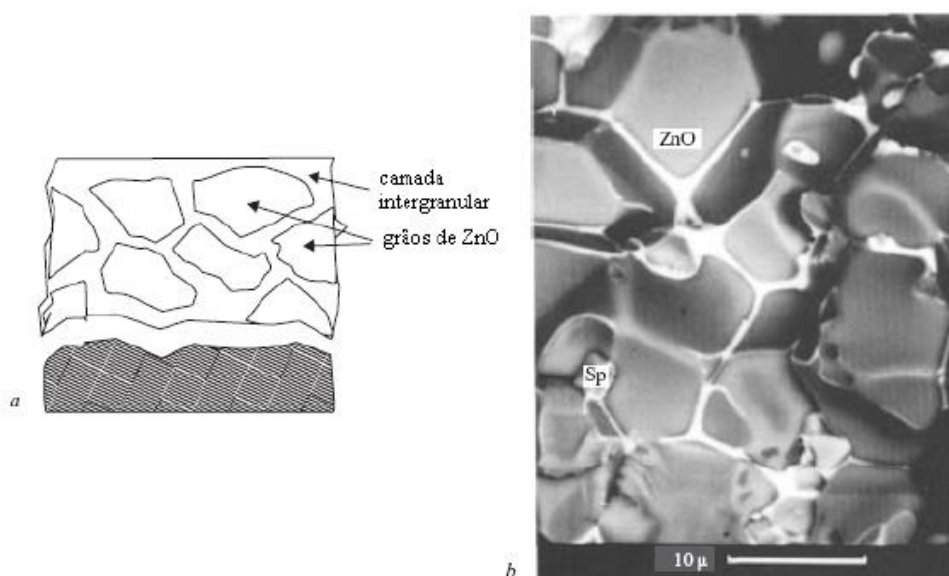
Fonte: Adaptada de (ABB, 2014).

O varistor de ZnO é constituído por um material policristalino composto por grãos de ZnO, conforme Figura 2.2a, com tamanho de 5µm e 20µm, contornados por uma fina camada de materiais Inter granulares de aproximadamente 0,2 µm de espessura (Figura 2.2b). A natureza e composição dessas camadas dependem dos aditivos utilizados na dopagem. Resultados de medições em escalas nanométricas mostraram que as camadas intergranulares podem ser muito finas, podendo medir 2×10^{-10} m (2 angstrom (A)) (HADDAD; WARNE, 2004).

A principal característica do supressor de surto de ZnO é a alta não linearidade da curva tensão-corrente ($V \times I$). Essa característica representou um avanço em relação aos supressores de surto convencionais de carboneto de silício, pois dispensou o uso de centelhadores em série com a coluna de elementos varistores.

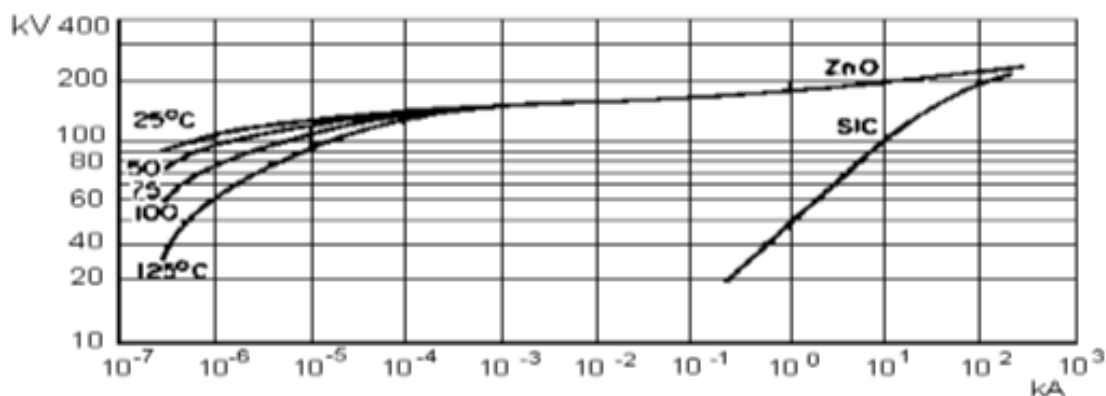
Uma comparação das curvas características típicas de um supressor de surto de ZnO e SiC pode ser vista na Figura 2.3. Podemos perceber uma maior estabilidade para tensões de operações no supressor de surtos de ZnO, onde por ele passam correntes na ordem de 10^{-7} A, porém sua tensão varia de acordo com o temperatura das pastilhas. Nessa região, o supressor de ZnO opera quase que linearmente. Já no supressor de SiC, os valores de corrente para a tensão de operação chegam a ordem de 10^0 A, precisando assim de centelhadores.

Figura 2.2 - Varistor de ZnO. (a) Representação esquemática da microestrutura. (b) Estrutura microscópica típica a partir da microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Adaptada de (HADDAD, 2004).

Figura 2.3 - características do elemento ZnO e SiC.



Fonte: (MARCANNI, 2012)

Uma curva característica típica de um supressor de surto de ZnO pode ser vista na Figura 2.4, onde são destacados as suas regiões e os principais pontos de operação. Na primeira região da curva V_{xl} tem-se a região de baixas correntes, na qual o supressor de surto opera em regime permanente. A curva característica, nesta região, apresenta-se como uma função de comportamento aproximadamente linear (PHILIPP; LEVINSON, 1977).

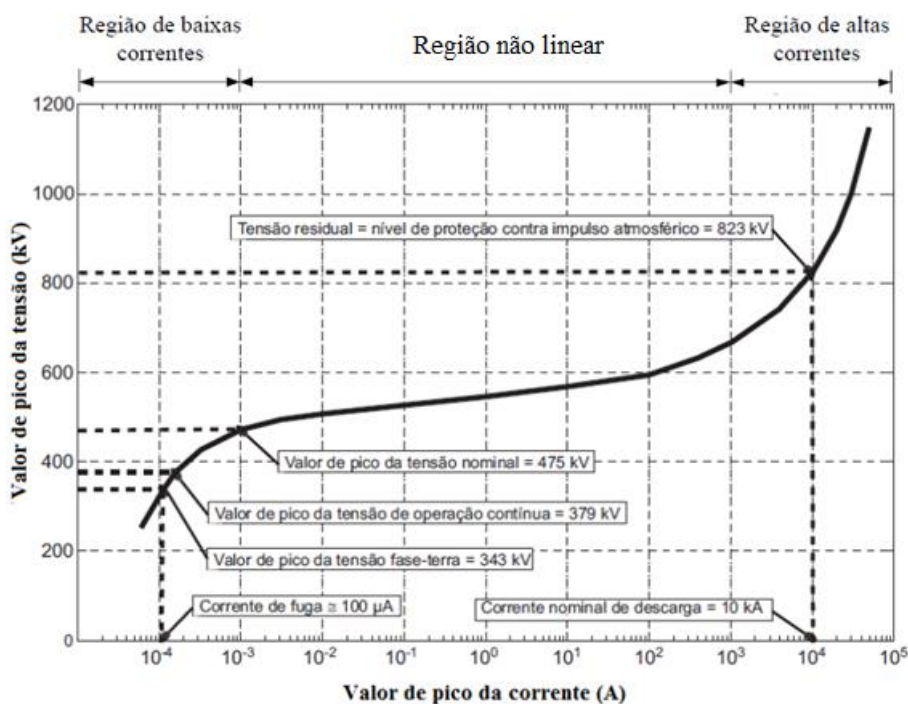
Como o supressor de surto de ZnO dispensa o uso de centelhadores em série, haverá sempre a presença de uma corrente de fuga devido à formação de um caminho de condução permanente entre o sistema elétrico e a terra. Esta corrente é constituída de uma componente capacitiva e uma pequena corrente resistiva, da ordem de miliampères, enquanto a corrente de fuga total apresenta um pico da ordem de miliampères (HINRICHSEN, 2011). Sendo assim, nessa região os supressores de surto de ZnO apresentam um comportamento predominantemente capacitivo (FRANCO, 1993; ZHAO, 2005; BRITO, 2013).

Uma região de extrema importância da curva V_{xl} é a de alta não linearidade, em que o supressor de surto conduz uma corrente elevada, mesmo para pequenas variações de tensão. O primeiro ponto de interesse é o valor da tensão nominal. Apesar do que o nome possa sugerir, a tensão nominal do supressor de surto não representa a tensão que pode ser aplicada continuamente sobre o mesmo, e sim aquela que pode ser aplicada temporariamente (geralmente por um período de 10 s) sem causar danos ao supressor de surto (IEC60099-4, 2014). Dessa forma, consegue-se avaliar a capacidade do supressor de surto de lidar com sobretensões temporárias (HINRICHSEN, 2011). O valor da tensão nominal do supressor de surto

está situado geralmente entre 1,17 e 1,33 vezes o valor da sua máxima tensão de operação contínua (MCOV) conforme descrito pelo guia (IEEE C62.22, 2009). É nessa região que, normalmente, o supressor de surto opera diante de sobretensões lentas e apresenta um comportamento predominantemente resistivo.

A próxima região é denominada de região de altas correntes e está relacionada ao nível de proteção oferecido pelo para-raios. Ela apresenta uma característica quase linear e diz respeito ao nível de proteção contra impulsos atmosféricos, representando a queda de tensão no supressor de surto quando uma descarga de corrente nominal (impulso de corrente com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de 10 ou 20 kA) é aplicada a seus terminais. Nesta região os supressores de surto de ZnO apresenta um comportamento dinâmico, em que a tensão residual se mostra maior para frentes de onda mais rápidas (TOMINAGA et al., 1979; IEEE Working Group 3.4.11, 1992; KIM et al., 1996).

Figura 2.4 - Curva V_{xl} típica de um supressor de surto de ZnO utilizado em um sistema de 420 kV.



Fonte: Adaptada de (HINRICHSEN, 2011).

2.4 Terminologias Utilizadas

Os para-raios de óxido de zinco possuem um número variado de terminologias que devem ser entendidas para a correta realização de seus ensaios e de suas especificações. De acordo com a NBR 16050 e a IEC60099-4, temos:

2.4.1 Tensão Nominal (U_n) e Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV)

A máxima tensão contínua de operação é definida como o maior valor de tensão, a frequência industrial, que pode ser aplicada continuamente aos terminais do para-raios sem que haja alteração significativa em suas propriedades térmicas e elétricas. Já a tensão nominal é o valor limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema. Esta tensão consiste em um valor eficaz de tensão a frequência industrial que é aplicada aos terminais do para-raios durante 10 segundos sob condições de sobretensão transitória. O para-raios deve operar corretamente e manter a estabilidade térmica após a absorção de uma energia prévia. Esta energia é estabelecida no ensaio de ciclo de operação.

2.4.2 Tensão de Referência

É o valor de crista dividido por $\sqrt{2}$ da tensão de frequência industrial medida entre os terminais de um para-raios quando através dele flui a corrente de referência (NBR 16050, 2012). Esta tensão define o ponto de transição entre a região de baixas correntes e a região de elevada não linearidade, sendo utilizada como um parâmetro de referência na especificação das características de operação do para-raios.

2.4.3 Corrente de Referência

É o maior valor de crista da componente resistiva da corrente de frequência industrial usada para a determinação da tensão de referência. Este valor deve ser fornecido pelo fabricante do para-raios, estando em geral na faixa de 1 mA a 20 mA.

2.4.4 Corrente de Descarga

A corrente de descarga nominal refere-se ao valor de crista de impulso de corrente com forma de onda 8/20 μ s. Este parâmetro é utilizado para a classificação do para-raios.

2.4.5 Tensão Residual

É o valor de crista de tensão que surge nos terminais do para-raios durante a passagem da corrente de descarga. A tensão residual define o nível de proteção do para-raios contra descargas atmosféricas e é utilizada na coordenação de isolamento dos equipamentos a serem protegidos, devendo o nível básico de isolamento ser superior ao valor da tensão residual. Além disto, a amplitude da tensão residual é função da forma do impulso de corrente aplicado ao para-raios em diferentes tipos de ensaios.

2.5 Ensaios em Para-Raios

Diversos são os ensaios aplicados à para para-raios de óxido metálico. Desde ensaios de projeto de um novo protótipo especificados como ensaios de tipo, como aqueles em que um comprador de um lote de produtos requer no ato da compra, especificados como ensaios de recebimento. Tais ensaios envolvem diferentes metodologias e diferentes formas de onda impulsivas de corrente que devem ser aplicadas ao equipamento. Estes ensaios devem ser realizados em laboratórios de alta tensão devidamente equipados com equipamentos tais como geradores de impulsos e fontes de alta tensão contínua e alternada. A norma IEC 60060-1 de 2010, estabelece de forma geral os requisitos de ensaios a serem seguidos nos mais variados equipamentos de alta tensão. De forma a complementa-la, a norma IEC 60099-4 de 2009 descreve os ensaios de tipo, rotina e recebimento que são especificados para um para-raios de óxido de zinco para sistemas de corrente alternada, bem como os pré-requisitos para a execução de seus ensaios.

De forma simplificada, a Tabela 2.1 descreve alguns dos principais ensaios elétricos especificados para para-raios de óxido metálico de acordo com a IEC 60099-4 de 2009.

Tabela 2.1 - Ensaio em Para-raios.

ENSAIOS DE TIPO	ENSAIOS DE ROTINA	ENSAIOS DE RECEBIMENTO
Medição da tensão de referência	Medição da tensão de referência	Ensaio de medição da tensão residual
Ensaio de tensão suportável no invólucro	Ensaio de tensão residual	Medição da tensão de referência
Ensaio de tensão residual	Descargas parciais	Ensaio de medição de descargas parciais
Corrente suportável de impulso de longa duração	Corrente de fuga total	Ensaio de medição da corrente de fuga total na MCOV
Ciclo de operação	Componente resistiva da corrente de fuga	Ensaio de medição da componente resistiva da corrente de fuga total na MCOV
Tensão suportável em função do tempo	Ensaio de distribuição de corrente em para-raios de colunas múltiplas	
Descargas parciais		
Rádio interferência		

Fonte: (NBR 16050, 2012).

Dentre os ensaios citados acima, temos o ensaio de medição de tensão residual para corrente de descarga com forma de onda $8/20\mu\text{s}$, como o foco deste trabalho e será discorrido na seção subsequente.

2.6 Ensaio de tensão residual

Este ensaio quando realizado como ensaio de tipo, tem por objetivo determinar a queda de tensão produzida nos elementos não-lineares que constituem o para-raios, quando da passagem de correntes de descarga com forma de onda e amplitude especificadas. O ensaio de tipo de tensão residual é realizado em três amostras de para-raios completos ou seções destes, com tensão nominal compreendida entre 3 a

12 kV. Quando realizado na seção do para-raios, a tensão residual do para-raios completo é geralmente definida como o resultado do produto do valor medido sobre a amostra ensaiada pela relação entre a tensão nominal do para-raios completo e a tensão nominal da seção. A metodologia acima é válida no caso da montagem dos para-raios (NBR 16050, 2012).

Em para-raios de ZnO sem centelhadores, este ensaio determina o nível de proteção dos para-raios para impulsos atmosférico e de manobra, quando aplicável. Neste caso, este ensaio é dividido em três etapas, cada etapa representando uma determinada situação a que este tipo de para-raios pode ser submetido nos sistemas: ensaio de tensão residual para impulso de corrente íngreme; tensão residual para impulso atmosférico; e tensão residual para impulso de manobra, quando aplicável com elementos de mesma tensão nominal.

2.6.1 Ensaio de tensão residual para impulso de corrente íngreme.

Este ensaio tem por finalidade verificar o comportamento dos para-raios de ZnO sem centelhadores quando da ocorrência de uma descarga atmosférica bem próxima ao para-raios. Neste ensaio, cada uma das três amostras ensaiadas deve ser submetidas a um impulso de corrente com tempo de frente de 1 μ s e tempo de meia onda inferior a 20 μ s e valor de crista igual a corrente de descarga nominal da amostra ensaiada. O maior valor de crista de tensão obtido do ensaio é definido como tensão residual para impulso de corrente íngreme.

2.6.2 Ensaio de tensão residual para impulso atmosférico

Neste ensaio, cada uma das três amostras deve ser submetidas a aplicação de impulsos de corrente com forma normalizada (8/20 μ s) e amplitudes correspondentes a meia, uma e duas vezes a corrente de descarga nominal do para-raios ou seção do para-raios ensaiado. Os valores máximos de tensão residual, obtidos para cada amplitude de corrente, são utilizados na plotagem da curva "tensão residual x corrente de descarga", sendo o maior valor obtido para a corrente de descarga nominal, definido como tensão residual para impulso atmosférico do para-raios.

O maior valor de crista entre os valores de tensão residual para impulso de corrente íngreme dividido por 1,15 e tensão residual para impulso atmosférico, obtidos dos ensaio acima, é definido como o nível de proteção do para-raios para impulso

atmosférico. Quando realizado como ensaio de recebimento, é verificada a tensão residual do para-raios no ponto correspondente a corrente de descarga nominal, devendo o valor da tensão residual ser inferior ao máximo valor estabelecido em norma, para a classe de tensão e tipo de para-raios considerado. Este ensaio também é realizado antes e após a alguns ensaios de tipo, de modo a se verificar, por comparação dos resultados, se houve variação no comportamento dos elementos não-lineares durante estes ensaios.

2.6.3 Ensaio de tensão residual para impulso de manobra

De acordo com a IEC 60099-4/98, este ensaio é aplicado a para-raios com correntes de descarga nominal de 10 e 20 kA. Neste ensaio, cada uma das três amostras deve ser submetidas a impulsos de corrente com um tempo de frente compreendido entre 30 a 100 μ s e amplitudes definidas em norma, de acordo com a classe de descarga de linhas de transmissão do para-raios. O maior valor de crista de tensão, para os valores de corrente definidos em norma, é definido como nível de proteção para impulso de manobra do para-raios.

2.7 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram abordados os aspectos teóricos do para-raios, sua construção, suas características físicas e elétricas. Esses parâmetros são importantes para uma análise correta dos para-raios, tanto para os ensaios em laboratório quanto em simulações computacionais. A compreensão dos assuntos abordados neste capítulo será de suma importância para a análise do ensaio e entendimento do modelo de para-raios estudado.

CAPÍTULO 3- MODELAGEM DE PÁRA-RAIOS DE ZnO

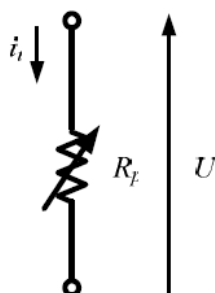
3.1 Introdução

A literatura contém uma série de modelos para a representação de para-raios ou dos varistores utilizados nos mesmos. O objetivo principal desses modelos é a representação das suas respostas aos diversos tipos de solicitações. De modo geral, os modelos têm evoluído no sentido de representar mais fidedignamente os fenômenos e as respostas do varistor ou do para-raios de forma integral. A necessidade de tornar esses modelos mais simples na aplicação e otimizar seu desempenho computacional tem incentivado à proposição de novas maneiras de representação. Neste capítulo são apresentados e comentados resumidamente alguns dos modelos empregados mais frequentemente dos para-raios de ZnO para uso em alta tensão. Deste estudo, pode-se notar que ainda existe a necessidade de um modelo elétrico específico para o varistor que possibilite representar os mecanismos que regem sua atuação quando por ele são solicitados surtos de altas corrente e alta frequência. Uma representação de forma simples e precisa é também importante para o desenvolvimento de metodologias para a avaliação de sua resposta frente a impulsos de corrente.

3.2 Modelo convencional

O modelo mostrado na figura 3.1 é uma representação simplificada do para-raios levando em consideração apenas a característica resistiva não-linear do varistor R_p em função da tensão aplicada U .

Figura 3.1- Modelo elétrico convencional de para-raios.



Fonte: Adaptado de (SILVEIRA, 2000).

Esse modelo da figura 3.1 ignora a característica dinâmica entre a tensão U e a corrente total que flui pelo para-raios. Seu modelo matemático pode ser dado pela Equação 3.1, em que k e α são os parâmetros do modelo. O parâmetro k é uma constante relativa ao projeto do para-raios e a é um parâmetro relativo ao grau de não-linearidade do varistor. Quanto maior o valor de a maior será a não-linearidade. Ou seja, quanto maior o valor de a mais restringida será a tensão nos terminais do para-raios durante o surto (SILVEIRA, 2009).

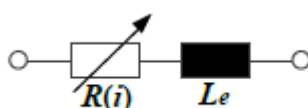
$$i = k \times U^\alpha \quad (3.1)$$

Para estabelecer uma maior fidelidade do modelo à característica do equipamento, podem-se adicionar múltiplos resistores não-lineares, com parâmetros diferenciados, implicando em uma configuração mais complexa (SCHEI, 2000). Obviamente, o processo de determinação dos parâmetros também cresce em complexidade.

3.3 Modelos com característica dinâmica

Em 1979, uma primeira tentativa de melhorar o desempenho do modelo dos para-raios foi apresentada por Tominaga *et al* (1979). É inserido um indutor linear L_l em série com o resistor não-linear R_p (figura 3.2). O efeito do indutor é introduzir uma característica dinâmica, deslocando o pico da corrente com relação ao da sobretensão. Conforme os autores (TOMINAGA, 1979), os parâmetros do modelo são próprios e únicos para cada tipo de surto. O indutor é estimado para uma situação específica com base no nível e na forma da corrente à qual o pára-raios está sujeito. Apesar de ter seu mérito, o modelo apresenta dificuldade de representar corretamente a magnitude da tensão quando há surtos de corrente com tempos de crista diferentes.

Figura 3.2 - Modelo elétrico proposto por Tominaga.



Fonte: Adaptada de (TOMINAGA, 1979).

Nessa mesma linha de tentativa de melhoramento do modelo, em 1996 foi proposto por Kim (1996) a substituição do indutor linear do modelo de Tominaga (1979) por um não-linear L , conforme mostra a figura 3.3. Conforme a referência KIM

(1996), o modelo possui uma boa representação para a situação em que o para-raios está sob impulsos íngremes. Entretanto, não é evidente a determinação dos parâmetros do modelo. Não se consegue a obtenção dos parâmetros por catálogos de fabricantes e nem sempre é viável por meio de ensaios. Assim, a determinação dos parâmetros e sua implementação em programas numéricos são normalmente inviáveis. O modelo é mais complexo, pois envolve dois elementos não-lineares em série.

Figura 3.3 - Modelo elétrico proposto Kim (2000).



Fonte: Adaptada de (SILVEIRA, 2009).

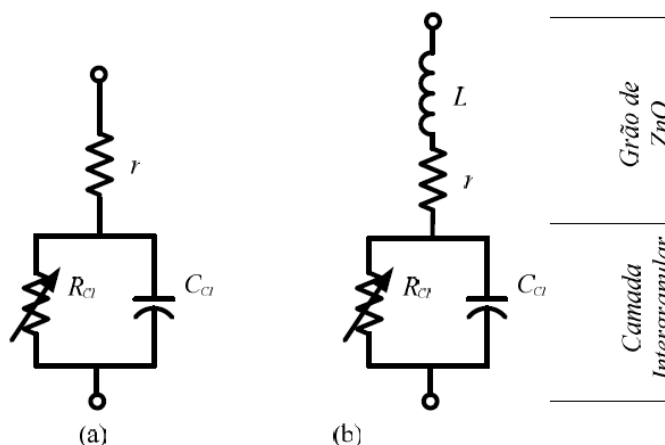
3.4 Modelos baseados nas características do ZnO

Os modelos apresentados a seguir representam os varistores com base nas características intrínsecas à microestrutura. Levada em consideração somente a região de operação, alguns desses modelos são descritos a seguir. Em 1975, Levinson e Philipp (1975) apresentaram um modelo baseado na microestrutura dos varistores de ZnO. Esse modelo é apresentado na figura 3.4 (a).

A característica não-linear é dada pelos elementos em paralelo R_{CI} e C_{CI} que representam, respectivamente, a capacitância e a resistência não-linear da camada intergranular. A dependência desses elementos com a frequência e a amplitude da tensão aplicada foi determinada experimentalmente. A resistência em série r é associada à característica do grão de ZnO.

Em 1976, os mesmos autores apresentaram estudos adicionais avaliando a resposta em frequência. Esse estudo levou à inserção de um indutor L em série com a resistência r , o modelo pode ser visto na figura 3.4 (b)

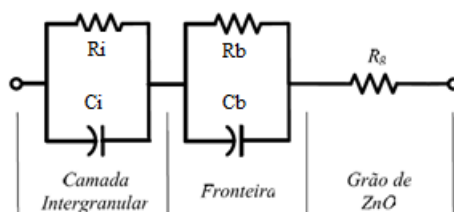
Figura 3.4 - - Modelo elétrico proposto Levinson e Philipp (1976)



Fonte: Adaptado de (LEVINSON E PHILIPP, 1976)

Em 1977, Matsuura e Yamaoki (1977) apresentaram o modelo da figura 3.5, em que são representados o interior (R_g) e as fronteiras dos grãos de ZnO (R_b e C_b), bem como as camadas intergranulares (R_i e C_i).

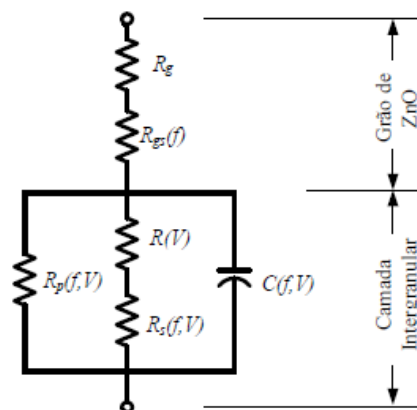
Figura 3.5 - Modelo elétrico proposto Matsuura e Yamaoki. (1977)



Fonte: Adaptado de (SILVEIRA 2009).

Em Haddad (1990) apresentaram um modelo, mostrado na figura 3.6. No desenvolvimento foi levada em consideração a variação da corrente de fuga e a potência dissipada com base na alteração do nível da tensão e da frequência, bem como com o tipo de surto ao qual o para-raios é submetido.

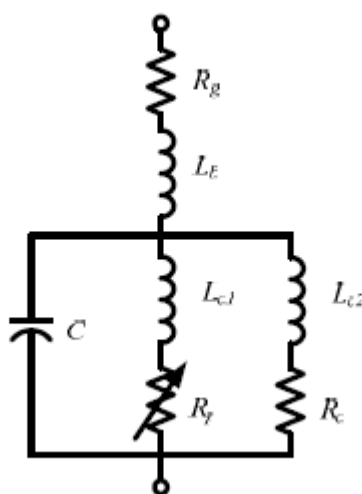
Figura 3.6 - Modelo elétrico apresentado por Haddad *et al.* (1990).



Fonte: Adaptado de (SILVEIRA, 2000).

Em 1999, Haddad (1999) apresentou ainda o circuito mostrado na figura 3.7 para a representação de para-raios de ZnO. O modelo contempla a resistência dos grãos de óxido de zinco e a indutância própria dos blocos por R_g e L_b , respectivamente. A capacitância paralela do para-raios é representada por C . O resistor R_p representa a característica não-linear dos blocos de ZnO. L_{c1} é uma indutância de pequeno valor usada para simular a característica dinâmica nas situações de descargas de grande amplitude. R_c é um resistor linear e L_{c2} uma indutância que procura contemplar o atraso nas frentes de baixa corrente.

Figura 3.7 - Modelo elétrico proposto Haddad *et al.* (1999)

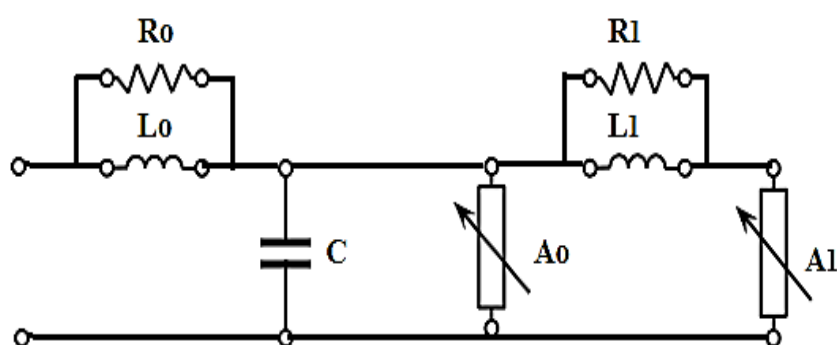


Fonte: Adaptado de (SILVEIRA, 2000).

3.5 Modelos de para-raios para a região de altas correntes.

Dentro do enfoque sobre técnicas de modelagem de para-raios, foi criado em 1971 um grupo de trabalho do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (denominado *IEEE Working Group 3.4.11*) com o objetivo de propor um modelo de referência. Esse grupo propôs o circuito apresentado na figura 3.8.

Figura 3.8 - Modelo elétrico do para-raios de ZnO – IEEE Working Group.



Fonte: Adaptado de (IEEE WORKING GROUP, 1992).

O modelo proposto é representado por dois filtros R-L, onde L_0 representa as características do campo magnético produzido pela corrente que percorre o para-raios e o R_0 evita oscilações numéricas durante simulações computacionais e o segundo separa duas resistências não-lineares, A_0 e A_1 , onde A_0 tem tensões características maiores que A_1 , ou seja, para frentes de ondas rápidas de corrente de descarga o filtro R1-L1 apresenta uma alta impedância, deixando fluir uma quantidade de corrente maior para A_0 do que A_1 , provocando tensões residuais maiores para tempos de frente menores. Enquanto para frentes de ondas lentas o filtro R1-L1 apresenta uma impedância muito baixa, logo as resistências não lineares do modelo ficam essencialmente em paralelo.

Este modelo depende somente das especificações físicas fornecidas pelo fabricante do para-raios para o equacionamento dos parâmetros, como: a altura e o número de colunas paralelas das pastilhas de ZnO, não sendo necessário o uso da curva característica V-I, mas apenas o valor da Tensão Residual de um impulso de 8/20 μ s – 10 kA e também a Tensão Residual de Impulso de Manobra (IEEE WORKING GROUP, 1992)

Com os parâmetros dimensionais, podem ser calculados parâmetros do modelo a partir das equações de 3.2 a 3.6, segundo (DUBAK, 1985).

Onde:

d: altura do para-raios em metros

n: Número de colunas de óxido de zinco em paralelo.

$$L_0 = \frac{0,2d}{n} \quad (3.2)$$

$$R_0 = \frac{100d}{n} \quad (3.3)$$

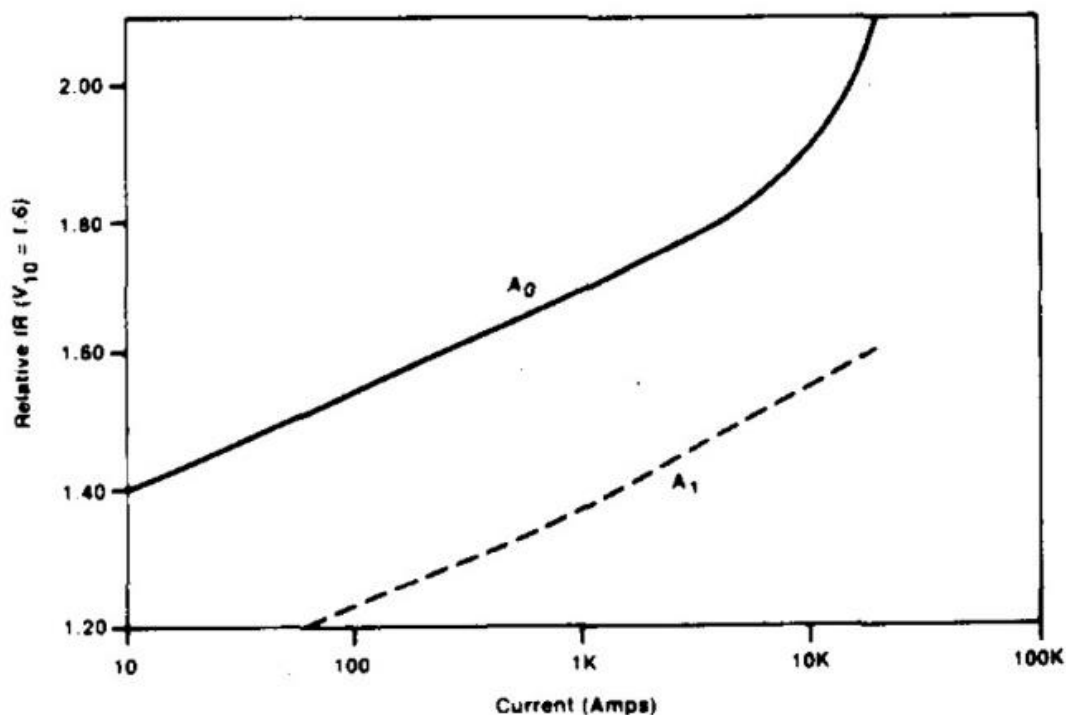
$$L_1 = \frac{15d}{n} \quad (3.4)$$

$$R_1 = \frac{65d}{n} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{100n}{d} \quad (3.6)$$

A0 e A1 são obtidos a partir da curva característica apropriada na figura 3.9, para este modelo, onde as tensões residuais para A0 são significativamente maiores do que para A1, ou seja, para frentes de ondas mais rápidas, os valores de tensão residual tendem a aumentar (PINCETTI, 1999). Esses valores são ajustados a partir do valor de tensão residual para forma de onda 8/20 μ s e 10kA de corrente de descarga, conforme equações 3.7 e 3.8 e então os mesmos são ajustados até ter uma relação compatível com os ensaios realizados pelo fabricante (FERNANDEZ, 2001).

Figura 3.9- Característica tensão/corrente para A0 e A1, modelo IEEE WORKING GROUP.



Fonte: (IEEE WORKING GROUP, 1992).

$$A0: V(kV) = V A0(pu) * \frac{V10}{1,6} \quad (3.7)$$

$$A1: V(kV) = V A1(pu) * \frac{V10}{1,6} \quad (3.8)$$

Com os parâmetros iniciais encontrados é aplicado uma corrente e tensão de manobra da mesma magnitude e forma de onda que a corrente que o fabricante determinou a tensão de descarga de manobra. Onde A0 e A1 são usados para ajustar o modelo para tensões de manobra corretas, isso é feito ajustando o valor da tensão A0 e A1 em pu até os dados do fabricante com os observados na simulação tiverem bem próximos. Outro ajuste é feito em L1 onde será aplicado um impulso de corrente 8/20 μ s e os resultados serão comparados com os dados do fabricante, alterando os valores de L1 até obter uma boa correspondência com os valores de fábrica de V10 (IEEE Working Group, 1992).

Em Pincetti e Giannettoni (1999) propuseram uma simplificação do modelo do IEEE Working Group, de modo que os filtros presentes no primeiro são substituídos por duas indutâncias L0 e L1 (Figura 3.10), que são obtidos pelas equações 3.9 e 3.10, respectivamente. A capacitância é desprezada, pois em estudos de surtos de alta frequência ao efeito característico da capacitância entre os terminais do para-

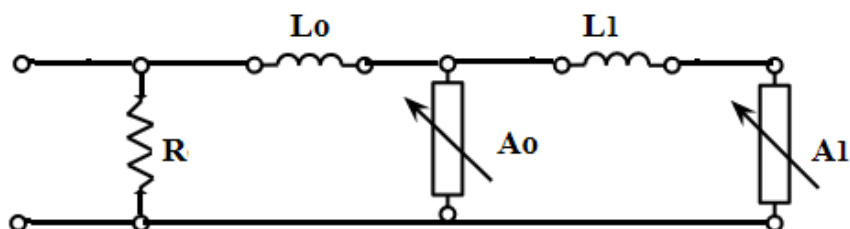
raios é negligenciado, e por fim é implementada uma resistência R na ordem de MΩ apenas para evitar oscilações numéricas no método trapezoidal, que é o método utilizado pelo ATP.

No que se refere aos parâmetros, ao contrário do IEEE, o modelo de Pinceti-Giannettoni não requer os dados físicos do para-raios e sim características de ensaios elétricos como: as Tensões Nominal, Residual para 8/20μs – 10 kA de corrente de descarga e Tensão Residual de impulso íngreme (com tempo T1 de 1μs) de 10 kA de corrente de descarga e não necessita de nenhuma correção iterativa. A escolha das curvas características de A0 e A1 se dá pelas curvas da Figura 3.9 que é derivada da curva obtida em (IEEE Working Group, 1992) e é mostrada na figura 3.11.

$$L_0 = \frac{1}{4} \frac{\left(\frac{V_{r1}}{T^2} - \frac{V_{r8}}{20} \right)}{\frac{V_{r8}}{20}} \cdot Vn \quad (3.9)$$

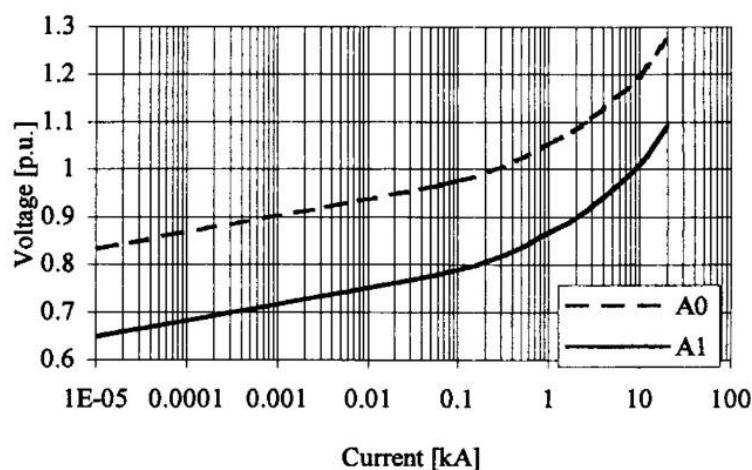
$$L_1 = \frac{1}{12} \frac{\left(\frac{V_{r1}}{T^2} - \frac{V_{r8}}{20} \right)}{\frac{V_{r8}}{20}} \cdot Vn \quad (3.10)$$

Figura 3.10 - Modelo de Pinceti



Fonte: Adaptado de (PINCETI E GIANNETTONI, 1999).

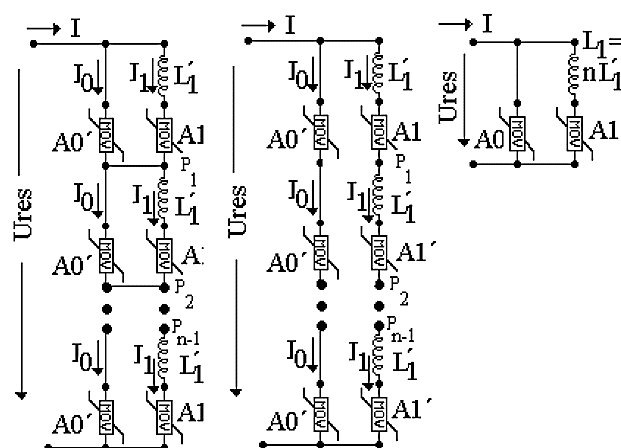
Figura 3.11 - Curvas características de A0 e A1 para o modelo de Pinceti



Fonte: Adaptado de (PINCETI E GIANNETTONI, 1999).

Assim como o modelo de Pinceti-Giannettoni, o modelo proposto por Fernandez-Diaz (figura 3.13) também é baseado no modelo do IEEE WORKING GROUP (1992), em que se permanece somente uma indutância, L_1 , entre os resistores não-lineares A0 e A1, R_0 e L_0 são desprezados e é utilizado um resistor R na ordem de $G\Omega$ para evitar oscilações numéricas. Este modelo se baseia em um primeiro estudo em uma pastilha de Óxido de Zinco com tensão nominal de 1kV, de forma que há um valor de referência de tensão residual e, assim, para-raios com tensão nominal maior que 1kV apresentam tensões residuais múltiplas dos valores de tensão residual verificado para o caso de pastilhas varistores base. Isso pode ser visto na Figura 3.12. Na qual é mostrado que se pode associar qualquer valor nominal de para-raios, como o conjunto de para-raios de 1kV em série.

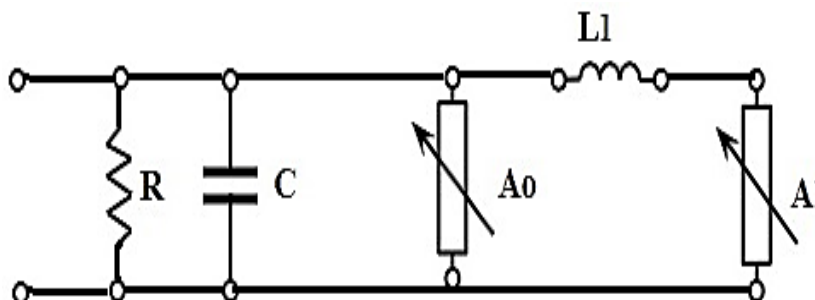
Figura 3.12 - Dedução do circuito equivalente completo de para-raios



Fonte: (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

Os resistores não lineares A0 e A1 são ajustados de tal modo que a corrente que passa por eles, para a mesma tensão residual, seja múltipla de um fator $\gamma=0,02$. Levando em consideração que esses dois últimos são obtidos a partir da curva característica (V_{xl}) fornecida pelo fabricante.

Figura 3.13 - Modelo proposto por Fernandez e Diaz



Fonte: Adaptado de (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

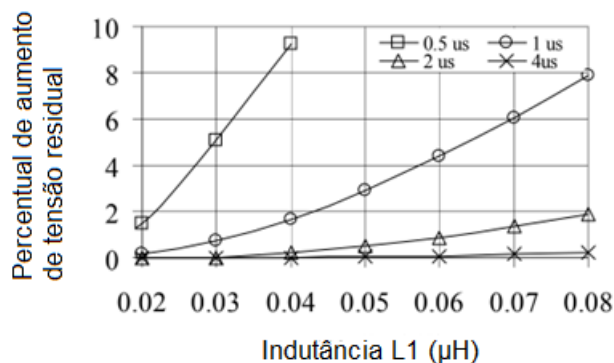
Para o parâmetro $L1$ é necessário calcular o aumento percentual da tensão residual ($\Delta U_{res} \%$), equação (3.11), e com o tempo de frente $T1$ é possível selecionar nas curvas da Figura 3.14 para uma corrente de aplicação de 5kA e Figura 3.15 para uma corrente de aplicação de 10kA o valor correspondente de $L1$ para um bloco de 1kV, com $L1$ calcula-se o fator de escala (n), conforme equação 3.12, usando o $L1$ da curva e o n com a equação 3.13 encontra-se o valor de $L'1$ que será usado no modelo.

$$\Delta U_{res} \% = \frac{U_{ln, T1} - U_{ln, 8/20}}{U_{ln, 8/20}} \times 100 \quad (3.11)$$

$$n = \frac{U_{ln, 8/20} \text{ (para raios completo)}}{U_{ln, 8/20} \text{ (bloco de 1kV)}} \quad (3.12)$$

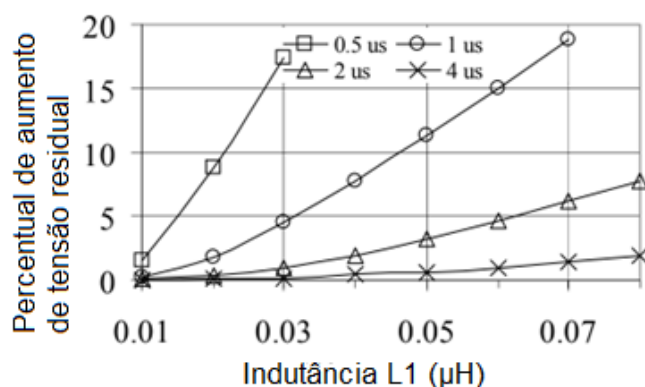
$$L'1 = n * L1 \quad (3.13)$$

Figura 3.14 - Figura 7. Curva de seleção para 5kA



Fonte: Adaptado de (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

Figura 3.15 - Figura 8. Curva de seleção para 10kA



Fonte: Adaptado de (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

3.6 Considerações Finais

De uma maneira geral, cada modelo apresentado possui seu mérito. Conforme o fenômeno e seu tipo que se pretende estudar, analisar ou representar se escolhe o mais adequado. Também deve ser levada em conta a complexidade do procedimento e a disponibilidade de dados para determinação dos parâmetros. Para analisar a operação do para-raios sob a ocorrência de descargas atmosféricas, o modelo convencional pode apresentar resultados satisfatórios. Devido a sua simplicidade, o modelo convencional é amplamente utilizado na literatura, alguns com a configuração

básica apresentada, outros associando um capacitor paralelo para modelar a componente capacitiva.

Modelos como os propostos por Haddad (1996) possuem parâmetros de difícil obtenção, e que na maioria das vezes inviabilizam sua aplicação prática. A publicação do modelo desenvolvido pelo IEEE fomentou que outros pesquisadores propusessem alterações para melhorar a representação dos fenômenos em simulações dos para-raios frente à ocorrência de surtos de origem atmosférica.

CAPÍTULO 4- GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE

Diferentes tipos de estresses podem ocorrer em um sistema elétrico de potência, tais como, estresses em dielétricos resultantes de sobretensões, bem como estresses térmicos e eletrodinâmicos, resultantes de sobrecorrentes. Testes com elevados valores de impulso de corrente são realizados a fim de simular esses estresses nos equipamentos do sistema de potência causados por transitórios que ocorrem eventualmente no sistema, tais como, descargas atmosféricas, manobras na rede e curtos-circuitos, por exemplo. As formas de onda de impulso de corrente podem ser muito diferentes entre si dependendo do objeto de teste estudado. Basicamente, há dois tipos principais de correntes de impulso, um com forma de onda exponencial e outro com forma de onda retangular. Correntes alternadas de curta duração também pertencem à categoria de correntes de impulso em um sentido amplo, eles têm um número limitado de períodos de frequência industrial e um transitório sobreposto com a componente de corrente contínua (CC). Correntes de impulso são caracterizadas pelos seus valores de pico e alguns parâmetros de tempo. A carga impulsiva e o conteúdo de energia também são parâmetros importantes (SCHON, 2013).

Correntes transitórias de curta duração e de grande amplitude, surgem na conexão com altas tensões, mais propriamente, por meio de circuitos geradores de impulsos. Estas correntes transitórias, frequentemente se desenvolvem como uma consequência de um mecanismo de descarga de ruptura e são frequentemente acompanhados por grandes forças e altas temperaturas. (DIETER, 1978)

Devido aos diferentes perfis de onda desses transitórios, normas internacionais são elaboradas por organizações como a IEC (*International Electrotechnical Commission*) que padronizam as formas de onda de impulsos de corrente que devem ser utilizados nos ensaios destes equipamentos. Impulsos de corrente normalizados de alta intensidade são obtidos através de geradores de impulsos em laboratórios de alta tensão. Neste capítulo serão mostradas as formas de onda, bem como sua forma de obtenção nos geradores de impulso. Além disso serão mostrados os modelos elétricos dos equipamentos de geração de impulsos utilizados nesta dissertação (modelos multiestágio e equivalente).

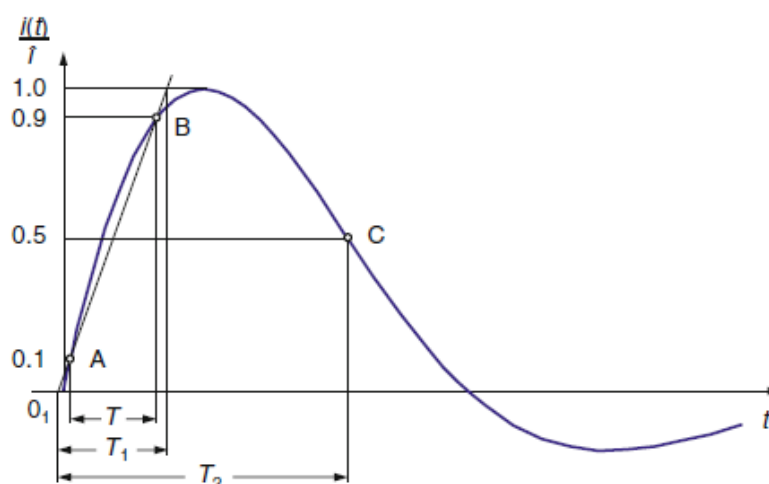
4.1 Caracterização das Formas de Onda Normalizadas de Impulso de Corrente

Impulsos de corrente podem ter diversos formatos diferentes, dependendo de suas aplicação e ocorrência. As correntes de impulso mais frequentes surgem como correntes aperiódicas ou oscilatórias amortecidas, ou como correntes alternadas com uma duração de apenas alguns curtos períodos. O valor máximo instantâneo da corrente é denotado de valor de pico \hat{i} . Este e os demais parâmetros característicos da dependência temporal serão mencionados nos itens subsequentes.

4.1.1 Impulso de Corrente Exponencial

A corrente de impulso exponencial permite mostrar um rápido aumento quase exponencial do pico, que é seguido por um declínio bastante lento até atingir o valor zero. Dependendo do circuito do gerador e do objeto de teste, o declínio ocorre exponencialmente ou como uma oscilação senoidal fortemente amortecida, figura 4.1. Em alguns casos, deve-se considerar também o efeito da corrente de impulso cruzando a linha do zero, como será exposto melhor a seguir.

Figura 4.1 -Exemplo de uma corrente de impulso exponencial com a cauda cruzando a linha do zero.



Fonte: (SCHON, 2013)

Os parâmetros que caracterizam uma corrente de impulso exponencial são, o valor de corrente de teste (valor de pico de \hat{i}), o tempo de frente T_1 e o tempo de meio-valor T_2 . Ambos os parâmetros do tempo são referidos à origem virtual O_1 que é determinada como o ponto de interseção da linha reta através da frente de impulso e a linha do zero. A linha reta cruza a frente de onda e passa através dos pontos A em

10% de \hat{i} e B em 90% de \hat{i} , como ilustrado na figura 4.1. O tempo de frente é definido como o instante que representa o tempo de subida do impulso. Este parâmetro se refere a um intervalo de tempo representativo entre o início da onda impulsiva até o instante em que ocorre o seu primeiro pico. Sua maior importância reside no fato do alto crescimento da corrente em um curto intervalo de tempo, caracterizando o maior transitório associado ao impulso. Desta forma, o tempo de frente influenciará sensivelmente na amplitude da tensão induzida nas redes elétricas, devido a incidência de descargas atmosféricas diretas ou indiretas. Além disso, o comportamento dos isolamentos de sistemas elétricos e eletrônicos são fortemente afetados pelas sobretensões associadas ao impulso incidente, principalmente as relacionadas aos instantes de maior inclinação do impulso, correlacionados ao tempo de frente (BARRADAS, 2014).

O tempo de frente é obtido multiplicando-se um fator de 1,25 pelo tempo necessário para a corrente se elevar de 10% a 90% do seu valor de crista, assim, o tempo de frente é, portanto:

$$T_1 = 1,25T_{AB} \quad (3.1)$$

Em que T_{AB} é o tempo entre os dois pontos A e B. Assim, T_{AB} corresponde à definição de tempo de subida (T_A) de um impulso comum na faixa de baixa tensão. Todavia, o Tempo Virtual de Meia Onda, ou simplesmente tempo de meia onda, é definido como o intervalo de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva e o instante em que a corrente, após ultrapassar o valor de pico, tem sua intensidade reduzida para 50% do valor de \hat{i} . Ainda que o estágio mais crítico da solicitação gerada pela corrente de descarga esteja relacionada ao valor de pico e ao tempo de frente, o tempo de solicitação relacionado ao tempo de meia-onda apresenta esforços elétricos significativos. Alguns efeitos como a instabilidade térmica em para-raios podem se manifestar, mesmo após este período, em função do efeito cumulativo da energia dissipada pela corrente de descarga no intervalo (BARRADAS, 2014)

De acordo com a NBR/ABNT 16050, diferentes tipos de impulsos de corrente podem ser utilizados dentre os vários ensaios de tipo, rotina e recebimento especificados para para-raios de óxido metálico. Essas formas de onda de impulsos de corrente são descritas abaixo:

- O Impulso de corrente íngreme possui tempo virtual de frente de 1 μs , podendo variar entre 0,9 μs e 1,1 μs dependendo do equipamento. O tempo de meio-valor deve ser menor que 20 μs .
- O impulso de corrente de descarga atmosférica possui um formato 8/20 μs , ou seja, 8 μs para o tempo virtual de frente, podendo variar entre 7 μs e 9 μs , e 20 μs para o tempo virtual de meio-valor, com variação permitida entre 18 μs e 22 μs .
- O impulso de corrente de manobra possui o tempo virtual de frente compreendido entre 30 μs e 100 μs , seu valor de tempo virtual de meio-valor pode ser até aproximadamente o dobro do valor de frente.

Para um gerador de impulso de 8/20 μs o limite de tolerância equivale a $\pm 10\%$ para o valor de pico e $\pm 20\%$ para cada um dos parâmetros do tempo. As tolerâncias especificadas para outras formas de impulso podem ser diferentes.

A polaridade reversa, depois da corrente de impulso exponencial que atravessa a linha do zero, não pode ser maior do que 20% do valor de pico. Caso contrário, há o perigo do objeto de teste ser danificado pela corrente de polaridade oposta. Cálculos mostram que a condição para a máxima polaridade reversa no simples circuito de impulso de corrente da figura 4.1 é alcançada apenas para $T_2 > 20 \mu\text{s}$. A polaridade reversa deve, portanto, ser limitada por um equipamento apropriado de corte (*chopping*) se necessário.

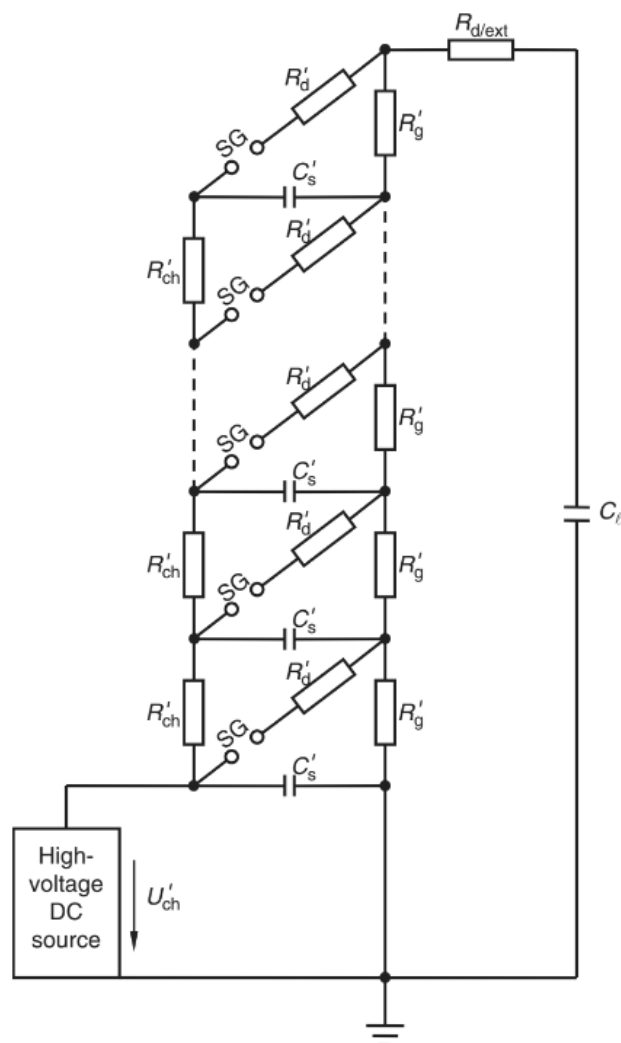
Dentre os impulsos citados acima, o impulso de corrente atmosférico 8/20 μs é o mais importante para o levantamento da curva característica (tensão residual x corrente de descarga) de um supressor de surto de óxido de zinco. A tensão residual obtida dessa curva, correspondente à corrente de descarga nominal, define o nível de proteção a impulso atmosférico do para-raios. O ensaio de levantamento desta curva é especificado na NBR/ABNT 16050 como ensaio de tipo. Além disto, este tipo de impulso é utilizado para a medição da tensão residual em ensaios de recebimento.

4.2 Gerador Multiestágio de Marx

A geração de impulsos de corrente utilizando apenas um estágio possui algumas limitações quando há a necessidade de aumentar a amplitude dos impulsos, visto que, essa característica depende da tensão de carregamento dos capacitores, o que

solicitaria uma maior fonte de tensão contínua e um aumento considerável no tamanho dos elementos que compõem o gerador. Para resolver este problema, um circuito multiplicador para gerar impulsos de tensão foi proposto por Erwin Marx em 1923, a princípio, para realizar testes em isoladores e outros equipamentos com características capacitivas. No exemplo exposto na figura 4.2, tem-se o circuito gerador de impulsos de Marx. A tensão de carregamento U'_{ch} carrega lentamente os capacitores C'_s em paralelo, através dos resistores de carregamento R'_{ch} . A distância de cada um dos *gaps* SG, mostrados na imagem, é ajustada de forma que, após o carregamento dos capacitores C'_s , seja desencadeada uma disrupção quase que simultânea de todos os *gaps*, para que assim, ocorra o rápido descarregamento em série no objeto de teste, geralmente isolações que possuem característica capacitiva, representado por C. As resistências R'_d e $R'_{d/ext}$ são chamadas resistências de frente, por outro lado, as resistências R'_g são para o controle de calda do impulso de tensão (Whadwa, 2007; Cooray, 2009).

Figura 4.2 - Circuito multiplicador de tensão proposto por Marx



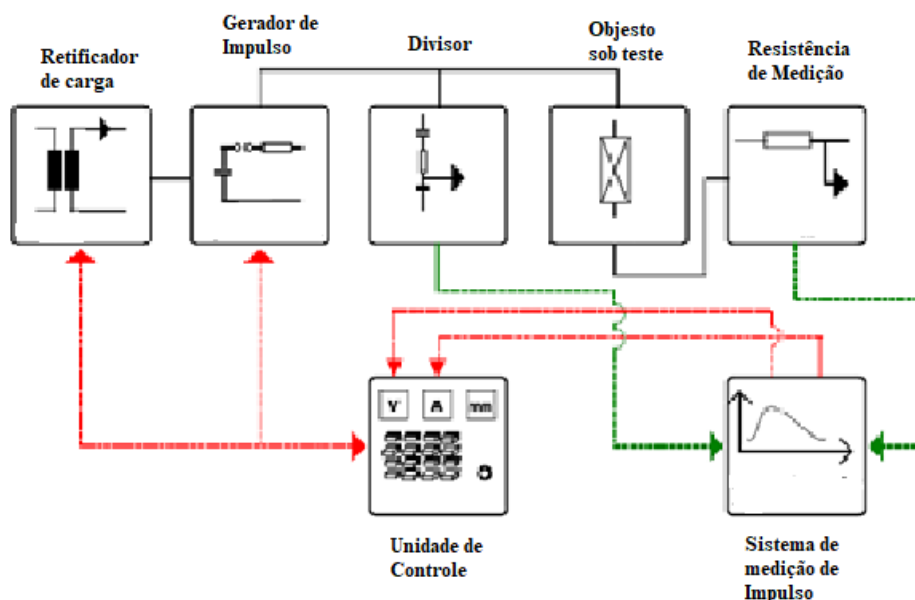
Fonte (COORAY, 2009)

Um ensaio de impulso de corrente se resume em descarregar um capacitor em um objeto de teste através de um circuito com características indutivas. Para isso, o circuito multiplicador de Marx, mostrado na figura 4.2, requer algumas modificações como a substituição das resistências R'_d por indutâncias, e da capacitância C_l por um curto-circuito ou pelo próprio equipamento para teste com impulsos de corrente. As resistências R'_g e R'_{ch} por serem relativamente altas, não afetam forma de onda do impulso de corrente (COORAY, 2009; GONOS, 2002).

4.3 Gerador de Impulso de Corrente do LEAT

O sistema completo do gerador de impulsos de corrente do LEAT apresenta os seguintes elementos, conforme ilustrado na figura 4.3.

Figura 4.3 - Sistema de testes para geração de impulsos de corrente.



Fonte: Adaptado de (KURZ, 2010)

Este sistema é formado por um retificador atuando como uma fonte DC de alta tensão, elementos do gerador de impulsos (Capacitores, indutores e resistores), o objeto sob ensaio, um divisor capacitivo para medição da tensão, shunt resistivo para medição de corrente e uma unidade de controle. Neste tópico será abordado apenas a parte correspondente ao bloco *Impulse Generator* (Gerador de impulso), os dados descritos a seguir foram extraídos do manual presente no LEAT da Haefely.

O gerador de impulso do LEAT é utilizado para ensaios e pesquisas em segmentos de para-raios de sistemas de distribuição classe 15 kV a 36 kV, e para quaisquer sistemas de transmissão acima de 69kV. Este gerador de impulsos, serve de base para a geração de impulsos de corrente mediante acréscimo de elementos adicionais, ou seja, é construído para ser tanto um gerador de impulsos de tensão quanto de corrente. Para torná-lo um gerador de impulso de corrente é necessário apenas o acréscimo de alguns elementos externos adicionais, que serão apresentados posteriormente. A figura 4.4 apresenta o gerador de impulsos do LEAT.

Figura 4.4 - Gerador de Impulsos de Corrente do LEAT.



Fonte: Do autor.

Além dos elementos de ajuste das formas de onda dos impulsos, que permitem ajustar o tempo de frente e de cauda de onda, são estabelecidos os seguintes elementos adicionais que devem permitir a aplicação de correntes exponenciais com forma de onda $8/20 \mu\text{s}$ para a geração de impulsos de corrente, conforme as especificações da norma IEC 60099-4, em para-raios completamente montados, ou seguimentos montados de óxido metálico. Os equipamentos mínimos são:

- 1 base de montagem com suportes isolados e terminal de aterramento;
- 1 jogo de 12 indutores para obter a forma de onda;
- 1 shunt para corrente de 25 kA, $0,1 \Omega$.

Desta forma, são obtidos a especificação das formas de onda para impulso atmosférico:

- Tempo de frente de onda: $8 \mu\text{s} \pm 1 \mu\text{s}$
- Tempo até meio valor: $20 \mu\text{s} \pm 2 \mu\text{s}$

As especificações das correntes e tensões do gerador são mostradas na tabela 4.1, a seguir.

Tabela 4.1 - Especificações das correntes e tensões do gerador do LEAT.

Amplitude da corrente ±10%	Tensão residual V_{res} 8/20 μs*	Configuração do gerador para máxima V_{res}
10 Ka	25 – 350 kV	6 estágios em série/1 paralelo
20 kA	25 – 350 kV	6 estágios em série/1 paralelo
10 kA	25 – 1388 kV	12 estágio em série/1 paralelo
20 kA	25 – 990 kV	12 estágio em série/1 paralelo

* Estas tensões deverão ser medidas com o divisor de tensão especificado para o gerador de tensão de impulsos.

Fonte: (HAEFELY, 2008)

Algumas características construtivas do gerador de impulsos são:

- Altura aproximada do gerador (incluindo o eletrodo de topo): 10,3 m;
- Possui equipamento com eletrodo de topo dimensionado para que o gerador possa operar com tensão de impulso de manobra de 1600 kV em ambiente com espaço livre;
- Possui uma base para o gerador equipada com colchões de ar para movimentação sobre pisos nivelados nos ambientes de ensaio. Os colchões têm suportes intercambiáveis, providos de tubos de ar com válvula e mangueira de 20 m, sendo calibrados através de suprimento de ar comprimido existente na planta de ensaios. As dimensões da base garantem estabilidade segura para a movimentação do gerador sobre pisos nivelados e lisos, com todos os estágios montados;
- Possui gerador modular com estágios de 200 kV/30 kJ;
- Unidades de controle e medição: os sistemas de operação e medição são modulados em gabinetes padronizados adequados para operar em ambientes eletricamente agressivos, e independentes do gerador;
- Todas as blindagens, transformadores para isolamento galvânico da rede de energia, eventuais filtros e outros elementos recomendados pelo fabricante do gerador;
- Sistema digital de medição e registro das formas de onda.

4.4 Análise do Circuito *RLC* série do gerador

A análise que será realizada neste item terá o objetivo de deduzir a equação de corrente $i(t)$ para as três diferentes respostas do circuito *RLC*, subamortecida, criticamente amortecida e superamortecida. Considerando-se o circuito equivalente do gerador, deseja-se calcular a corrente $i(t)$ associada a descarga do banco de capacitores representado por C_s após o chaveamento do centelhador, esta é uma análise de um circuito *RLC* série sem fonte.

Consideremos que o circuito *RLC* série é excitado apenas pela energia inicialmente armazenada no capacitor, e o indutor encontra-se descarregado. Utilizando a lei de Kirchhoff das tensões para a malha do circuito, obtém-se a seguinte equação diferencial (Sadiku, 2008):

$$U_{ch} = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t i(t) dt \quad (4.1)$$

Derivando-se a equação 4.1, resulta na equação diferencial de segunda ordem, equação 4.2:

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC_s} i(t) = 0 \quad (4.2)$$

Analisando-se as condições iniciais para a equação tem-se:

A corrente no indutor é zero antes que a chave feche e zero imediatamente após a chave ser fechada, portanto:

$$i(0^+) = 0 \text{ A} \quad (4.3)$$

A energia armazenada no circuito provém unicamente do capacitor de carregamento e, portanto, seu valor é U_{ch} , desta forma temos:

$$v(0^+) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt = U_{ch} \quad (4.4)$$

Para resolver a equação diferencial de segunda ordem, equação 4.2, precisamos das condições iniciais do capacitor e do indutor, equações 4.3 e 4.4, e também o valor inicial de i e sua primeira derivada. Desta forma, resolvemos o circuito em função da corrente.

Obtemos o valor inicial da derivada de i , a partir das equações 4.1 e 4.4, e assim temos:

$$Ri(0) + L \frac{di(0)}{dt} + U_{ch} = 0 \quad (4.5)$$

Agora podemos substituir a equação 4.3 em 4.5, e assim obtemos:

$$\frac{di(0^+)}{dt} = -\frac{U_{ch}}{L} \quad (4.6)$$

É sugerido em (Sadiku, 2008) que a solução para este tipo de equação é na forma exponencial, e portanto, é utilizado $i = Ae^{st}$, onde A e s são constantes a serem determinadas

Substituindo $i = Ae^{st}$ na equação 4.2 e realizando as diferenciações necessárias, obtemos a equação 4.7 abaixo.

$$As^2e^{st} + \frac{AR}{L}se^{st} + \frac{A}{LC}e^{st} = 0 \quad (4.7)$$

De outra forma temos:

$$Ae^{st} \left(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} \right) = 0 \quad (4.8)$$

Como $i = Ae^{st}$ é a solução proposta que deseja-se encontrar, apenas a expressão entre parênteses pode ser zero, assim:

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (4.9)$$

A equação 4.9 é conhecida como equação característica da equação diferencial homogênea de segunda ordem (4.2).

As raízes da equação característica ditam o carácter de i , e tem a forma:

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (4.10)$$

$$s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (4.11)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (4.12)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.13)$$

As raízes s_1 e s_2 são chamadas de frequências naturais, e são medidas em nepers por segundo (Np/s), pois elas são associadas as respostas naturais do circuito; ω_0 é conhecida como frequência ressonante ou frequência natural não-amortecida e é expressa em radianos por segundo (rad/s); e finalmente, α é a frequência de neper ou fator de amortecimento expresso em nepers por segundo (Np/s). (Sadiku, 2008)

Os dois valores de s , equações 4.10 e , indicam que há duas soluções possíveis para i , assim temos:

$$i_1 = A_1e^{s_1t} \quad \text{e} \quad i_2 = A_2e^{s_2t} \quad (4.14)$$

Uma vez que a equação 4.2 é uma equação linear, qualquer combinação das duas soluções distintas de i_1 e i_2 também é uma solução da equação 4.12. Uma

solução completa ou total da equação 4.2 é uma combinação linear de (4.14), conseqüentemente, a resposta natural do circuito *RLC* série é:

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (4.15)$$

As constantes A_1 e A_2 são determinadas a partir dos valores iniciais de i e $di(0)/dt$, equações 4.3 e 4.6. Assim, a partir das equações 4.10 e 4.11, podemos obter três diferentes tipos de soluções:

1. Para $\alpha > \omega_0$, tem-se uma solução com amortecimento supercrítico ou superamortecida (raízes da equação característica reais e desiguais);
2. Para $\alpha = \omega_0$, tem-se uma solução de amortecimento crítico (raízes reais e iguais);
3. Para $\alpha < \omega_0$, tem-se o caso de subamortecimento (raízes complexas).

De posse destes resultados, analisa-se estas três possíveis formas de onda que podem ser obtidas com o circuito gerador de impulso de corrente.

4.4.1 Resposta de corrente superamortecida

Neste caso, quando $\alpha^2 > \omega_0^2$, ou seja, $R > 2\sqrt{L/C_s}$, as raízes do polinômio característico são reais e diferentes. Portanto, a resposta de corrente para este caso tem a forma:

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (4.16)$$

E sua derivada será:

$$\frac{di(t)}{dt} = s_1 A_1 e^{s_1 t} + s_2 A_2 e^{s_2 t} \quad (4.17)$$

Em que A_1 e A_2 são constantes que dependem das condições iniciais do circuito. Para a determinação destas constantes, substitui-se as condições iniciais (4.3) e (4.6) em (4.16) e em (4.17), respectivamente, obtendo-se o seguinte sistema de duas incógnitas, equação 4.18, abaixo:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = 0 \\ s_1 A_1 + s_2 A_2 = -\frac{U_{ch}}{L} \end{cases} \quad (4.18)$$

E então, resolvendo-se o sistema para A_1 e A_2 tem-se:

$$A_1 = -\frac{U_{ch}}{L(s_1 - s_2)} \quad (4.19)$$

$$A_2 = \frac{U_{ch}}{L(s_1 - s_2)} \quad (4.20)$$

Substituindo-se as constantes A_1 e A_2 em (4.16) obtém-se a resposta superamortecida de corrente do circuito RLC gerador de impulsos de corrente, equação (4.21).

$$i(t) = -\frac{U_{ch}}{L(s_1-s_2)}e^{s_1t} + \frac{U_{ch}}{L(s_1-s_2)}e^{s_2t} \quad (4.21)$$

$$i(t) = \frac{U_{ch}}{L(s_1-s_2)}(-e^{s_1t} + e^{s_2t}) \quad (4.22)$$

Em geral, a utilização desta condição está condicionada a geração de impulsos de corrente normalizados da forma $1/20 \mu s$.

4.4.2 Resposta de corrente criticamente amortecida

O circuito apresenta resposta de corrente criticamente amortecida quando $\alpha^2 = \omega_0^2$ ou $\omega_0 = \alpha$, ou seja, quando $R = 2\sqrt{L/C_s}$. Neste caso, haverá duas raízes reais e iguais para o polinômio característico:

$$s_1 = s_2 = -\alpha = -\frac{R}{2L} \quad (4.23)$$

Para este caso a equação 4.23 conduz a:

$$i(t) = B_1te^{-\alpha t} + B_2e^{-\alpha t} \quad (4.24)$$

Logo a resposta natural de um circuito com amortecimento crítico é a soma de dois termos, uma exponencial negativa e uma exponencial negativa multiplicada por um termo linear. A derivada da equação 4.25 é dada por:

$$\frac{di(t)}{dt} = B_1e^{-\alpha t} - B_1\alpha te^{-\alpha t} - B_2\alpha e^{-\alpha t} \quad (4.25)$$

Em que B_1 e B_2 , são constantes que dependem das condições iniciais do circuito. Para obtê-las substitui-se as condições (4.3) e (4.6) em (4.24) e (4.25), respectivamente. Como resultado, obtém-se:

$$B_1 = -\frac{U_{ch}}{L} \quad \text{e} \quad B_2 = 0 \quad (4.26)$$

Com isso, faz-se a substituição das constantes B_1 e B_2 em (4.24), obtendo-se a resposta criticamente amortecida do circuito gerador de impulsos de corrente, equação 4.27.

$$i(t) = -\frac{U_{ch}}{L}te^{-\alpha t} \quad (4.27)$$

Em geral, este caso não acontece na prática, pois devido as tolerâncias de valores nominais dos componentes que compõe o gerador de impulso torna-se quase impossível realizar a igualdade mostrada acima. (Barradas, 2014)

4.4.3 Resposta de corrente subamortecida.

Neste caso, quando $\alpha^2 < \omega_0^2$, ou seja, $0 < R < 2\sqrt{L/C_s}$, as raízes do polinômio característico são complexas conjugadas e tem a seguinte forma:

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{-(\omega_0^2 - \alpha^2)} = -\alpha + j\omega_d \quad (4.28)$$

$$s_2 = -\alpha - j\sqrt{-(\omega_0^2 - \alpha^2)} = -\alpha - j\omega_d \quad (4.29)$$

Onde $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, que é a frequência angular amortecida ou frequência de amortecimento. Tanto ω_0 quanto ω_d são frequências naturais, porque elas ajudam a determinar a resposta natural.

A resposta de corrente para esta situação é dada por:

$$i(t) = e^{-\alpha t} [D_1 \cos(\omega_d t) + D_2 \text{sen}(\omega_d t)] \quad (4.30)$$

Sendo a derivada igual a:

$$\frac{di(t)}{dt} = e^{-\alpha t} [K_1 \text{sen}(\omega_d t) + K_2 \cos(\omega_d t)] \quad (4.31)$$

Em que,

$$K_1 = -D_1 \omega_d - D_2 \alpha \quad (4.32)$$

$$K_2 = -D_1 \alpha + D_2 \omega_d \quad (4.33)$$

Na qual as constantes D_1 e D_2 dependem das condições iniciais do circuito. Para determiná-las, substitui-se as condições (4.3) e (4.6) em (4.30) e (4.31), respectivamente, de forma que:

$$D_1 = 0 \text{ e } D_2 = -\frac{U_{ch}}{L\omega_d} \quad (4.34)$$

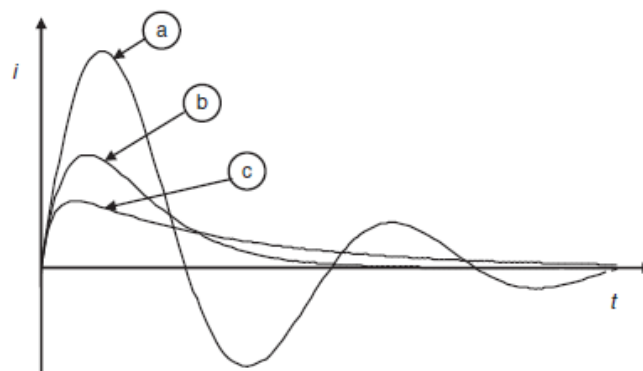
Após isto, faz-se a substituição das constantes D_1 e D_2 em (4.30) obtendo-se a resposta subamortecida do circuito gerador de impulsos de corrente, conforme equação (4.35).

$$i(t) = -\frac{U_{ch}}{L\omega_d} e^{-\alpha t} \text{sen}(\omega_d t) \quad (4.35)$$

A resposta senoidal amortecida por exponencial é a mais utilizada em laboratório, sendo possível a obtenção de impulsos de corrente normalizados com forma 4/10, 8/20 e 30/80 μs . (Barradas, 2014)

Assim, nota-se que a partir do circuito RLC é possível obter três respostas para o circuito do gerador, conforme mostra a figura 4.5. A resposta subamortecida, se a resistência (R) estiver compreendida no intervalo $0 < R < 2\sqrt{L/C_s}$, utilizada para gerar impulsos normalizados de 4/10 μs e 8/20 μs . A resposta criticamente amortecida, se $R = 2\sqrt{L/C_s}$. E uma resposta superamortecida, se $R > 2\sqrt{L/C_s}$. (Cooray, 2009).

Figura 4.5 - Respostas ao impulso de corrente para o circuito equivalente: (a) subamortecido, (b) criticamente amortecido e (c) superamortecido.



Fonte: (COORAY, 2009)

Da análise realizada neste item, pode-se destacar as seguintes propriedades do circuito *RLC* série do gerador:

- O comportamento deste circuito pode ser compreendido pelo conceito de amortecimento, que é a perda gradual da energia inicial armazenada. O efeito de amortecimento se deve à presença da resistência R . O fator de amortecimento α determina a taxa na qual a resposta é amortecida. Se $R = 0$, então $\alpha = 0$ e temos um circuito *LC* com $1/\sqrt{LC}$ como frequência natural não amortecida. Já que, nesse caso, $\alpha < \omega_0$, a resposta não é apenas não amortecida como também oscilatória. Desta forma, diz-se que o circuito está sem perdas, pois o elemento amortecedor ou dissipador R não está presente. Ajustando-se o valor de R a resposta pode ser não amortecida, superamortecida, criticamente amortecida ou então subamortecida.
- A resposta oscilatória é possível graças a presença de dois tipos de elementos de armazenamento. Ter tanto um indutor quanto um capacitor possibilita que o fluxo de energia fique indo e vindo entre os dois elementos. A oscilação amortecida, exibida pela resposta subamortecida, também é conhecida como oscilação circular.

Nas tabelas 4.2 a 4.4 são listados importantes parâmetros para cada uma das três respostas do circuito *RLC* série obtidos em (Cooray, 2009).

Tabela 4.2 - Parâmetros do circuito *RLC* subamortecido.

Condição	$0 < R < 2\sqrt{L/C_s}$
Forma de onda da corrente	$i = \frac{U_{ch}}{\omega L} \text{sen}(\omega t) \cdot e^{-t/\tau}$
Frequência angular	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC_s} - \frac{1}{\tau^2}}$
Frequência de oscilação	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_s} - \frac{1}{\tau^2}}$
Constante de tempo	$\tau = \frac{2L}{R}$
Tempo até o valor de crista	$T_{cr} = \frac{\arctan(\omega\tau)}{\omega}$
Valor da corrente de pico	$i_{max} = U_{ch} \sqrt{\frac{C_s}{L}} e^{-\left[\frac{\arctan(\omega\tau)}{\omega\tau}\right]}$
Máxima corrente de inclinação	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max} = \frac{U_{ch}}{L}$
Carga de impulso	$Q_i = \frac{U_{ch}}{L \left(\omega^2 + \frac{1}{\tau^2}\right)} \left(\frac{2}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}} - 1\right)$
Energia específica	$\frac{W}{R} = \frac{U_{ch}^2}{4\omega^2 L^2} \frac{\tau}{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}$
Relação de tempo de frente/tempo de decaimento	$0,263 < \frac{T_1}{T_2} < 0,482$

Fonte (COORAY, 2009)

Tabela 4.3 - Parâmetros do circuito *RLC* criticamente amortecido

Condição	$R = 2\sqrt{L/C_s}$
Forma de onda da corrente	$i = \frac{U_{ch}}{L} t e^{-\frac{t}{\tau}}$
Constante de tempo	$\tau = 2L/R$
Tempo até o valor de crista	$T_{cr} = \tau$
Valor de pico da corrente	$i_{max} = \frac{2 U_{ch}}{e R} = 0,736 \frac{U_{ch}}{R}$
Máxima corrente de inclinação	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max} = \frac{U_{ch}}{L}$
Impulso de carga	$Q_i = U_{ch} C_s$
Energia específica	$\frac{W}{R} = \frac{U_{ch}^2 C_s}{4} \sqrt{\frac{C_s}{L}}$
Relação de tempo de frente/ tempo de decaimento	$\frac{T_1}{T_2} = 0,263$

Fonte: (COORAY, 2009)

Tabela 4.4 - Parâmetros do circuito *RLC* superamortecido

Condição	$R > 2\sqrt{L/C_s}$
Forma de onda da corrente	$i = \frac{U_L}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C_s}}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$
Constante de tempo de decaimento	$\tau_1 = \frac{1}{\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_s}}}$
Constante de tempo de frente	$\tau_2 = \frac{1}{\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_s}}}$
Valor do tempo até a crista	$T_{cr} = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}$
Valor da corrente de pico	$i_{max} = \frac{U_L}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C_s}}} \left(e^{-\frac{T_{cr}}{\tau_1}} - e^{-\frac{T_{cr}}{\tau_2}} \right)$
Máxima corrente de inclinação	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max} = \frac{U_{ch}}{L}$

Carga do impulso	$Q_i = \frac{U_L}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C_s}}} (\tau_1 - \tau_2) = U_L C_s$
Energia específica	$\frac{W}{R} = \frac{\frac{U_L^2}{2}}{R^2 - \frac{4R}{C_s}} \frac{(\tau_1 - \tau_2)^2}{\tau_1 + \tau_2}$
Relação de tempo de frente/tempo de decaimento	$0 < \frac{T_1}{T_2} < 0,263$

Fonte (COORAY, 2009)

4.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram abordados os principais aspectos que cobrem a teoria do gerador de impulso de corrente, como as formas de onda obtidas, o circuito gerador multiestágio, bem como a modelagem do circuito equivalente *RLC*. Estes conceitos serão de grande importância para o entendimento do funcionamento o gerador e, por conseguinte, auxiliar na modelagem do mesmo.

CAPÍTULO 5- METODOLOGIA DA MODELAGEM COMPUTACIONAL E ENSAIOS DE TENSÃO RESIDUAL EM PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO.

5.1 Introdução

No presente capítulo serão mostradas as simulações realizadas no software ATPDraw para o ensaio de tensão residual em para-raios de óxido de zinco bem como o ensaio propriamente dito, com para-raios provenientes de projeto de P&D ANEEL com o Grupo Equatorial (CELPA e CEMAR), que disponibilizaram a compra de para-raios para os ensaios no laboratório de Alta e Extra Alta Tensão da UFPA. O P&D visa a alocação ótima de para-raios em alimentadores pilotos da concessionária, logo as características dos para-raios (tensão residual) perante o comissionamento aos níveis de coordenação de isolamento foram testados. O modelo elétrico do gerador de impulsos de corrente utilizado foi proposto por (WADWHA, 2007), e o modelo de para-raios utilizado foi proposto por (Fernandez, 2001). Os modelos foram simulados e posteriormente realizados ensaios de tensão residual no para-raios em laboratório, e com isso os resultados obtidos foram comparados. Essas comparações se devem à validação dos modelos utilizados em laboratório.

5.2 Ensaio de Tensão Residual em Para-raios de Óxido de Zinco.

O ensaio de tensão residual em para-raios revela os níveis de sobretensão permitidos por para-raios quando por ele flui a corrente de descarga nominal, sendo esta tensão um importante parâmetro para cálculos de coordenação de isolamento da rede. Esses testes são realizados em laboratórios de alta tensão utilizando um gerador de impulso de corrente, de forma que os para-raios são submetidos a impulsos de corrente padronizados de alta magnitude, e são medidos os valores de tensão residual nos seus terminais (SCHON, 2013).

Segundo (NBR 16050, 2012), a tensão residual U_{res} do para-raios é o valor de crista da tensão entre os terminais do para-raios, durante a passagem de uma corrente elétrica impulsiva. O objetivo dos ensaios de tensão residual é medir a tensão que surge nos terminais do para-raios quando por ele flui sua corrente de descarga nominal e para todas as correntes e formas de onda especificadas, determinando-se os níveis de proteção dos para-raios ensaiados. O ensaio de tensão residual é especificado nos ensaios de tipo, de rotina e recebimento. São também especificados

com impulsos de corrente íngreme, atmosférica e de manobra sob diferentes amplitudes nos para-raios de ZnO.

Este ensaio pode ser realizado em para-raios completos ou seções representativas. Caso se utilizem seções representativas de para-raios nos ensaios, torna-se necessária a determinação das tensões residuais correspondentes ao para-raios completo. A máxima tensão residual, para um determinado projeto de para-raios, para qualquer corrente e forma de onda é calculada com base nos resultados dos ensaios de tipo realizados em seções proporcionais ou no para-raios completo, multiplicado por um fator de escala específico. O fator de escala é igual a relação entre o valor de tensão residual máxima garantida pelo fabricante e o valor de tensão residual medida na seção sob ensaio. Para a mesma corrente e forma de onda, e quando o ensaio for realizado em para-raios completo, o fator de escala é igual a unidade. Em para-raios de colunas múltiplas, o ensaio pode ser efetuado sobre seções constituídas de uma coluna com amplitude de corrente obtida pela divisão da corrente total pelo número de colunas. Os tempos de aplicações de impulso devem ser tal que permitam que os corpos de prova sob ensaio retornem à temperatura ambiente. (NBR16050, 2012)

O ensaio deve ser efetuado sobre três corpos de prova novos de para-raios ou seções representativas. Para tensões nominais inferiores a 3 kV, os ensaios devem ser realizados no para-raios completo. Nos demais para-raios, devido às limitações existentes dos equipamentos de ensaio, os ensaios podem ser realizados em seções de no mínimo 3 kV, não necessitando ultrapassar os 12 kV (NBR16050, 2012). No caso deste trabalho, o para-raios utilizado foi de tensão nominal 30kV, e foram realizados ensaios em toda a coluna de óxido de zinco, desconsiderando o desligador automático, a fim de medir a tensão residual apenas nas pastilhas de óxido de zinco.

Em relação aos procedimentos previstos na norma, no ensaios de tipo, cada um dos corpos de prova devem ser aplicados impulsos de corrente com valores de crista de 0,5; 1,0; e 2,0 vezes a corrente de descarga nominal do para-raios e tolerância de 5 %, ou seja, valores de corrente de 5kA, 10kA ou 20kA de corrente de descarga fluindo pelo para-raios. Já nos ensaios de rotina e recebimento esses valores podem variar entre 0,1 e 2,0 vezes os valores de corrente de descarga nominal, esses valores podem ser escolhido em comum acordo entre as partes

envolvidas no ensaio (NBR 16050, 2012). No trabalho proposto foram aplicadas correntes de descarga nos valores 5kA e 10kA, pois o laboratório apesar de ter capacidade de gerar essa corrente a partir do gerador de impulsos de corrente, não tem a impedância Shunt adequada para medição de correntes de 20kA.

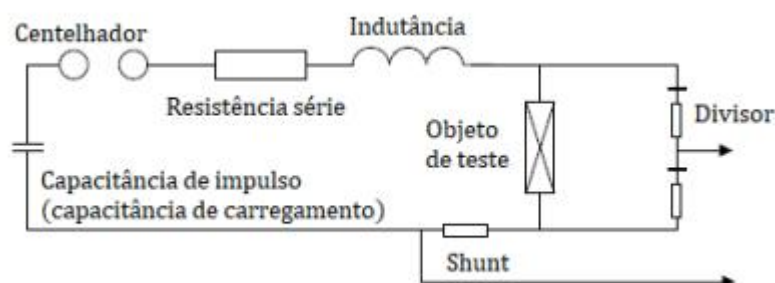
Os impulsos de corrente devem ter a forma 8/20 μ s, sendo que o tempo virtual de frente deve estar entre 7 μ s a 9 μ s. O tempo de cauda, por não ser crítico para este ensaio, pode assumir qualquer valor, porém, para evitar a aplicação excessiva de energia ao para-raios, é aconselhável que o tempo de cauda não seja superior a 25 ms (NBR16050, 2012).

Os valores máximos das tensões residuais calculadas, para o para-raios completo devem ser utilizados para o levantamento da curva característica tensão residual x corrente de descarga. A tensão residual obtida dessa curva, correspondente à corrente de descarga nominal, é definida como sendo o nível de proteção a impulso atmosférico do para-raios (NBR16050, 2012).

Em relação ao ensaio de tensão residual à impulso atmosférico, o para-raios é considerado aprovado, se a tensão residual medida entre seus terminais está abaixo da máxima garantida pelo fabricante. Além disto, não deve haver alterações significativas em sua estrutura física, tais como, perfurações, rachaduras ou excesso de temperatura após a passagem da corrente de descarga (Barradas, 2014).

O circuito de ensaio de tensão residual é mostrado a seguir.

Figura 5.1: Circuito para realização do ensaio de tensão residual.



Fonte: KURZ, 2010

5.3 Montagem do ensaio de Tensão residual no LEAT UFPA.

O circuito de ensaio de tensão residual foi confeccionado no LEAT UFPA com para-raio de pastilhas de óxido de zinco. Sua tensão nominal U_r é de 30kV e seu MCOV de 24,4kV. Os dados elétricos de ensaios são mostrados no catálogo do fabricante conforme as figuras 5.3 e 5.4.

Figura 5.2- Para-raios utilizado



Fonte: Autor.

Figura 5.3 - Características elétricas do para-raios.

Tensão Nominal (kV rms)	Tensão de Operação Contínua (kV rms)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente Íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)					
				Para-raios 5kA			Para-raios 10kA		
				2,5kA	5kA	10kA	5kA	10kA	20kA
30	24,4	110	80	93,3	99	112,8	93,3	99,0	112,8

Fonte: Adaptado do Fabricante

Figura 5.4 - Características Mecânicas do para-raios

A(mm)	B(mm)	C(mm)	Distância de arco (mm)	Distância de escoamento (mm)	Peso (kg)	
					5kA	10kA
327	98	160	300	660	4,10	4,80

Fonte: Adaptado do Fabricante

O gerador de impulsos de corrente tem sua configuração escolhida de acordo com o valor de tensão residual do para-raios a ser ensaiado. Logo, a configuração mais adequada é a 1s2p, para uma forma de onda 8/20 μ s com tensões residuais entre 25kV e 100kV. A configuração é mostrada na tabela 5.1.

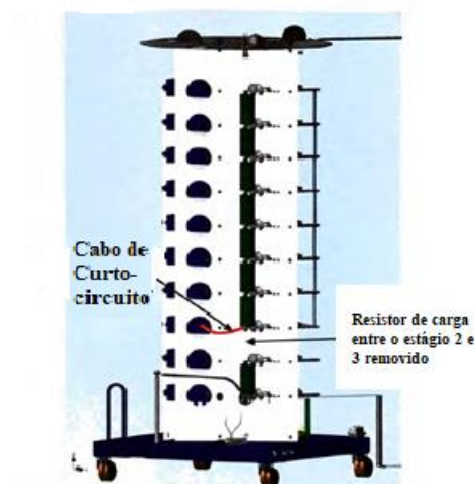
Tabela 5.1 – Configuração 1s2p do gerador de impulsos de tensão

Configuração do gerador:	1s2p (1 série, 2 paralelo)
Tensão de carga por estágio:	Aproximadamente: 50kV – 90kV
Shunt de medição de corrente:	SH-Q-0.1 (0,1 Ω)
Resistor série interno:	Nenhum
Indutâncias internas:	30 μ H + 1x10 μ H//30 μ H
Posição externa do plug-in:	Barra de curto-circuito

Fonte: Autor

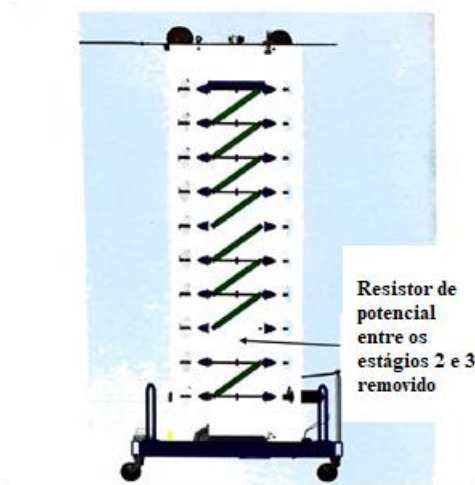
Nas figuras 5.5 e 5.6 são mostrados os arranjos realizados no gerador de impulsos para obtermos a configuração desejada. Os curto-circuitos nos estágios acima servem para que, após a descarga, os capacitores isolados não se carreguem e possam causar acidentes ou descargas nos equipamentos adjacentes, já a retirada do resistor de equipotencial secciona o circuito a fim de desconectar os estágios 2 e 3. Os estágios superiores também são curto-circuitados afim de que a corrente não percorra os capacitores superiores aos estágios em uso, assim formando um caminho para a corrente até o objeto sob ensaio, de acordo com a figura 5.7.

Figura 5.5 - Curto-circuito nos estágios não utilizados do gerador de impulsos para tensões residuais entre 25kV e 100kV



Fonte: (HAEFELY, 2011)

Figura 5.6 - Retirada do resistor de equipotencial entre os estágios 2 e 3 do gerador de impulsos de corrente.



Fonte: (HAEFELY, 2011)

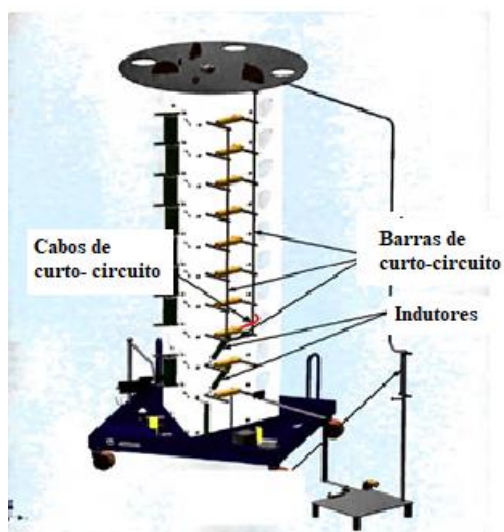
Figura 5.7 - Barras de curto-circuito dos estágios superiores.



Fonte: Autor.

Os resistores de carregamento entre os estágios 2 e 3 também são retirados, de acordo com a figura 5.8.

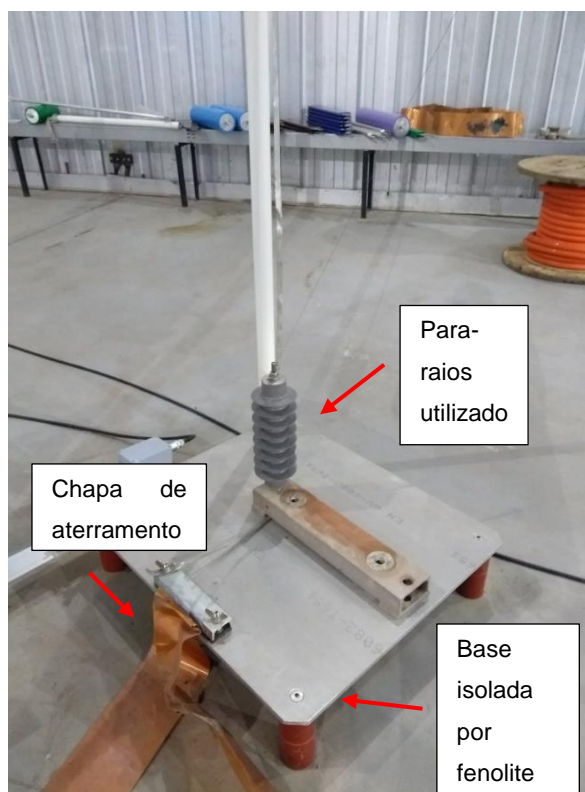
Figura 5.8 - Desconexão do resistor de carregamento e indutâncias sugeridas pelo manual Haefely.



Fonte: (HAEFELY, 2011)

O ensaio foi confeccionado em uma base isolado do plano de terra por cilindros isolantes (fenolite), com o aterramento conectado a base por chapas de cobre e conectado a parte inferior do para-raios por cordoalhas de alumínio, de acordo com a figura 5.9.

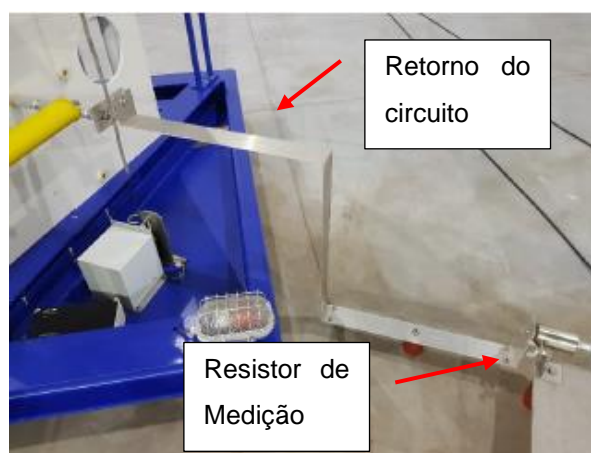
Figura 5.9 – Para-raios para ensaios no LEAT.



Fonte: Autor

Na figura 5.10, temos o retorno do circuito que se dá por uma seção plana da plataforma ao gerador de impulso e tubo de alumínio à placa do gerador de impulsos, ligado ao sistema de medição shunt.

Figura 5.10 - Retorno do circuito (seção plana).



Fonte: Autor

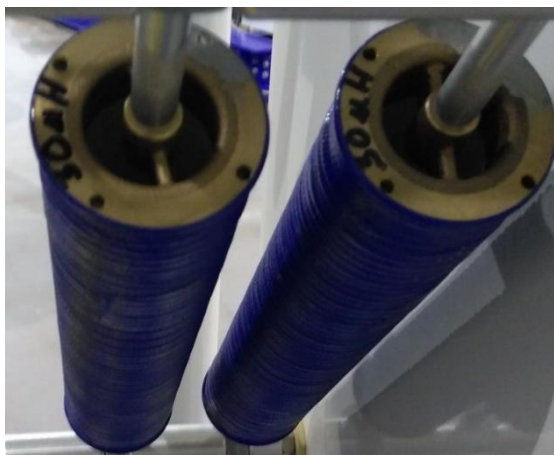
Indutâncias de descarga com valores nominais de 10 μH e 30 μH , figuras, respectivamente, e os resistores paralelos são mostrados nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13.

Figura 5.11 - Indutância de descarga de 10 μH .



Fonte Autor

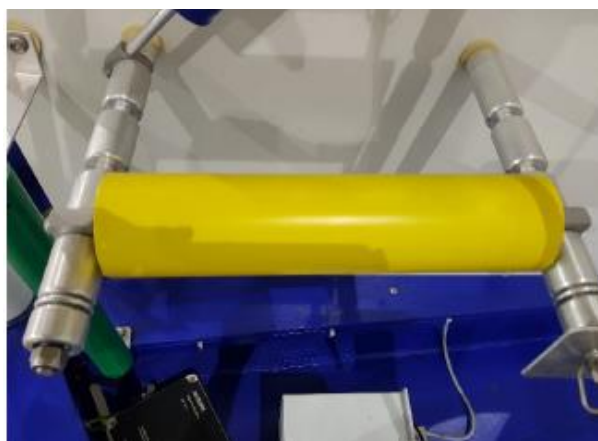
Figura 5.12 - Indutância de descarga de 30 μH .



Fonte Autor

Resistência em paralelo com valor nominal de 2400 Ω , figura 5.13.

Figura 5.13 - Resistências em série de 2400 Ω .



Fonte: Autor

Shunt de medição de corrente SH-Q-0,1 (0,1 Ω) para a medição da forma de onda 8/20 μ s com 10 kA, figura 5.14.

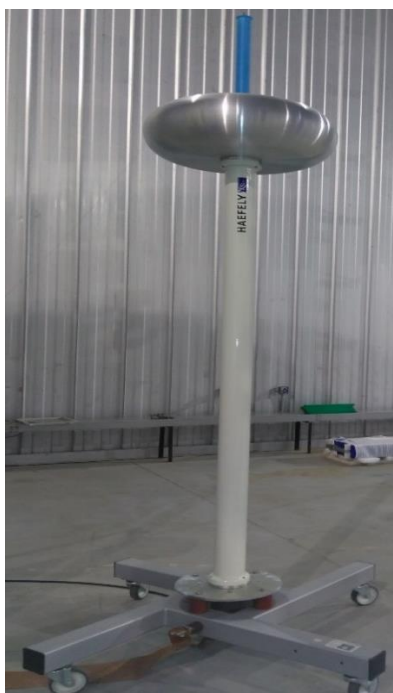
Figura 5.14 - Shunt de medição de 0,1 Ω



Fonte Autor

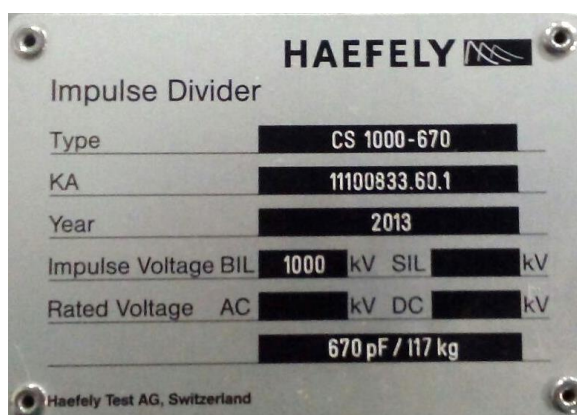
Divisor de tensão capacitivo com resistor de amortecimento CS1000-670 (300 Ω e 670 pF) para a medição da tensão residual, figura 5.15. Os dados de placa do divisor são apresentados na figura 5.16, e o arranjo do divisor no sistema é mostrado na figura 5.17.

Figura 5.15 - Divisor capacitivo com resistor de amortecimento.



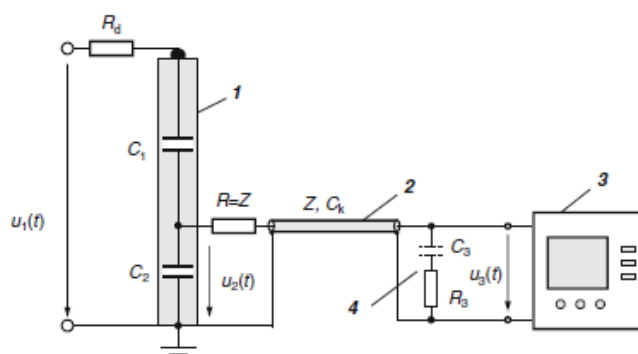
Fonte: Autor

Figura 5.16 - Dados de placa do divisor capacitivo com resistor de amortecimento



Fonte: Autor

Figura 5.17 - Arranjo do divisor capacitivo com resistor de amortecimento. (1) Divisor de tensão capacitivo, (2) cabo coaxial com impedância de surto, (3) Gravador digital, (4) terminação C_3R_3 para cabos coaxiais longos.



Fonte (SCHON, 2013)

Capacitor de carregamento com capacitância de $2\mu\text{F}$ e tensão máxima de carregamento de 100 kV conforme figura 5.18 .

Figura 5.18 - Dados de placa do capacitor de carregamento.



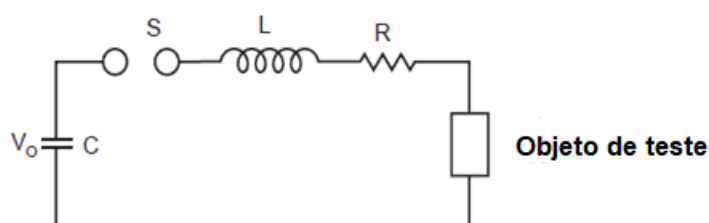
Fonte: Autor

5.4 Modelagem do circuito de ensaio de tensão residual em para-raios de ZnO

5.4.1 Modelagem do gerador de impulsos de corrente

O modelo utilizado do gerador de impulsos foi proposto por (Whadwa), na figura 5.19 é mostrado um circuito equivalente do gerador onde os capacitores são todos pré-carregados por uma fonte DC de modo paralelo e é descarregado com todos os capacitores em série, assim a capacitância total e a indutância total do circuito dada como uma associação série de todos os componentes por estágio. Assim os valores de capacitância total diminuem, e os valores de indutância de cada estágio são somados. Deste modo o circuito equivalente é mostrado na figura abaixo.

Figura 5.19-Modelo do Gerador de impulsos e para-raios.



Fonte: Adaptado de (WHADWA, 2007)

Este modelo foi implementado a partir da capacitância equivalente em série com a indutância equivalente do circuito, compondo assim um circuito equivalente RLC do gerador.

5.4.2 Modelagem do para-raios de 30kV

Existem vários modelos de para-raios dependentes da frequência na literatura, foram comparados 3 modelos de para-raios para as simulações realizadas no ATP Draw. O modelo do IEEE Working Group (1989), modelo de Pinceti (1999) e modelo de Fernandez (2001). A obtenção dos parâmetros foi realizada de acordo com as equações mostradas no capítulo 3, e realizadas comparações entre os modelos escolhendo-se o de melhor acurácia para impulsos de corrente da forma $8/20\mu\text{s}$ e também para impulsos de corrente íngreme na forma de $1/2\mu\text{s}$. O resultado da comparação dos modelos pode ser visto no capítulo 6, a partir destes resultados escolhemos o modelo de Fernandez como o de melhor acurácia e com menor dificuldade para obtenção dos parâmetros, dado que o modelo precisa apenas de algumas informações presentes no datasheet do equipamento.

No modelo de Fernandez temos um capacitor com seu valor em função das características físicas do para-raios, especialmente de sua altura, em paralelo com uma resistência de alto valor ôhmico. Também existem 2 resistores não-lineares separados por uma indutância, que funciona como um filtro para altas frequências.

Segundo Fernandez (2001) para o modelo em questão, qualquer pastilha de supressor de surtos pode ser representado por múltiplas pastilhas de óxido de zinco de 1kV, assim configurando uma associação em série de várias pastilhas dependendo da tensão nominal do espécime em estudo.

Desta forma temos que a capacitância do modelo pode ser encontrada de acordo com a equação abaixo:

$$C = \frac{100}{d} pF = \frac{100}{0,327} = 305,81 pF \quad (5.1)$$

Onde d é a altura do para-raios desconsiderando o religador automático.

O valor de resistência considerado foi na ordem de $G\Omega$, segundo Fernandez, para evitar erros numéricos na execução do método trapezoidal no ATP. No modelo apresentado foi escolhido o valor de $1G\Omega$.

As resistências não lineares $A0$ e $A1$ foram encontradas de acordo com Fernandez e Diaz, de forma que são funções de uma pastilha de óxido de zinco de 1kV, também chamada de pastilha de óxido de zinco elementar, onde a sua curva é mostrada de acordo com a tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Característica predefinida de tensão e corrente dos blocos elementares

Máxima tensão residual (kV)		Corrente de descarga para impulso 8/20 μ s (A)		
Bloco de 5 kA	Bloco de 10 kA	I	I_0	I_1
2,87	2,73	1500	30	1470
3,07	2,90	3000	60	2940
3,27	3,07	5000	100	4900
3,60	3,33	10000	200	9800
4,27	3,77	20000	400	19600
5,30	4,53	40000	800	39200

Fonte: (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

A partir da tabela 5.2, pode-se traçar a curva das resistências não-lineares A0 e A1, onde são funções do parâmetro “n”.

O valor de n é encontrado a partir da relação do valor de tensão residual para uma corrente de descarga de 10kA e forma de onda de 8/20 μ s, conforme equação 5.2

$$n = \frac{U_{r8/20} \text{ do para-raios completo}}{U_{r8/20} \text{ do bloco elementar de 1 kV}} \quad (5.2)$$

Pela equação 5.2 temos:

$$n = \frac{99kV}{3,33kV} = 29,73$$

Visto que, a tensão residual de impulso de corrente nominal atmosférico do bloco elementar e do para-raios completo (manual do fabricante) são 3,33 kV e 99 kV respectivamente, o fator n será aproximadamente 29,73. Ao multiplicar esse fator pelos valores de tensão residual para um determinado valor de corrente de descarga de um bloco elementar, tem-se a característica de tensão *versus* corrente utilizadas nos resistores não-lineares A0 e A1 do para-raios completo que podem ser vistas nas tabelas 5.3 e 5.4, respectivamente.

Tabela 5.3 – Curva V_{xl} do resistor não-linear A0.

Máxima tensão residual (kV)	Corrente de descarga para impulso 8/20 μs(A)
75,91857	30
80,6461	60
85,37363	100
92,60397	200
104,83993	400
125,97477	800

Fonte: Autor

Tabela 5.4 - Curva V_{xl} do resistor não-linear A1.

Máxima tensão residual (kV)	Corrente de descarga para impulso 8/20 μs(A)
75,91857	1470
80,6461	2940
85,37363	4900
92,60397	9800
104,83993	19600
125,97477	1470

Fonte: Autor

Por fim, para o cálculo do parâmetro L , utilizou-se dois dados do datasheet do fabricante, que foram a Tensão residual para impulso de corrente nominal de 10kA e tensão residual para impulso de corrente íngreme com frente de onda de 1 μ s. De acordo com a equação 5.3, temos que:

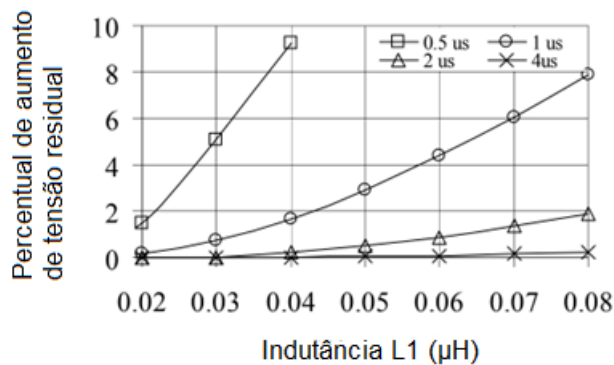
$$\Delta U_{res} = \frac{U_{r,T1} - U_{r8}}{U_{r8/20}} \times 100 \quad (5.3)$$

Pela equação 5.3 temos:

$$\frac{110kV - 99kV}{99kV} = 11,11\%$$

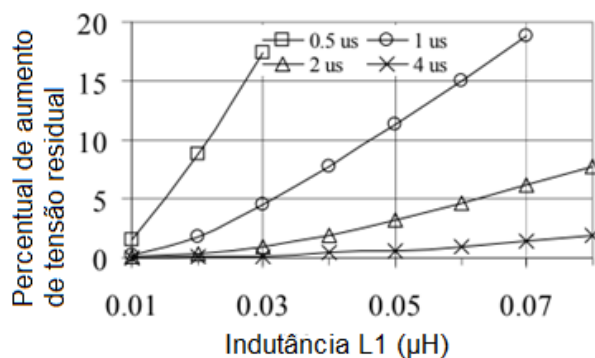
Com o valor do percentual de aumento de tensão residual podemos encontrar o valor da indutância L do modelo de Fernandez e Diaz a partir das figuras 5.20 e 5.21.

Figura 5.20- Curvas para a definição de L_1 no modelo para o bloco de 5 kA



Fonte: (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

Figura 5.21- Curvas para a definição de L_1 no modelo para o bloco de 10 kA



Fonte: (FERNANDEZ E DIAZ, 2001).

Com o valor de ΔU_{res} podemos fazer a correlação com o gráfico da figura 5.21 utilizando a curva correspondente a $1\mu s$ de tempo de frente. A partir desta correlação encontra-se que o L' é aproximadamente $0,05\mu H$.

Deste modo, pode-se encontrar o valor de L a partir da equação 5.4.

$$L = n \times L' \quad (5.4)$$

Pela equação 5.4 temos:

$$L = n \times L' = 29,73 \times 0,05 = 1,4865\mu H$$

5.5 Considerações finais do capítulo

De posse de todos os parâmetros, as simulações foram realizadas no software ATP draw, e também os ensaios no para-raios foram realizados no gerador de impulsos de corrente do Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão da UFPA com o para-raios de 30kV da fabricante.

CAPÍTULO 6- ANÁLISE DO CIRCUITO DE ENSAIO E RESULTADOS.

6.1 Comparação dos modelos dependentes da frequência

Foram realizadas simulações de todos os modelos citados, no software ATP, pela interface ATP Draw. Os parâmetros foram calculados para um para-raios com as especificações do fabricante.

Os modelos foram conectados a um modelo simplificado do gerador de impulso de corrente do Laboratório de Extra-Alta Tensão da UFPa (LEAT), de acordo com o modelo mostrado por Whadwa (2007), que é mostrado na figura 5.19. Para conseguir uma forma de onda de corrente de descarga de aproximadamente 8/20 μ s e 1/2 μ s para 10 kA, os parâmetros de capacitância, resistência, indutância e tensão de carregamento do gerador do gerador foram escolhidos de acordo com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Parâmetros do gerador de Impulso de Corrente.

	U0 (kV)	C (μ F)	L(mH)	R(Ω)
8/20 μ s	500	0.4	0.21	30
1/2 μ s (IEEE)	65	0.4	0.0019	2.38
1/2 μ s (Pincetti)	65	0.4	0,0019	2.75
1/2 μ s (Fernandez)	65	0.4	0,0019	2.6

Fonte: Autor

Onde:

C: Capacitância do gerador de impulso de corrente;

L: Indutância do gerador de impulso de corrente;

R: Resistência do gerador de impulso de corrente.

U0: Tensão de carregamento dos capacitores

Os parâmetros do gerador para uma forma de onda 8/20 μ s foram similares para cada um dos modelos implementados, segundo a Tabela 6.1. Porém para uma forma de onda 1/2 μ s, os parâmetros do modelo do para-raios começam a ter uma influência

na forma de onda de corrente de descarga, por isso os ajustes nos dados do gerador para a obtenção de uma forma de mais próxima da proposta.

Os tempos de crista para o impulso de corrente 1/2 μ s, 10 kA foram os mesmos para os três modelos, porém, mesmo com os valores de resistências diferentes, os tempos de cauda foram iguais; com uma pequena diferença no amortecimento das formas de onda.

Os circuitos simulados são mostrados nas figuras 6.1 a 6.3. As curvas analisadas são correspondentes a impulsos de corrente de formas de onda 8/20 μ s e 1/2 μ s para 10 kA. Os tempos de frente e de cauda foram calculados conforme (NBR 16050, 2012), para impulso de corrente normalizado.

Para efeitos de comparação, foi definido o erro relativo entre os valores simulados e os disponíveis em catálogos de fabricantes, o qual pode ser mensurado de acordo com a equação 6.1.

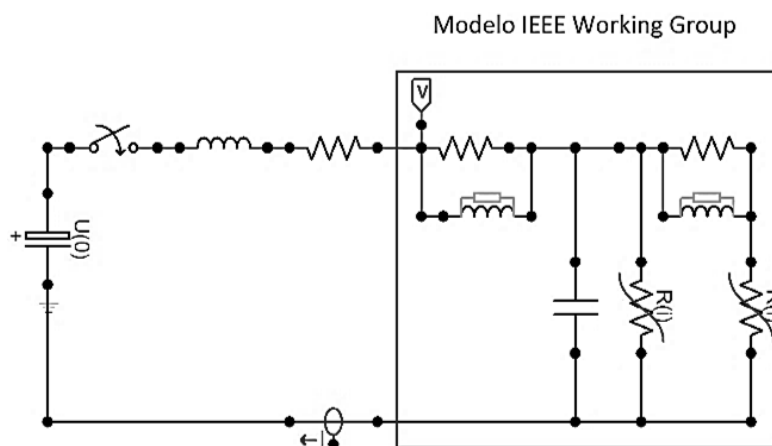
$$\varepsilon\% = \frac{V_{rsim} - V_{rens}}{V_{rens}} \times 100 \quad (6.1)$$

De modo que:

V_{rsim} : Tensão Residual Simulada no ATP;

V_{rens} : Tensão Residual do catálogo do Fabricante.

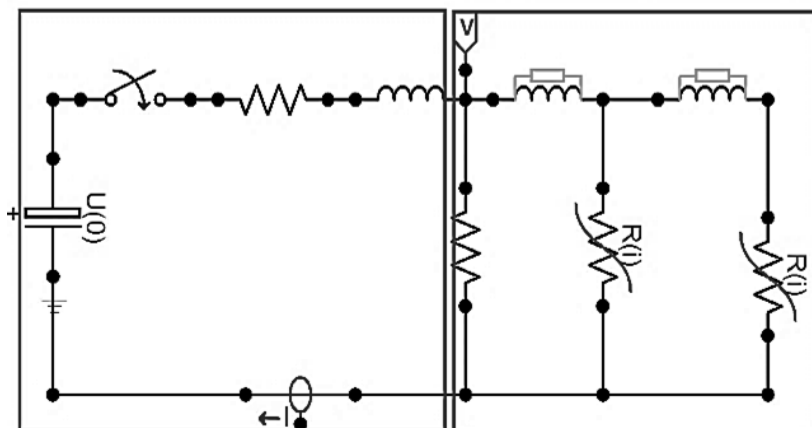
Figura 6.1 - Modelo proposto pelo IEEE Working Group 3.4.11 em ATP Draw.



Fonte: Autor

Figura 6.2 - Modelo proposto por Pincetti em ATP Draw.

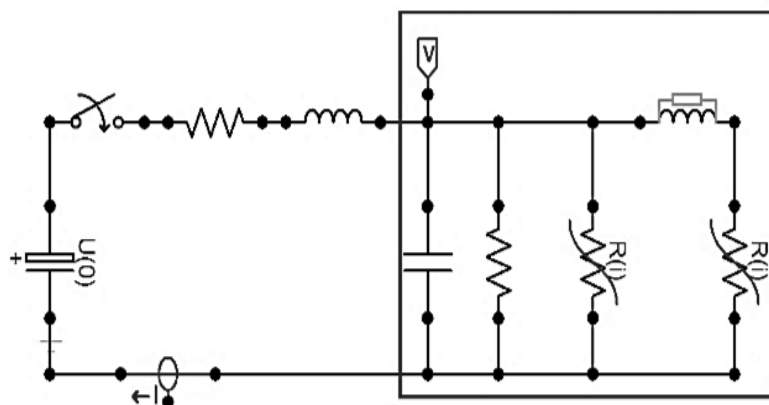
Gerador de Impulso de Corrente Modelo Pincetti



Fonte: Autor

Figura 6.3 - Modelo proposto por Fernandez em ATP Draw.

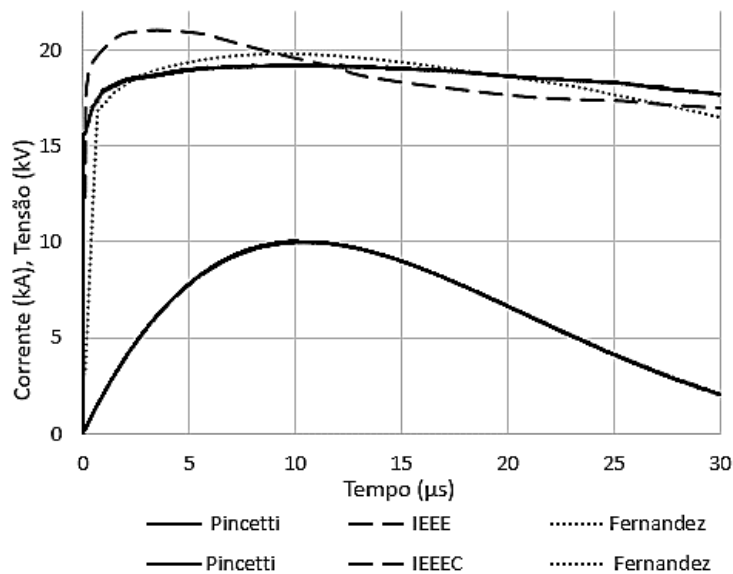
Modelo Fernandez



Fonte: Autor

Os resultados das simulações são mostrados na Figura 6.4.

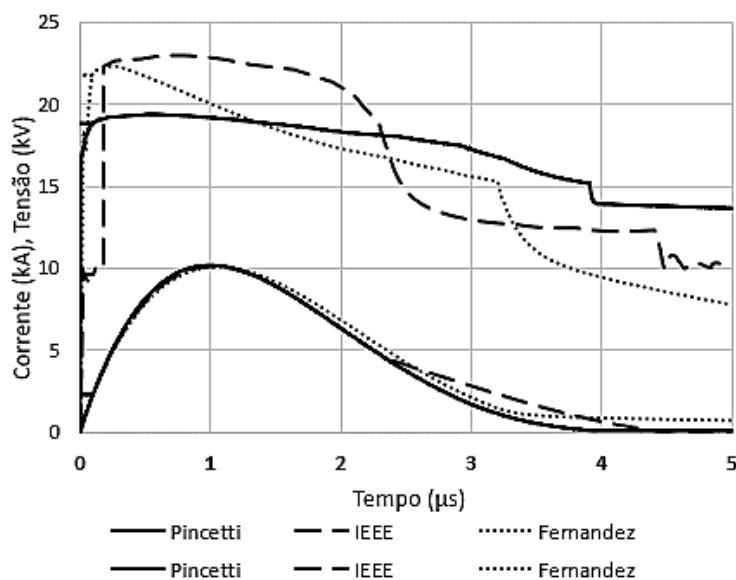
Figura 6.4 - Comparação das curvas de corrente de descarga e tensão residual dos modelos propostos - 8/20 μ s.



Fonte: Autor

Foram realizadas também simulações para impulso de corrente íngreme 1/2 μ s e o resultado é mostrado na Figura 6.5.

Figura 6.5 - Comparação das curvas de corrente de descarga e tensão residual dos modelos propostos - 1/2 μ s



Fonte: Autor

Verifica-se em todos os modelos a presença do efeito indutivo, com o tempo de crista das tensões residuais sempre menor do que o tempo de crista do impulso de corrente normalizado 8/20 μ s.

Isso ocorre pelo fato dos modelos recorrerem a filtros indutivos separando resistências não-lineares, o que também influencia no aumento da tensão residual para impulsos de corrente com tempos de frente de onda rápidas, entre 1 e 8 μ s.

De acordo com os cálculos de erro relativo mostrado na Tabela 6.2, o modelo apresentado em Fernandez (2001) conseguiu o melhor desempenho para formas de onda 8/20 μ s com um erro relativo de 0,045%, o modelo IEEE Working Group 3.4.11 (IEEE, 1992) obteve o maior erro relativo devido ao dimensionamento da indutância L1 no circuito implementado, pois segundo (IEEE, 1992) se faz necessário um ajuste dessa indutância para melhor aproximar o modelo ao apresentado em catálogo do fabricante.

Tabela 6.2 - Erro Relativo das tensões residuais para os modelos propostos – Corrente 10kA 8/20 μ s.

Modelos	Vrsim	Vrens	ϵ(%)
IEEE	21,23	19,8	5,815
Pincetti	19,16	19,8	3,321
Fernandez	19,79	19,8	0,045

Fonte: Autor

Observa-se na Tabela 6.3 uma pequena diferença entre as correntes de descarga para cada um dos modelos, essa diferença foi encontrada, pois foram escolhidos parâmetros diferentes para o gerador de impulso para os três modelos propostos. Para a forma de onda 1/2 μ s, o circuito tende a ter um efeito maior das indutâncias do circuito e assim uma impedância equivalente diferente a ponto de modificar, de forma considerável, a forma de onda da corrente de descarga. Portanto, a análise será feita para os mesmos valores de resistência e indutância do gerador de impulso de corrente.

Tabela 6.3 - Erro Relativo das tensões residuais para os modelos propostos – Corrente 10kA 1/2 μ s.

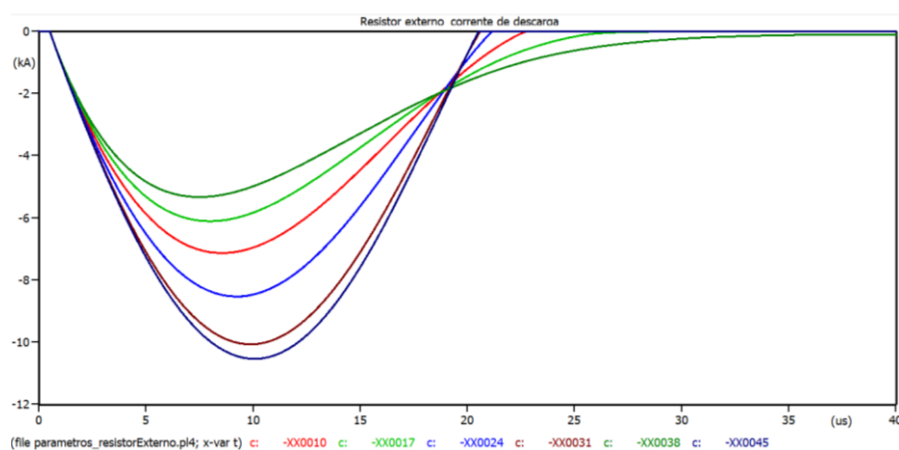
Modelos	Vrsim (kV)	Vrens (kV)	ϵ%
IEEE	23,007	21,9	5,0502
Pincetti	19,39	21,9	11,461
Fernandez	22,33	21,9	1,963

Fonte: Autor

6.2 Análise do Circuito do Gerador de Impulsos de corrente

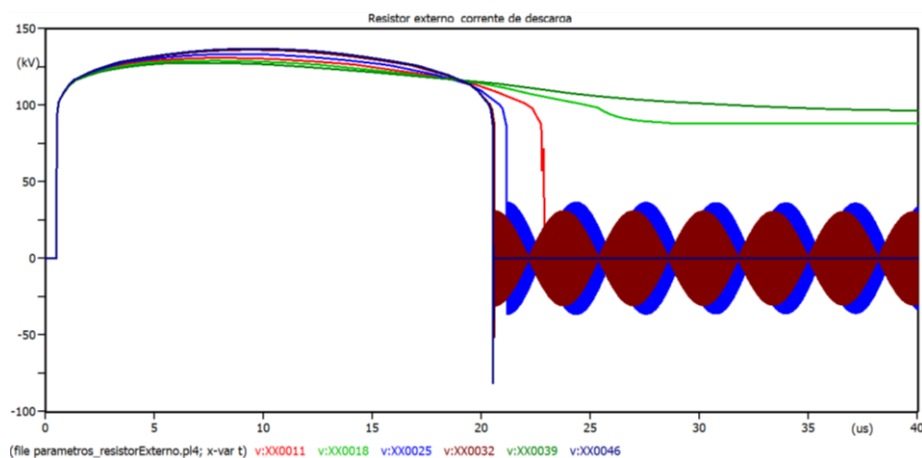
O efeito do resistor externo é amortecer a forma de onda da corrente de descarga, e diminuir a magnitude desta corrente, como mostra a figura 6.6. Nesta figura, pode-se notar que quanto maior o valor da resistência externa, menor é a amplitude da corrente e maior é a distorção (amortecimento da forma de onda). Já o comportamento desta resistência externa na tensão residual também diminui a magnitude da tensão residual e causa amortecimento da forma de onda, portanto, com o aumento da resistência externa maior é o amortecimento da forma de onda da corrente de descarga, e conseqüentemente a tensão residual, como é mostrado na figura 6.7. Porém no gerador de impulsos do LEAT, não temos este resistor, podendo apenas realizar ajustes nas indutâncias para ajuste de forma de onda.

Figura 6.6 - Influência do resistor externo na corrente de descarga



Fonte: Ferreira, 2015

Figura 6.7 - Influência do resistor externo na tensão residual

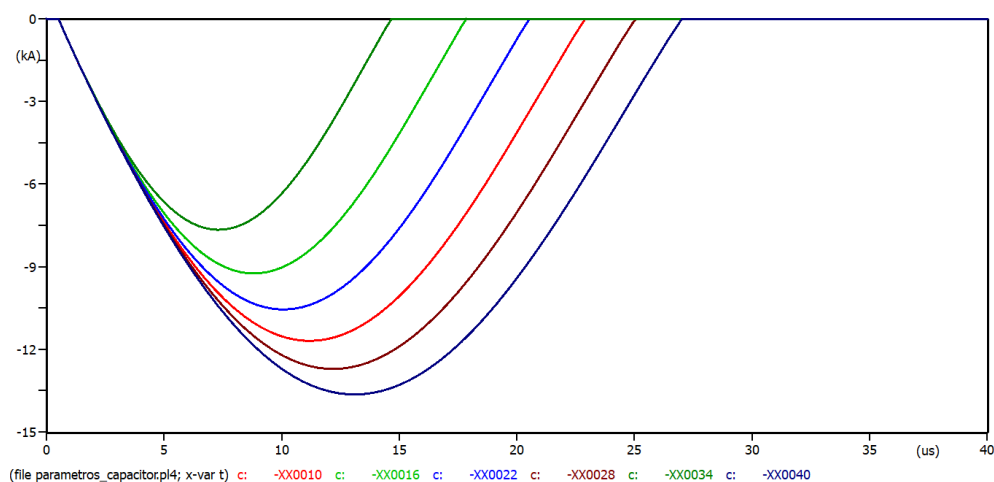


Fonte: Ferreira, 2015

O efeito da capacitância do circuito é alterar a capacidade de geração de corrente de descarga e alterar os valores do tempo de frente (T_1) e tempo de meio

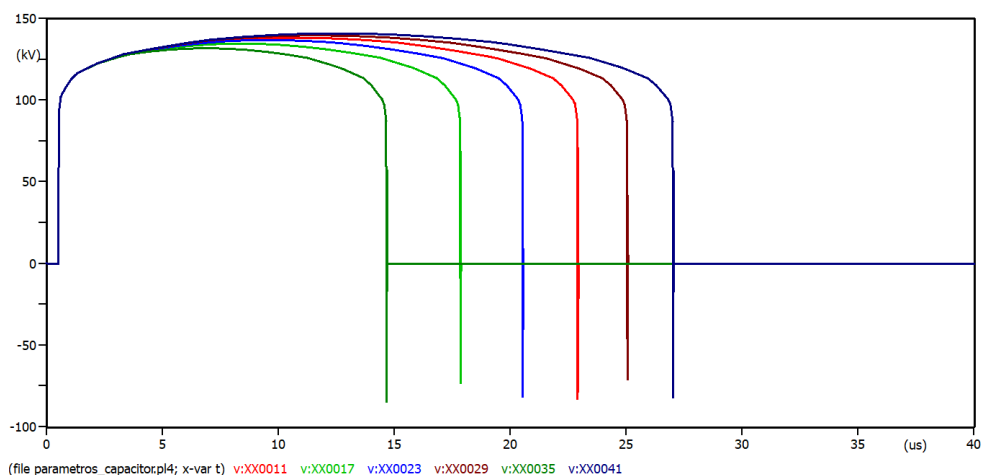
valor (T_2). Como mostra a figura 6.8, quanto maior a capacitância, maior é a magnitude da corrente de descarga e maiores são os tempos de frente e de meio valor. Já o efeito do aumento da capacitância na tensão residual é aumentar a duração da tensão residual e também a magnitude da tensão residual conforme mostra a figura 6.9.

Figura 6.8 - Influência da capacitância do capacitor de carga na corrente de descarga.



Fonte: Ferreira, 2015

Figura 6.9 - Influência da capacitância do capacitor de carga na tensão residual.

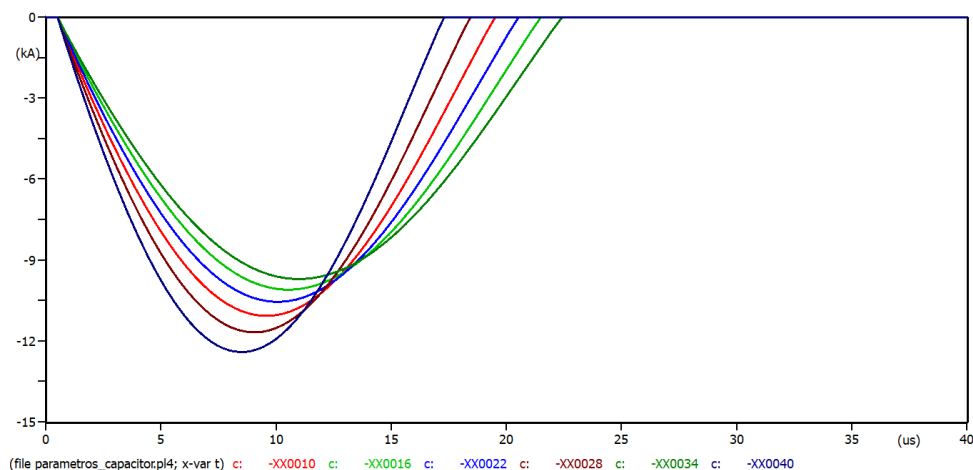


Fonte: Ferreira, 2015

Já o efeito da indutância na corrente de descarga é semelhante ao efeito do capacitor, porém atua de maneira inversa, pois para altas correntes ela aumenta sua impedância e com o aumento da indutância externa do gerador, tem-se um amortecimento da corrente de descarga. A indutância também altera a magnitude da corrente de descarga e os tempos de frente e de meio valor. Assim, quanto maior a indutância menor é a magnitude da corrente de descarga e maiores são os tempos de frente e de meio valor, conforme é mostrado na figura 6.10. O comportamento da

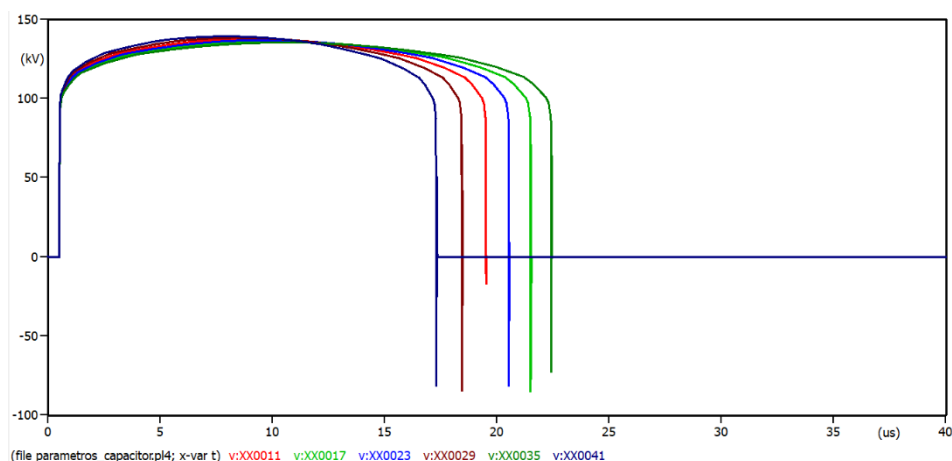
tensão residual é semelhante ao da descarga de corrente, ou seja, aumentando-se o valor da indutância, diminui-se o valor de tensão residual e mais longa é a sua duração, conforme é ilustrado na figura 6.11.

Figura 6.10 - Influência da indutância na corrente de descarga.



Fonte: Ferreira, 2015

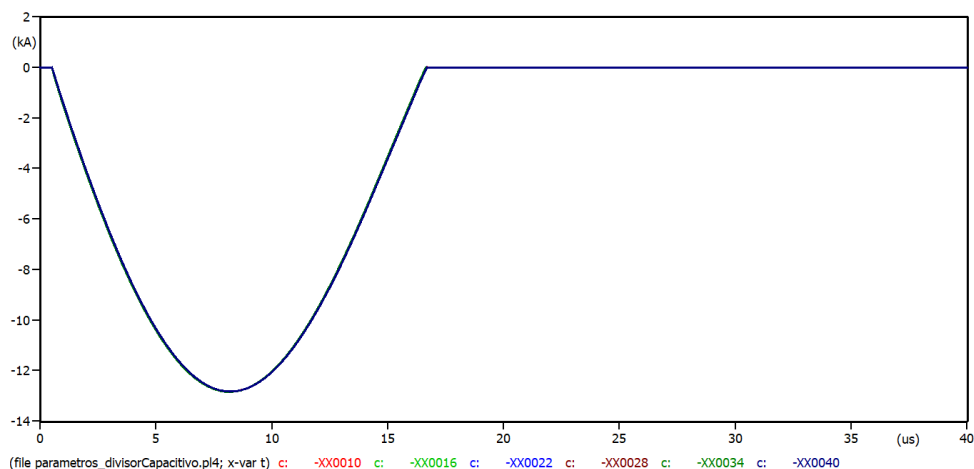
Figura 6.11 - Influência do indutor na tensão residual.



Fonte: Ferreira, 2015

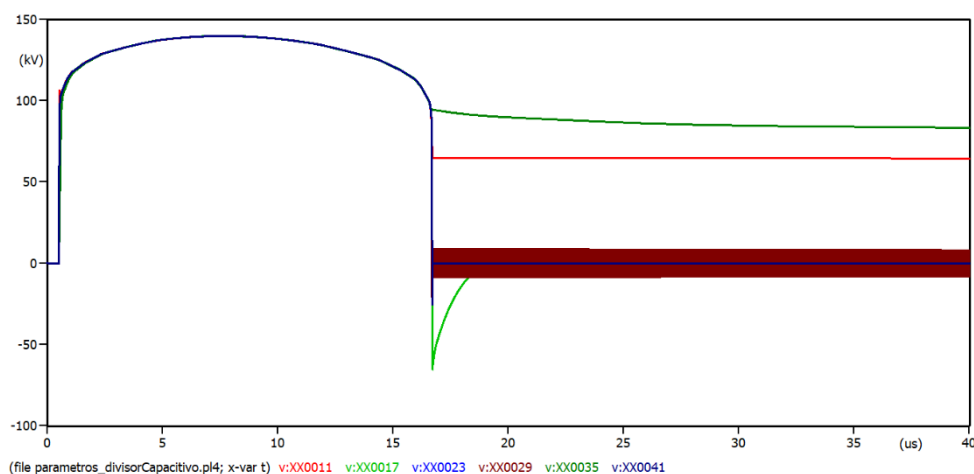
O efeito do aumento da capacitância do divisor capacitivo com resistor de amortecimento na corrente de descarga é desprezível como ilustrado na figura 6.12, pois sua função é realizar a medição e, portanto, o divisor capacitivo não deve influenciar nos resultados, por isso são utilizados nos ensaios divisores com baixas capacitâncias da ordem de pico faraday (pF) e resistências de amortecimento geralmente na ordem de 300 a 600 Ω . O conjunto do divisor do LEAT possui uma capacitância total de 670 pF e uma resistência de amortecimento de 300 Ω , como foi mostrado na figura 5.17. O efeito do divisor capacitivo na tensão residual é apenas amortecer as oscilações desta forma de onda e, portanto, quanto maior a capacitância maior é o amortecimento, conforme é ilustrado na figura 6.13.

Figura 6.12 - Influência do divisor capacitivo com resistor amortecimento na corrente de descarga.



Fonte: Ferreira, 2015

Figura 6.13 - Influência do divisor capacitivo com resistor amortecimento na tensão residual.



Fonte: Ferreira, 2015

De posse dessas análises pode-se analisar os resultados das simulações e comparações com o circuito de ensaio.

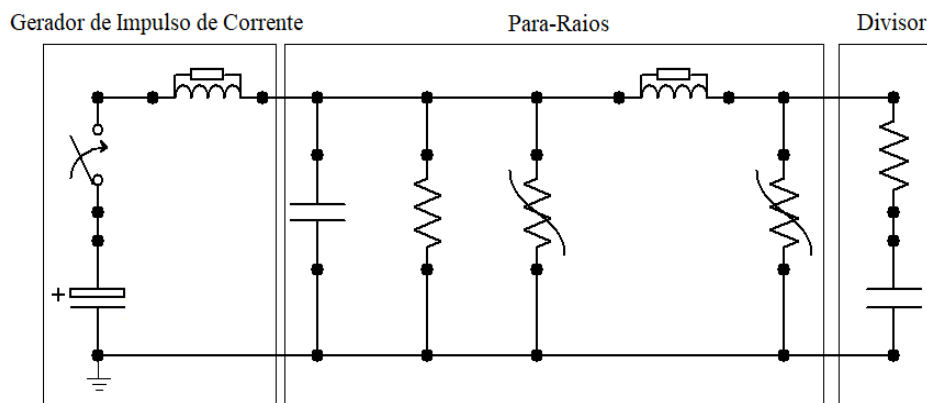
6.3 Simulações e Ensaios

Para a simulação do ensaio de tensão residual no para-raios foram utilizados dois impulsos: um de 5 kA, 50% da descarga nominal do para-raios, e outro de 10 kA, 100% da descarga nominal do mesmo para-raios, ambos com forma de onda com um tempo de frente virtual (T_1) de aproximadamente $8 \mu s$ e um tempo de meio-valor (T_2) de aproximadamente $17 \mu s$, para uma inversão de polaridade de impulso que não ultrapasse 20% da crista de corrente, conforme recomendado pelas normas.

De modo a gerar uma representação mais didática e adequada ao circuito equivalente do gerador do LEAT, foram realizadas algumas adaptações no circuito. O resultado é mostrado na figura 6.14. As alterações realizadas foram:

- Foi utilizado na simulação capacitores pré-carregados. Pois basicamente a fonte DC (retificador) faz o carregamento momentos anteriores ao descarregamento dos capacitores, assim não influenciando na forma de onda.
- A chave simula o comportamento do centelhador do gerador. Sendo o tempo de comutação dessa chave superior a constante de tempo do circuito de modo que garanta o descarregamento total do capacitor.
- Retirada do resistor externo: a forma de onda da corrente de impulso, obtida no gerador de impulso de corrente do LEAT, não apresentou distorções (ou amortecimento), desta forma, deve-se considerar que a resistência externa associada as perdas ôhmicas e ao efeito pelicular foram desprezadas, portanto, $R_{ext} = 0$.
- Resistor interno inexistente no circuito do gerador de impulsos de corrente do LEAT, sendo possível apenas fazer modificações na indutância interna do circuito, limitando o gerador a efetuar apenas corrente de descargas próximas da forma de onda de $8/20\mu s$.
- Inserção do divisor capacitivo com resistor de amortecimento: A tarefa do divisor de tensão é permitir a captura da tensão residual sob o objeto de teste além de entregar na saída do terminal uma verdadeira cópia em escala reduzida da tensão do objeto sobre teste. Outra tarefa do divisor capacitivo com resistor de amortecimento é diminuir as oscilações de tensão decorrente de ondas viajantes. Já para o circuito simulado, ele diminui a oscilação decorrente de convergência numérica do ATP, porém, devido ao seu baixo valor, não interfere de maneira significativa no resultado atuando apenas na diminuição da oscilação.

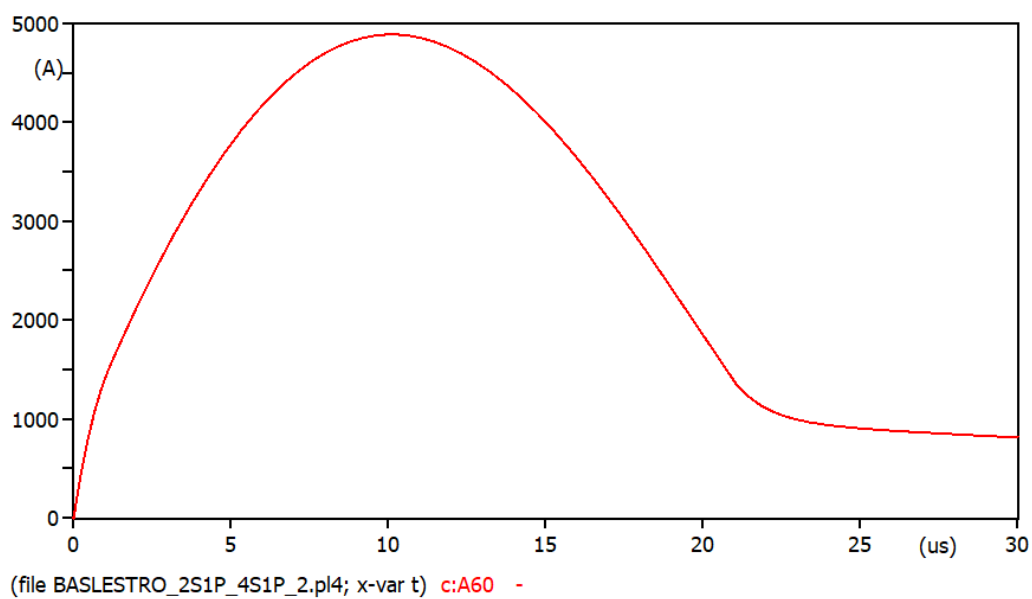
Figura 6.14 - Modelo do Gerador de impulsos, divisor de tensão e modelo do para-raios de Fernandez (2001) no ATP.



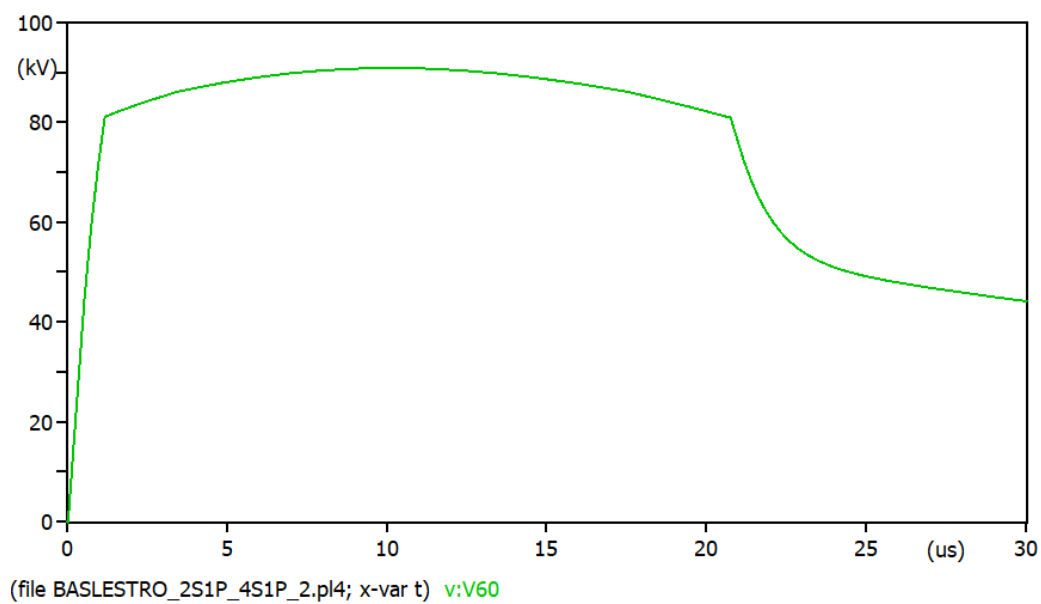
Fonte: Autor

As formas de onda obtidas nas simulações no ATP são mostradas nas figuras 6.15 e 6.16. As formas de onda obtidas nos ensaios de tensão residual no LEAT são mostradas nas figuras 6.17 e 6.18. Elas são provenientes do software de aquisição de dados Hias 773 da fabricante Haefely, através de um relatório da ferramenta "Report".

As formas de onda produzidas no ensaio e nas simulações evidenciaram similaridades, com diferenças nos tempos de frente e de cauda. Todavia, isso se deve à modelagem dos parâmetros de indutância e capacitância do circuito, onde foram consideradas apenas as capacitâncias do capacitor de carregamento e as indutâncias série do circuito do gerador. Conseguiu-se correntes de descarga com valores similares, e a tensão de carregamento dos capacitores na simulação foram ajustadas com o método de tentativa e erro. Porém percebemos na tabela 6.4 uma diferença de valores entre a tensão residual medida no ensaio e a encontrada na simulação, isso se deve ao valor de tensão residual real encontrado do para-raios, dado que foi adquirido com os ensaios de tensão residual para a forma de onda 8/20 μ s e amplitude de corrente de descarga de 10kA. Deste modo, os cálculos dos parâmetros foram repetidos para o valor de tensão residual real do para-raios, e não mais o valor de tensão residual máxima encontrado no catálogo do fabricante, mudando todos os parâmetros do modelo a ser simulado no ATP.

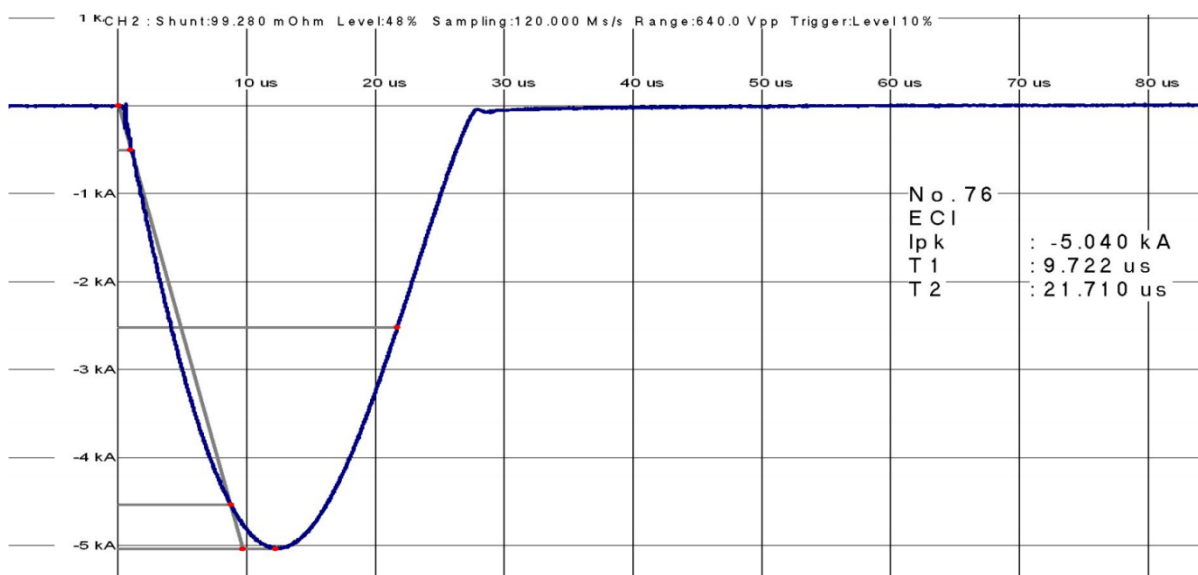
Figura 6.15 – Corrente de Descarga 5kA, Para-raios Balestro de $U_n = 30\text{kV}$ 

Fonte: Autor

Figura 6.16 – Tensão Residual para Corrente de Descarga de 5kA, Para-raios Balestro de $U_n = 30\text{kV}$ 

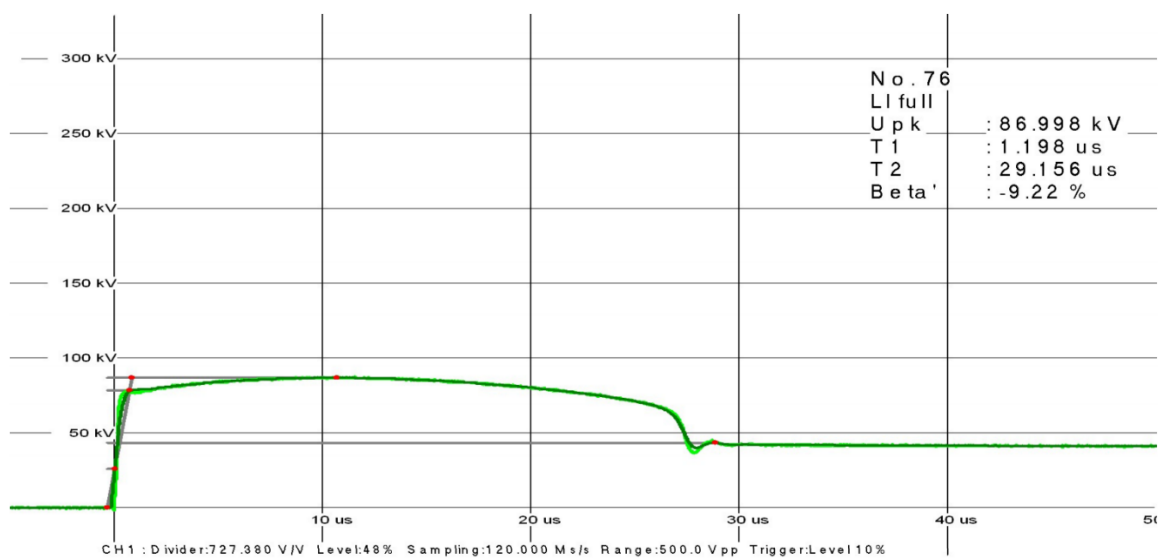
Fonte: Autor

Figura 6.17 – Forma de onda da corrente de descarga 5kA no DIAS 773.



Fonte: Autor.

Figura 6.18 – Forma de Onda da Tensão residual no DIAS 773.



Fonte: Autor.

Tabela 6.4 – Parâmetros da forma de onda para o ensaio de tensão residual; Comparação de valores de ensaio e de simulação.

Configuração 2 estágios, C=1,0μF

Simulação no ATP			Ensaio no Gerador de Impulso de Corrente		
Corrente de Descarga (kA)	Tensão Residual (kV)	Forma de onda (μs)	Corrente de Descarga (kA)	Tensão Residual em (kV)	Forma de onda (μs)
4,9	91,05	8,07/18,75	5,040	85,92	9,722/21,710

De acordo com (PAUL, 1994), a indutância de tiras de metais finos pode ser calculada a partir da equação 6.2.

$$L = 0,002 \times l \left[\ln \left(\frac{4 \times l}{d} \right) - 1,0 + \frac{d}{2 \times l} + \frac{\mu_r T(x)}{4} \right] (\mu H) \quad (6.2)$$

Onde d é o diâmetro em cm, l é o comprimento em cm e f é a frequência em Hz; e

$$T(x) = \frac{\sqrt{0.873011 + 0.00186128x}}{1 - 0.278381x + 0.127964x^2} \quad (6.3)$$

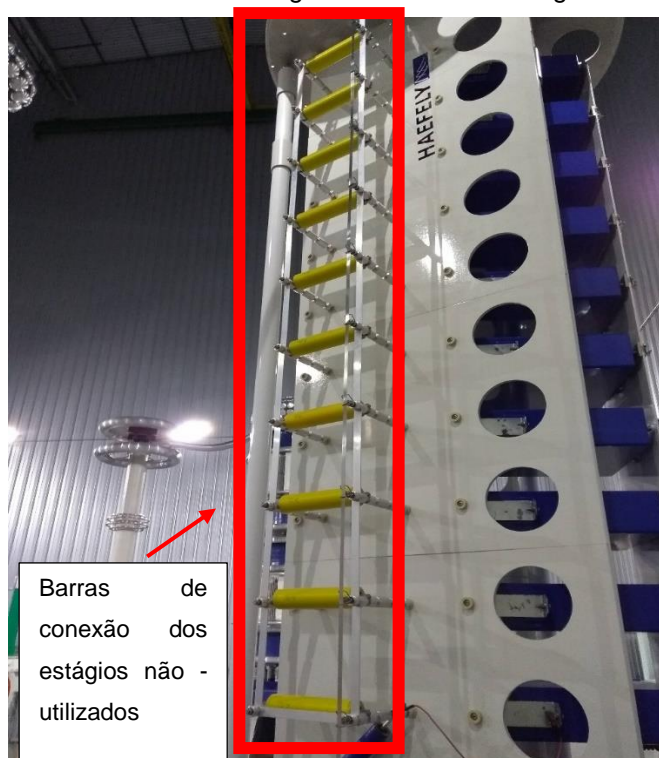
$$x = 2\pi r \sqrt{2\mu \frac{f}{\sigma}} \quad (6.4)$$

Onde r é o raio do condutor em cm, μ é a permeabilidade magnética absoluta do condutor e σ é a condutividade do condutor.

No entanto, pode-se verificar que as indutâncias dos cabos utilizados influenciam diretamente na forma de onda das tensões residuais e corrente de descarga; em que essas indutâncias e capacitâncias são intrínsecas as partes físicas e conexões do gerador. Para estimar esses valores, foram calculados de acordo com a equação acima de acordo com as suas dimensões físicas, e também por meio de acréscimos de indutância no circuito simulado para se obter formas de onda próximas a forma de onda obtida no ensaio em laboratório.

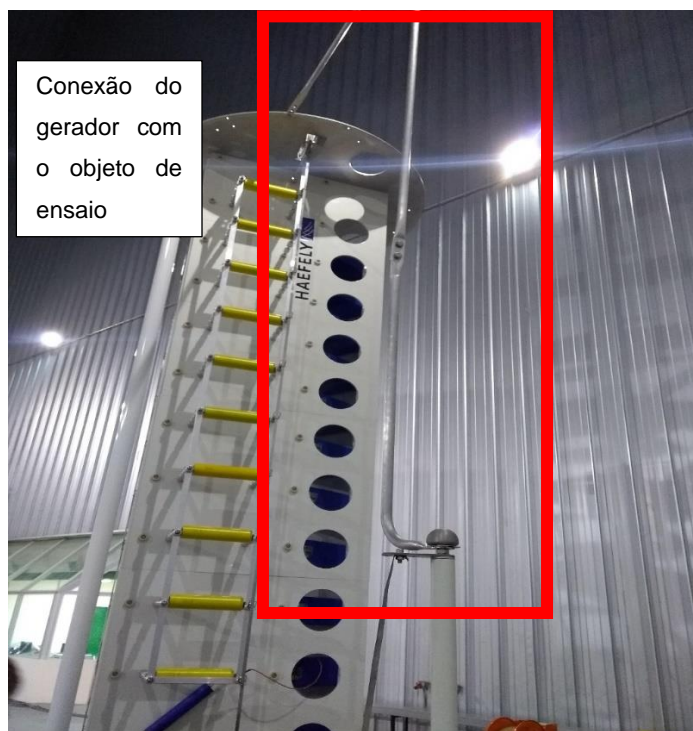
Nas figuras 6.19, 6.20 e 6.21, temos o circuito de ensaio e as conexões entre o gerador e o para-raios.

Figura 6.19 – Barras de curto-circuito dos estágios não utilizados no gerador de impulsos de corrente



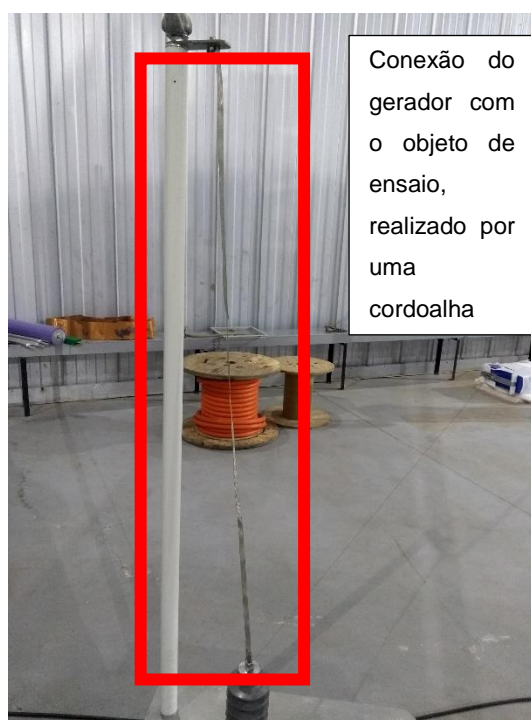
Fonte: Autor.

Figura 6.20 – Barras de conexão do último estágio do gerador até o suporte isolador do objeto de ensaio



Fonte: Autor.

Figura 6.21 – Cordoalha de alumínio para conexão com o para-raios.



Fonte: Autor.

Utilizando a equação 6.2, e considerando o tempo de crista da forma de onda de $8\mu\text{s}$, tem-se uma frequência de 125kHz. Para o material de alumínio, que tem sua permeabilidade relativa $\mu_r = 1,00002$ e condutância $\sigma = 3,72 \times 10^{-7} \text{ S/m}$, obtém-se uma indutância associada as conexões do circuito de $L=12,442\mu\text{H}$.

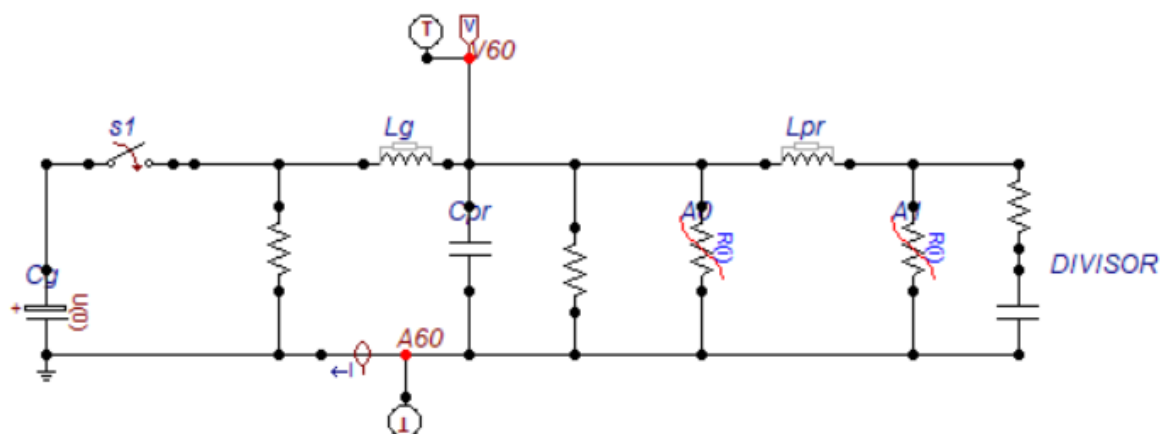
Podemos associar o valor da indutância das conexões ao parâmetro de indutância do gerador L_g , e com isso, afirmar que a indutância total do circuito se deve a indutância de descarga do gerador (um parâmetro variável do circuito), somada a indutância intrínseca as conexões do gerador de impulsos com o para-raios.

Outro ponto importante é que os dados de placa do para-raios mostram os valores máximos de tensão residual que o mesmo pode atingir para fins de cálculos de comissionamento da coordenação de isolamento. Deste modo, quando realizado o ensaio em laboratório foi percebido que os valores de tensão residual no para-raios foram menores do que os dados de placa, assim atestando um bom desempenho do mesmo frente a corrente de descarga nos valores de 5kA e 10kA. Porém quando encontrado os parâmetros do modelo de para-raios pode-se ver que o valor de pico de tensão residual depende exclusivamente do valor de tensão residual único deste para-raios, frente a isso foi realizada uma atualização no valor de tensão residual do

para-raios utilizado, trocando-se o valor de placa que é de 99kV para valores encontrados no ensaio, de 94kV.

A partir destas adaptações e correções, pode-se encontrar novos valores para os parâmetros de indutância total do circuito do gerador e também a nova referência de tensão residual máxima para cálculos de A_0 , A_1 e L_{pr} . Na figura 6.22 é mostrado o circuito montado no ATP.

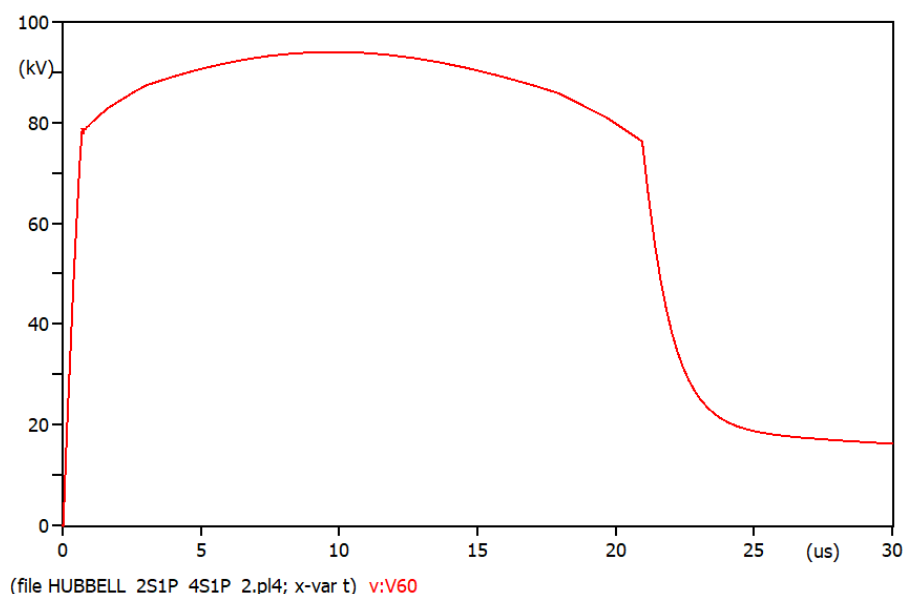
Figura 6.22 – Circuito de ensaio implementado no ATP Draw.



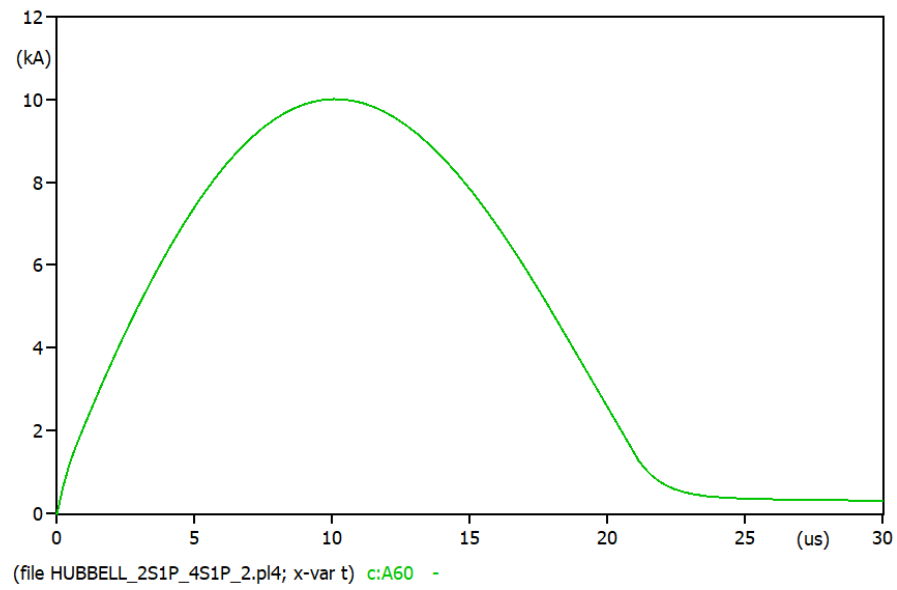
Fonte: Autor

Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 e comparados na tabela 6.5, onde pode ser visto uma correspondência entre as formas de onda obtidas nas simulações com as formas de onda obtidas por meio do ensaio em laboratório.

Figura 6.23 – Tensão residual para corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s no ATP Draw.

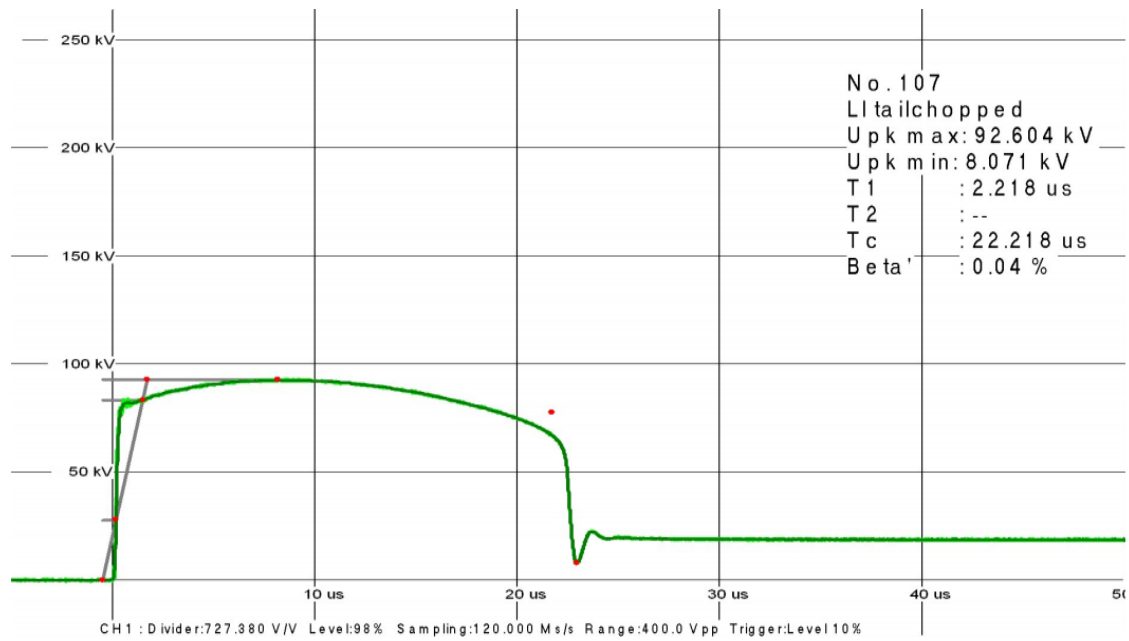


Fonte: Autor

Figura 6.24 – Corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s

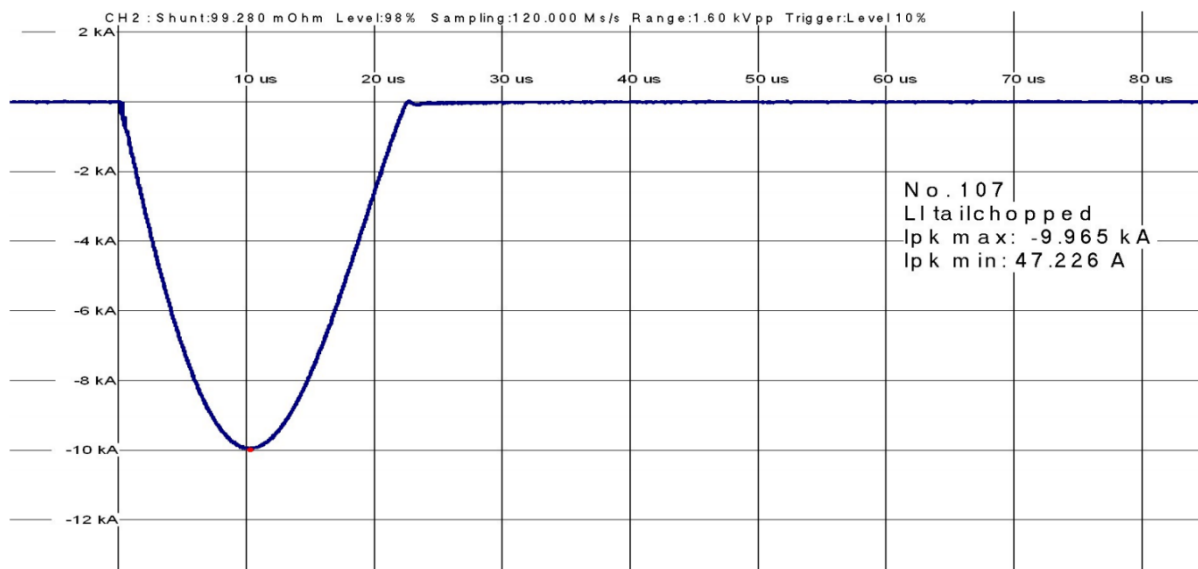
Fonte: Autor

Figura 6.25 - Tensão residual para corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s no ensaio em laboratório.



Fonte: Autor

Figura 6.26 - Corrente de Descarga 10kA 8/20 μ s.



Fonte: Autor

Tabela 6.5 - Parâmetros da forma de onda para o ensaio de tensão residual; Comparação de valores de ensaio e de simulação.

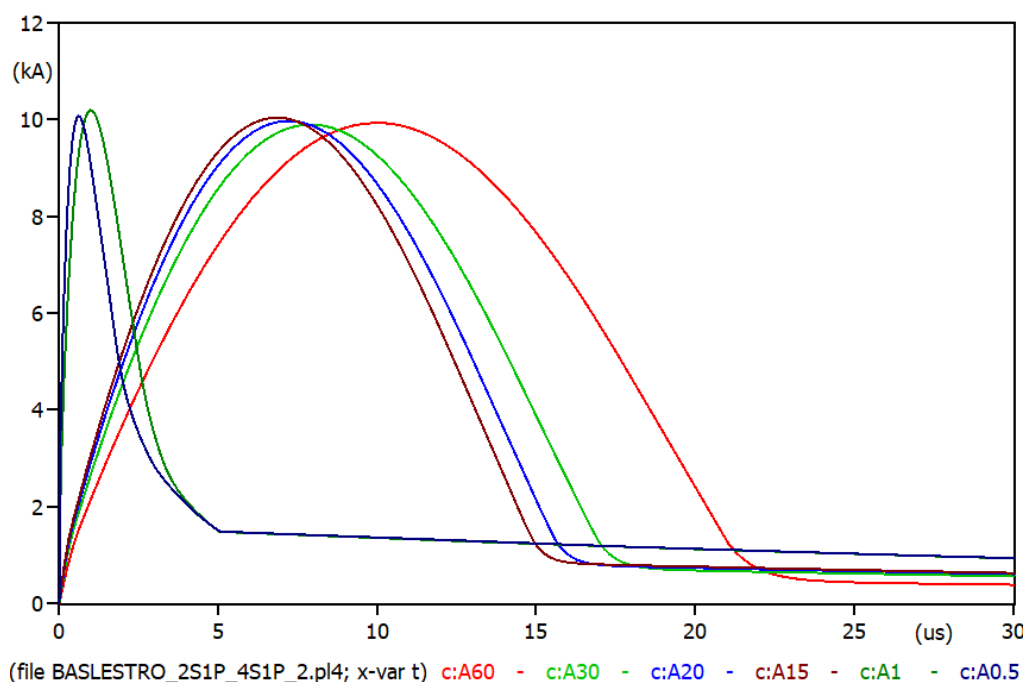
Configuração 2 estágios, C=1,0 μ F

Simulação no ATP			Ensaio no Gerador de Impulso de Corrente		
Corrente de Descarga (kA)	Tensão Residual (kV)	Forma de onda (μ s)	Corrente de Descarga (kA)	Tensão Residual em (kV)	Forma de onda (μ s)
9,977	93,3	8,14/17,73	9,965	93,2	8,075/17,05

Adicionalmente, foram realizados ensaios e simulações para outras formas de onda não padronizadas, buscando equivalência do modelo com os ensaios práticos para frequências maiores, ou seja, para frentes de onda mais íngremes, com tempos de frente mais rápidas. Foram utilizadas as configurações de indutores possíveis no laboratório para obter formas de ondas íngremes satisfatórias.

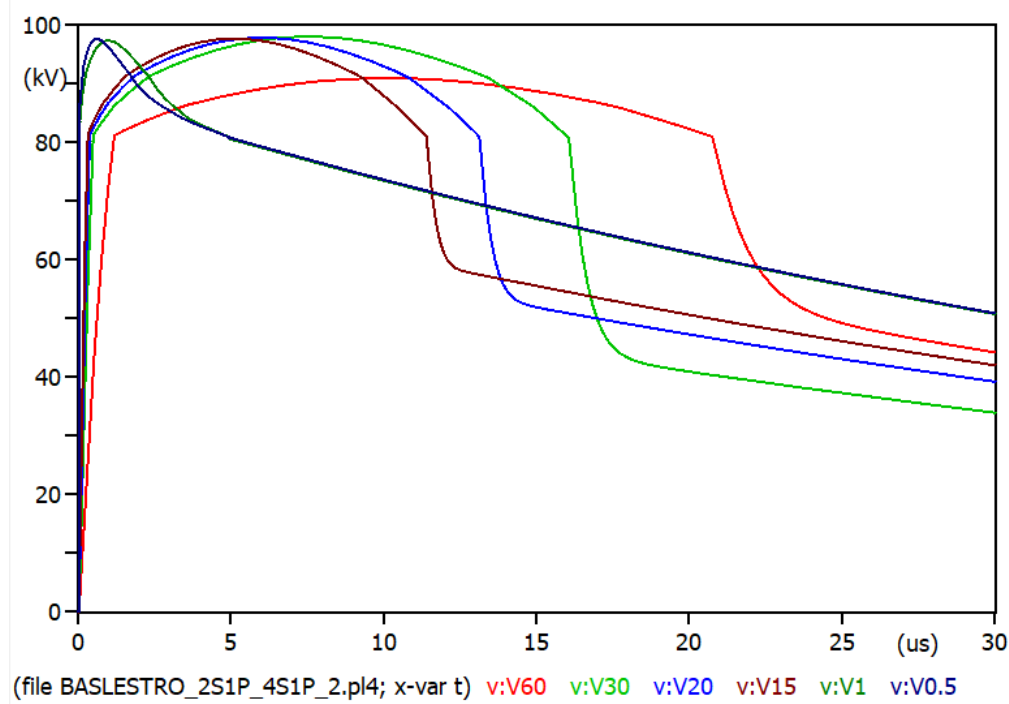
As formas de onda para indutância até 12,5 μ H foram encontradas através de simulação e também através de ensaios em laboratório, já para 1 μ H e 0,5 μ H foram obtidas apenas por simulação. Os resultados da simulação são mostrados nas figuras 6.27 e 6.28. Os resultados das simulações foram apenas anotados, pois as formas de onda não foram salvas no ato do ensaio.

Figura 6.27 – Corrente de Descarga para várias configurações de indutores no ATP Draw.



Fonte: Autor

Figura 6.28 – Tensão residual para Corrente de Descarga para várias configurações de indutores no ATP Draw.



Fonte: Autor

Tabela 6.6 – Simulações de ensaios de tensão residual para diferentes formas de onda.

Indutância do Gerador (μH)	Indutância Intrínseca (μH)	Tensão De Carregamento (kV)	Forma De Onda Simulada (T1/T2 μs)	Forma de Onda do Ensaio (T1/T2 μs)	Corrente De Descarga Simulação (kA)	Corrente de Descarga Ensaio (kA)
37,5 μH	12,5 μH	162000	8,14/17,731	8,075/17,05	9,95	9,87
20 μH	12,5 μH	148000	6,46/14,2	6,6/14,6	9,9	9,97
15 μH	12,5 μH	144000	5,71/13,07	6,17/13,7	9,804	9,68
12,5 μH	12,5 μH	142000	5,55/12,4	5,85/13,21	9,778	9,764

Os resultados foram satisfatórios com erros muito pequenos, mostrando a acurácia do modelo proposto. Podemos perceber que com a diminuição da indutância do circuito temos uma diminuição do tempo de crista da onda, ocasionando em tempos de T1 e T2 menores, já que não se tem o amortecimento da forma de onda com resistores. Podemos perceber também uma diminuição do tempo de crista da

tensão residual com a diminuição da indutância, pois mesmo que a indutância diminua, a reatância indutiva do circuito acaba aumentando em função do aumento da frequência.

Segundo (SCHMIDT, 1989), com relação a tensão residual, tem-se um aumento desta em função do aumento da frequência da corrente de descarga que passa pelo para-raios, porém até $5\mu\text{s}$ não foi percebido nenhum aumento. Nas simulações a partir de $1\mu\text{s}$ começam a aparecer alguns “spikes” de tensão que muitas vezes são descartados na avaliação da tensão residual do para-raios, porém com a limitação dos indutores do laboratório, não foi possível realizar esta avaliação em laboratório.

Quando adicionado os valores de indutância intrínseca as conexões do gerador e também a tensão residual real dos para-raios, pode ser visto que as formas de onda da simulação são concordantes com as formas de onda encontradas no ensaio de tensão residual. De acordo com os requisitos da norma, o para-raios se encontra em bom estado, com tensão residual menor do que o especificado em dados de placa (ver figura 6.25), assim passando, desta forma, no teste de conformidade.

Sobre as oscilações numéricas na corrente de descarga e na tensão residual deve se levar em consideração as diferentes taxas de amostragem. A taxa de amostragem do ATPDraw e do sistema de medição do gerador de impulsos de corrente do LEAT possuem valores diferentes, onde a taxa de amostragem utilizada no ATPDraw foi de 100 Ms/s , no ATP a taxa de amostragem é o inverso do passo de cálculo utilizado nas simulações, já a taxa de amostragem do gerador de impulsos de corrente do LEAT foi de $120\ 000\text{ Ms/s}$;

6.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados encontrados através da comparação de diferentes modelos de para-raios e também de diferentes configurações do gerador de impulsos de corrente para várias formas de onda, mostrando um bom desempenho da modelagem proposta.

CAPÍTULO 7- CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um modelo computacional para avaliação do ensaio de tensão residual em para-raios de óxido de zinco. Para tanto foram avaliados o desempenho de um para-raios, do fabricante Balestro pertencente as Centrais Elétricas do Pará – CELPA, para valores de amplitude de 5kA e 10kA e diferentes forma de onda de corrente de descarga. A partir do resultado dos ensaios foi possível determinar o comportamento do circuito RLC do gerador de impulsos de tensão e também o desempenho do modelo computacional escolhido para representação do funcionamento do para-raios para altas correntes e altas frequências.

Com base na revisão bibliográfica foram implementados os modelos do gerador de impulsos e do para-raios e aplicadas correntes de descarga de 5kA e 10kA conforme normas vigentes, para medição de sua tensão residual tanto no ambiente laboratorial como no computacional, obtendo assim uma comparação entre os métodos.

As respostas do modelo inicialmente não foram satisfatórios pois foi levado em consideração apenas a indutância externa do gerador, porém foi analisado por comparação que a indutância do circuito simulado não era correspondente a do ensaio em laboratório. A partir disto foi possível entender a influência de conexões metálicas para sinais de alta frequência na indutância do circuito e estimar estes valores de conexões, para integração ao modelo computacional.

Posteriormente foram obtidos resultados satisfatórios para correntes de descarga 5kA e 10kA para formas de onda padronizadas de 8/20 μ s e também para formas de onda não padronizadas até um tempo mínimo de frente de 5 μ s. A partir disso foi possível encontrar todas as formas de onda possíveis para os indutores disponíveis em laboratório e conhecer melhor as limitações do gerador e descobrir melhores configurações para ensaios.

Deste modo, é possível realizar testes preliminares computacionalmente através de simulações, e assim fazer o mínimo possível de aplicações de impulsos de corrente que possam causar danos ao para-raios e por consequência diminuir o tempo de ensaio em um equipamento no laboratório, dado que depois de uma aplicação de descarga o espécime tem um aumento de temperatura devido a avalanche térmica

dos elétrons, e é preciso esperar alguns minutos para o reestabelecimento de sua temperatura.

A partir deste estudo, é também possível prever a compra de periféricos como capacitores, indutores e resistores para melhor adaptação a um ensaio específico demandado pela pesquisa ou mercado de ensaios em alta tensão.

Com base em todas essas análises, pode-se concluir que o modelo computacional proposto para ensaios de tensão residual é satisfatório, possuem pequenos erros e funciona para uma faixa de $5\mu\text{s}$ a $8\mu\text{s}$ de tempo de frente da forma de onda da corrente de descarga. Adicionalmente, torna a execução de ensaios laboratoriais muito mais eficientes, devido os testes serem realizados previamente com os dados de placa do para-raios e a melhor configuração do gerador de impulsos de corrente.

7.1 Trabalhos Futuros.

Como sugestões de trabalhos propõem-se:

- Criação de um laboratório virtual, com interface de software, para análise e criação de modelos e auxílio no aprendizado do funcionamento de equipamentos de alta tensão, tais como, gerador série-ressonante, geradores de impulsos de tensão e de corrente.
- Modelagem de outros parâmetros como a energia sob o para-raios, análise do rendimento do gerador de impulso para ensaios em para-raios e a realização da modelagem do gerador abordando outros tipos de ensaios no para-raios de ZnO.
- Modelagem de todos os ensaios em para-raios e outros equipamentos do sistema elétrico afim de melhorar o portfólio de negócios do LEAT, e adquirindo periféricos de acordo com a modelagem realizada.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16050: “Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada”. Rio de Janeiro, 2012.

ASSIS W.M.; NUNES M. V. A; TUMA E.T; LISBOA M.M; BARRADAS R.S; BRITO A.B. “Ensaio De Tensão Residual Em Para-Raios De Óxido De Zinco: Simulações E Ensaio”. INDUSCON 2018 -13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. São Paulo, Brasil, 2018.

BALESTRO, “Para-raiosde Óxido de Zinco Polimérico (Silicone)”, Catálogo do Fabricante;

BRITO, V.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G. “Methodology for decomposition of the leakage current in metal oxide surge arrester”. In: PROCEEDINGS OF THE 19TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Seoul, Korea, 2013.

COSTA, E. G. “Análise do Desempenho de Para-raios de Óxido de Zinco”. Tese (Doutorado) _ Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Abril 1999.
diagnostics of metal oxide surge arrester based on an accurate model. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 751-756, April 2005.

DIAZ, R; FERNANDEZ, F; SILVA, J. Simulation and tests on surge arresters in high-voltage laboratory. IPST 2001, High-Voltage Laboratory, National University of Tucuman, 4000 Argentina., jun. 2.

DINIZ, M. M. “Ensaio e avaliação elétrica de um novo projeto de para-raios para sistemas de distribuição em média tensão”, Dissertação de mestrado, UNIFEI, Itajubá, 2011.

FERNANDEZ, F.; DIAZ, R. “Metal Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations”. Paper 144, International Conference on Power System Transients, IPST'01, 20 -24 June 2001.

FERREIRA, O. J. N. “Modelagem De Um Gerador De Impulsos De Corrente Para Ensaio De Tensão Residual Em Para-Raios”, Trabalho de Conclusão de Curso, Belém Pará, 2018.

FRANCO, J. Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Maio 1993.

HADDAD, A.; WARNE, D. “Advances in High Voltage Engineering. New York, USA: Institution of Engineering and Technology”, 2004.

HADDAD, A.; NAYLOR, P. “Dynamic Response of ZnO Arresters High Amplitude Fast Impulse Currents”. International Power Electric Conference, pp. 292-297, 1999

HADDAD, A. *et alli*. “Characterization of ZnO Surge Arrester Elements with Direct and Power Frequency Voltages”, IEEE Proceedings, vol. 137, Pt A, N° 5, pp 269-279, Sep. 1990.

HINRICHSEN, V. “Metal-Oxide Surge Arresters in High Voltage Power Systems – Fundamentals”. Berlin and Darmstadt, Germany, 2011.

IEC 60099-5. “Surge Arresters Part 5: Selection and Application Recommendations”. [S.I.], 2000.

IEEE C62.22. IEEE “Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems”. [S.I.], 2009.

IEEE Working Group 3.4.11. “Modeling of metal oxide surge arresters”. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 302309, January 1992.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60099-4: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Geneva, 2009.

KURZ, S. "Generation of impulse voltages and currents", 2010.

KIM, I.; FUNABASHI, T.; SASAKI, H. *et alli*. "Study of ZnO arrester model for steep Front Wave". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, Nº 2, pp. 834-841, April 1996.

Manual do Gerador de Impulso de Corrente de 1200 kV/20 kA, Haefely, Suíça, 2011

MARCARINI, F. "Proteção Contra Descargas Atmosféricas Utilizando Para-Raios De Óxido De Zinco". 2012. 46 f. Monografia – Bacharel Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2012.

MARTINEZ, M. L. B., "Pára-raios para sistemas de Média Tensão Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência"; Dissertação de Mestrado, EFEI, Dezembro 1992.

MATSUURA, M.; YAMAOKI, H. "Dielectric Dispersion and Equivalent Circuit in Nonohmic ZnO Ceramics". J. Appl. Phys., Vol. 16, Nº 7, pp 1261-1262, 1977.

PAUL, C, R. "Analysis of multiconductor transmission lines". Hoboken, N.J: Wiley-Interscience IEEE Press, 2008. Print.

PEREIRA, M. P. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.

PHILIPP, H. R.; LEVINSON, L. M. Low-temperature electrical studies on metal-oxide S. Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic $v-i$ characteristics. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-98, n. 6, p. 1860-1871, November/December 1979.

PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. "A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, pp.393-398, 1999.

SAKSHAUG, E. A brief history of ac surge arresters. IEEE Power Engineering Review, 16211627, April 1977.

SALLES, C. Modo de Envelhecimento Frente a Impulsos de Curta Duração – Impulsos Atmosféricos em Resistores não Lineares a Óxido Metálico. 2011. 128 f. Tese – Doutorado Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais. 2011.

SCHEI, A. "Diagnostic Techniques for Surge Arresters with Main Reference to On-Line Measurement of Resistive Leakage Current of Metal- Oxide Arresters". P1-05, Section 2000, CIGRÉ.

SILVEIRA, J. Modelagem e Análise de Varistores de Óxido Metálico de Zinco. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Maio 2009.

STEINBERG, Katrin; SCHEFFLER, Marc; DRESSEL, Martin. Microwave inductance of thin metal strips. Journal Of Applied Physics, [s.l.], v. 108, n. 9, p.096102-345, nov. 2010. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3505706>.

TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NISHIDA, v. 11, n. 8, p. 11-13, August 1991. varistors - a clue to conduction mechanisms. Journal of Applied Physics, v. 48, n. 4, p.

WANDERLEY NETO, E. T. e.t al. Monitoração e Diagnósticos de Para-ráios a ZnO. IEEE Latin America Transection, Vol. 4. No. 3, 2006

WANG, Y.; LU, F.; LI, H. Influence of power system's harmonic voltage on on-line leakage current monitoring of MOA. In: IEEE. Proceedings of the International

Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications. Beijing, China, 2004. p. 268-271.

ZHAO, T.; LI, Q.; QIAN, J. "Investigation on Digital algorithm for On- Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arresters Based on an Accurate Model". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N° 2, April 2005.