

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

SIMULAÇÃO DE ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADORES
DE BAIXA INDUTÂNCIA UTILIZANDO CIRCUITO GLANINGER E PROGRAMA ATP
PARA O LABORATÓRIO DE EXTRA ALTA TENSÃO DA UFPA

RAPHAEL PABLO DE SOUZA BARRADAS

DM: 20/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

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

RAPHAEL PABLO DE SOUZA BARRADAS

SIMULAÇÃO DE ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADORES
DE BAIXA INDUTÂNCIA UTILIZANDO CIRCUITO GLANINGER E PROGRAMA ATP
PARA O LABORATÓRIO DE EXTRA ALTA TENSÃO DA UFPA

DM: 20/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

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

RAPHAEL PABLO DE SOUZA BARRADAS

SIMULAÇÃO DE ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADORES
DE BAIXA INDUTÂNCIA UTILIZANDO CIRCUITO GLANINGER E PROGRAMA ATP
PARA O LABORATÓRIO DE EXTRA ALTA TENSÃO DA UFPA

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica na
área de Sistemas de Potência

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

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

Barradas, Raphael Pablo de Souza, 1990.

Simulação de ensaio de impulso atmosférico em transformadores de baixa indutância utilizando circuito Glaninger e programa ATP para o laboratório de extra alta tensão da UFPA / Raphael Pablo de Souza Barradas. 2017.

Orientador: Marcus Vinicius Alves Nunes

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Energia elétrica – distribuição – alta tensão. 2. Transformadores. 3. Métodos de simulação. I. Título.

CDD 23. ed. 621.31913

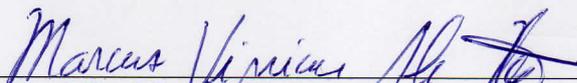
**“SIMULAÇÃO DE ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM
TRANSFORMADORES DE BAIXA INDUTÂNCIA UTILIZANDO
CIRCUITO GLANINGER E PROGRAMA ATP PARA O LABORATÓRIO
DE EXTRA ALTA TENSÃO DA UFPA”**

AUTOR: RAPHAEL PABLO DE SOUZA BARRADAS

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 SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 31/03/2017

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes

(Orientador – PPGEE/UFPA)



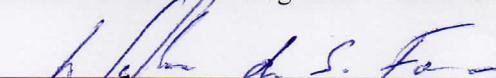
Prof. Dr. Walter Barra Júnior

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Eduardo Tannus Tuma

(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)



Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca

(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

*“Nenhum obstáculo é grande o suficiente
quando confiamos em Deus”*

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por guiar meus caminhos, permitindo que esta dissertação de mestrado se tornasse realidade.

A toda a minha família, em especial à minha mãe Tatiana e ao meu pai Washington, pelo apoio moral e por guiarem meus caminhos desde o meu nascimento.

A minha noiva Igraine, pelo companheirismo, amor e carinho. Por ser minha conselheira e por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida.

A todos os meus amigos pela amizade, pelos momentos de descontração e pelos conselhos.

Aos professores Marcus Vinicius e Eduardo Tuma pelas orientações, amizade e por confiarem em meu trabalho, apoiando minha pesquisa acadêmica.

Ao grupo que compõe o Laboratório de Extra Alta Tensão da UFPA pelo apoio em minhas pesquisas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA pela oportunidade e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVI
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 MOTIVAÇÕES	3
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ESTRUTURA.....	4
2 IMPULSOS ATMOSFÉRICOS E GERADORES DE IMPULSOS.....	5
2.1 SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	5
2.2 IMPULSOS ATMOSFÉRICOS NORMATIZADOS	6
2.3 GERADOR DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS.....	9
2.3.1 ANÁLISE CIRCUITAL	12
2.3.2 ANÁLISE DO TEMPO DE FRENTE EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE.....	14
2.3.3 ANÁLISE DO TEMPO DE CAUDA EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA PARALELA	17
2.3.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO GERADOR	18
2.4 CIRCUITO GERADOR DE IMPULSO DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	21
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	24
3 ENSAIOS DE TENSÃO SUPORTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADORES	25
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
3.2 CIRCUITO DE ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADOR	26
3.3 ANÁLISE DA INDUTÂNCIA L_b E CONTROLE DO TEMPO DE CAUDA.....	28
3.3.1 ENROLAMENTOS DE ALTA INDUTÂNCIA ($L_b \geq 100$ mH)	29
3.3.2 ENROLAMENTOS DE MÉDIA INDUTÂNCIA (20 mH $\leq L_b < 100$ mH).....	29
3.3.3 ENROLAMENTOS DE BAIXA INDUTÂNCIA ($L_b < 20$ mH).	29
3.4 METODOLOGIA DE ENSAIO DE ACORDO COM A NBR 5356-3 e NBR 5356-4	33
3.4.1 APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE ENSAIO	34
3.4.2 ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO (IA).....	37
3.4.3 ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO COM ONDA CORTADA.	43

3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	44
4	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO GERADOR DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DO LABORATÓRIO DE EXTRA ALTA TENSÃO DA UFPA	46
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
4.2	GERADOR DE IMPULSOS DE TENSÃO TIPO SGV 18 ESTÁGIOS	46
4.2.1	CAPACITORES DO GERADOR	47
4.2.2	RESISTORES DE FRENTE E CAUDA	48
4.2.3	RESISTORES DE CARREGAMENTO	49
4.2.4	RESISTORES DE POTENCIAL	50
4.2.5	CENTELHADORES E MECANISMO DE DISPARO	51
4.2.6	SISTEMAS DE ATERRAMENTO.....	53
4.2.7	ELETRODO TOROIDAL	55
4.2.8	MODOS DE OPERAÇÃO DO GERADOR DE IMPULSOS	55
4.3	RETIFICADOR	58
4.4	DIVISORES DE TENSÃO.....	58
4.5	SHUNTS COAXIAIS	61
4.6	MÚLTIPLO CHOPPING GAP	62
4.7	CIRCUITO GLANINGER	63
4.8	SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS	64
4.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 5	66
5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO UTILIZANDO CIRCUITO GLANINGER NOS ENSAIOS NORMALIZADOS EM TRANSFORMADORES DE 5 MVA UTILIZANDO O PROGRAMA ATP.....	67
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	67
5.2	MODELAGEM DO GERADOR DE IMPULSOS (17s1p) NO ATP E VALIDAÇÃO	68
5.2.1	MODELAGEM DO GERADOR UTILIZANDO O PROGRAMA ATP	68
5.2.2	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO O GERADOR DO LEAT	72
5.3	ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO CIRCUITO GLANINGER NO ENSAIO DE UM TRANSFORMADOR DE 5 MVA UTILIZANDO O PROGRAMA ATP	76
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	86
6	CONCLUSÕES	88

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classes e Formas das solicitações de Tensão.....	6
Figura 2 – Impulso de Tensão pleno padronizado.....	7
Figura 3 – Impulsos de Tensão cortados na cauda e na frente respectivamente	8
Figura 4 – Circuito elétrico de um gerador de impulsos de um estágio com objeto sob ensaio puramente capacitivo.....	11
Figura 5 – Circuito elétrico de um gerador de impulsos de um estágio com objeto sob ensaio puramente capacitivo.....	13
Figura 6 – Formação do impulso de tensão através da composição de duas funções exponenciais	15
Figura 7 – Circuito gerador de impulsos após desconsideração da resistência paralela	15
Figura 8 – Efeito da resistência série no tempo de frente.....	17
Figura 9 – Circuito gerador de impulsos após desconsideração da resistência série	18
Figura 10 – Efeito da resistência paralela no tempo de cauda.....	18
Figura 11 – Modelos de montagem de um gerador de impulsos.....	19
Figura 12 – Diagrama esquemático de um circuito de Marx de 4 estágios.....	21
Figura 13 – Gerador de impulsos de múltiplos estágios com resistências série e paralela distribuídas.	23
Figura 14 – Influência da indutância parasita na frente de onda do impulso. V_0 é a porcentagem da tensão de carregamento do gerador.	24
Figura 15 – Circuito elétrico de um gerador de impulsos de um estágio com objeto sob ensaio capacitivo e indutivo.....	26
Figura 16 – Influência da indutância L_b na forma de onda do impulso.....	27
Figura 17 – Dependência da indutância efetiva de ensaio L_b com o tipo de conexão do transformador durante o ensaio	28
Figura 18 – Influência do aumento da resistência paralela em objetos sob ensaios capacitivos/indutivos	31
Figura 19 – Circuito equivalente de um gerador de impulsos com objeto sob ensaio capacitivo/indutivo após inserção do Glaninger.....	32
Figura 20 – Influência do circuito Glaninger na Forma de impulso aplicado.....	33
Figura 21 – Circuito típico de ensaio de impulso atmosférico em transformador	34

Figura 22 – Circuito típico de ensaio de impulso atmosférico em transformador com circuito Glaninger	35
Figura 23 – Divisores de tensão típicos para medição de impulsos	36
Figura 24 – Esquemas de ligação do transformador durante o ensaio	38
Figura 25 – Exemplo de falha do tipo fase para terra através do enrolamento de alta tensão ensaiado: a) Impulso pleno com valor reduzido (75%) caracterizando não falha; b) Impulso pleno com valor nominal (100%) caracterizando falha.....	43
Figura 26 – Exemplo de falha entre espiras no enrolamento de alta tensão ensaiado: a) Impulso cortado com valor reduzido (60%) caracterizando não falha; b) Impulso cortado com valor nominal (100%) caracterizando falha.....	45
Figura 27 – Sistema Gerador de impulsos de Tensão 18 estágios, 3600kV, 540 kJ do LEAT	47
Figura 28 – Capacitores do gerador de impulsos	48
Figura 29 – Resistores de Frente e Cauda do Gerador de Impulsos do LEAT	49
Figura 30 – Resistores de carregamento do Gerador de Impulsos do LEAT	50
Figura 31 – Resistores de potencial do Gerador de Impulsos do LEAT	50
Figura 32 – Mecanismo de disparo controlado Trigger	51
Figura 33 – Faixa de operação do Trigger.....	52
Figura 34 – Sistema Trigger utilizado no Múltiplo <i>chopping gap</i>	53
Figura 35 – Chave de aterramento 1	53
Figura 36 – Chave de aterramento 2.....	54
Figura 37 – Sistema de aterramento automatizado por fitas	54
Figura 38 – Eletrodo Toroidal na parte superior do gerador de impulsos.....	55
Figura 39 – Esquema de ligação do Gerador de impulsos na configuração série	56
Figura 40 – Esquema de ligação do Gerador de impulsos na configuração série-paralela	57
Figura 41 – Retificador.....	58
Figura 42 – Divisor de tensão para impulsos de até 1200 kV	59
Figura 43 – Divisor de tensão para impulsos de até 2400 kV	59
Figura 44 – Circuitos equivalentes do divisor de tensão e suas devidas terminações.....	60
Figura 45 – Esquemático de um shunt do tipo coaxial.....	62
Figura 46 – Shunts diversos do LEAT	62
Figura 47 – Múltiplo <i>Chopping Gap</i> do LEAT.....	63
Figura 48 – Esquemático de montagem do Circuito Glaninger	64
Figura 49 – Elementos do circuito Glaninger do LEAT montados em pedestal próprio	64

Figura 50 – Mesa de controle e aquisição de dados	65
Figura 51 – Diagrama Funcional do sistema gerador de impulsos do LEAT	66
Figura 52 – Modelo do gerador de impulsos de tensão no ATP na configuração 17s1p	69
Figura 53 – Impulso de tensão simulado para configuração 17s1p.....	69
Figura 54 – Redução de resistências série no gerador de impulsos	71
Figura 55 – Impulso de tensão simulado após redução da resistência série.....	71
Figura 56 – Disposição dos equipamentos para o ensaio	72
Figura 57 – Disposição dos resistores série e paralelo no circuito de ensaio.....	73
Figura 58 – Impulso de tensão obtido no LEAT para configuração 17s1p.....	73
Figura 59 – Disposição dos resistores série e paralelo no circuito de ensaio após modificações	74
Figura 60 – Impulso de tensão obtido para configuração 17s1p após modificações	75
Figura 61 – Circuito completo para o ensaio do transformador, no ATP	79
Figura 62 – Impulso de tensão simulado, aplicado em um dos terminais do transformador ...	79
Figura 63 – Impulso de tensão com <i>undershoot</i> representado	80
Figura 64 – Impulsos de tensão para diferentes valores de resistência paralela.....	81
Figura 65 – Impulsos de tensão com <i>undershoots</i> representados.....	82
Figura 66 – Adaptação do circuito Glaninger na configuração 2s2p do gerador de impulsos do LEAT	83
Figura 67 – Circuito de ensaio após inserção do circuito Glaninger.....	84
Figura 68 – Impulso de tensão simulado, aplicado em um dos terminais do transformador após a inserção do circuito Glaninger.....	84
Figura 69 – Impulso de tensão com <i>undershoot</i> representado, após a inserção do circuito Glaninger	85
Figura 70 – a) Impulso de tensão sem o circuito Glaninger (referente a Figura 62); b) Impulso de Tensão com o circuito Glaninger (referente a Figura 68).....	86
Figura 71 – a) Undershoot do Impulso de tensão sem o circuito Glaninger (Figura 63); b) Undershoot do Impulso de Tensão com o circuito Glaninger (Figura 69).....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de Isolamento Normalizados para a faixa ($U_n < 245$ kV)	10
Tabela 2 – Indutâncias de Curto Circuito de Enrolamentos de Transformadores	30
Tabela 3 – Quantitativo de resistores série e paralelo do Gerador de impulsos do LEAT	49
Tabela 4 – Parâmetros nominais dos divisores de Tensão do LEAT	61
Tabela 5 – Quantitativo de indutores e resistores do circuito Glaninger do LEAT	63
Tabela 6 – Parâmetros do impulso de tensão simulado no ATP para configuração 17s1p	70
Tabela 7 – Parâmetros do impulso de tensão simulado no ATP após modificações	72
Tabela 8 – Parâmetros do impulso de tensão obtido no LEAT	74
Tabela 9 – Parâmetros do impulso de tensão obtido no LEAT	75
Tabela 10 – Comparativo entre impulsos de tensão após adequações da resistência série	75
Tabela 11 – Características nominais do transformador de distribuição a ser ensaiado	76
Tabela 12 – Resultados da simulação	80
Tabela 13 – parâmetros do impulso simulado após a inserção do circuito Glaninger.	85

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{11}	Capacitância do braço de alta tensão do divisor
C_{22}	Capacitância do braço de baixa tensão do divisor
C_{31}	Capacitância do atenuador
C_{32}	Capacitância do sistema Burch
C_b	Capacitância de carga do gerador
C_c	Capacitância do cabo de medição
C_g	Capacitância do gerador de impulsos
C'_g	Capacitância equivalente do gerador
C_L^*	Capacitância de carga adicional
C_t	Capacitância referente a isolação do transformador
C_z	Capacitância adicional do sistema Trigger
f	Frequência
L_b	Indutância efetiva de ensaio do transformador
L_{cc}	Indutância de curto circuito do transformador
L_d	Indutância do circuito Glaninger
L_{Loop}	Indutância parasita do gerador de impulsos
η	Rendimento do gerador de impulsos
R_{11}	Resistência do braço de alta tensão do divisor
R_{22}	Resistência do braço de baixa tensão do divisor
R_{31}	Resistência do atenuador
R_{32}	Resistência do sistema Burch
R_a	Resistência utilizada para casamento de impedância
R_{ch}	Resistência de carregamento do gerador
R_d	Resistência do circuito Glaninger
R_p	Resistência paralela ou resistência de cauda
R_{pot}	Resistência de potencial
R'_p	Resistência paralela equivalente
R_s	Resistência série ou resistência de frente

R'_s	Resistência série equivalente
SG	Centelhadores (<i>Spark Gap</i>)
S_n	Potência nominal do transformador
T_1	Tempo de frente
T_2	Tempo de cauda ou tempo até o meio valor
$t_{30\%}$	Tempo para que o impulso atinja 30% do valor de crista
$t_{90\%}$	Tempo para que o impulso atinja 90% do valor de crista
T_c	Tempo de corte do impulso
u_{cc}	Impedância em % do transformador
U_{ch}	Tensão de carregamento C.C. do gerador de impulsos
U_n	Tensão nominal do transformador
$V_{30\%}$	Tensão que representa 30% do valor de crista do impulso
$V_{50\%}$	Tensão que representa 50% do valor de crista do impulso
$V_{90\%}$	Tensão que representa 90% do valor de crista do impulso
v	Tensão impulsiva
V_p	Tensão de pico do impulso
W	Energia do gerador de impulsos
ω	Frequência angular
Z_1	Impedância do braço de alta tensão do divisor de tensão
Z_2	Impedância do braço de baixa tensão do divisor de tensão
Z_b	Impedância referente ao capacitor de carga
Z_c	Impedância adicional do sistema Chopping Gap
Z_n	Impedância de entrada do sistema de medição
Z_g	Impedância referente aos capacitores do gerador de impulsos

LISTA DE ABREVIATURAS

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LEAT	Laboratório de Extra Alta Tensão da UFPA
UFPA	Universidade Federal do Pará
NBI	Nível Básico de Isolamento
IA	Impulso Atmosférico
C.C.	Corrente Contínua
FE	Fator de Escala
FO	Faixa de operação

RESUMO

Uma das maiores dificuldades observadas em laboratórios de alta tensão é o ajuste da forma de onda do impulso de tensão a ser utilizado nos ensaios. Esta dificuldade deve-se ao fato de que, na maioria das vezes, não se conhece a capacitância do objeto sob ensaio, não sendo possível realizar um cálculo exato dos parâmetros a serem utilizados no gerador de impulsos. Nos casos de ensaios em transformadores, estas dificuldades aumentam visto que, além da capacitância inerente da sua isolação, há também uma contribuição de indutância ao circuito de ensaio, proveniente de seus enrolamentos. Isto dificulta ainda mais a obtenção de uma forma de onda normalizada, de acordo com a norma NBR IEC 60060-1. Nesta Dissertação de Mestrado apresenta-se e avalia-se metodologias que permitem a realização de ensaios normatizados de impulso de tensão em transformadores com baixas indutâncias, comuns nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Serão destacados os resultados obtidos com a inserção de um circuito Glaninger, comparado com a metodologia baseada no aumento da resistência paralela total do circuito em teste. As simulações computacionais são realizadas com o auxílio do programa ATP (*Alternative Transient Program*), utilizando valores nominais de parâmetros físicos dos equipamentos de alta tensão do Laboratório de Extra Alta tensão da Universidade Federal do Pará (LEAT). Através de uma modelagem inicial do gerador de impulsos de tensão do LEAT no programa ATP, valida-se os resultados simulados com a realização de um ensaio real no LEAT. Após validação, uma simulação de ensaio em um transformador de distribuição de baixa indutância é realizada no intuito de apresentar as deformações na forma de onda do impulso que ocorrem, provenientes das baixas indutâncias dos enrolamentos do transformador. Através da introdução de um circuito Glaninger devidamente adaptado, apresenta-se a solução para o problema citado, portando, permitindo que ensaios em transformadores com baixa indutâncias sejam realizados de acordo com critérios estabelecidos pelas normas vigentes.

PALAVRAS-CHAVES: Alta tensão, Transformadores, Baixa Indutância, Impulsos de Tensão, Impulsos atmosféricos, Circuito Glaninger, Laboratório de Extra Alta Tensão da UFPA, programa ATP, Simulação, Ajuste do tempo de cauda.

ABSTRACT

One of the major difficulties observed in high voltage laboratories is the adjustment of the atmospheric (voltage) impulse waveform during the tests. This difficulty is due to the fact that, most of the time, the capacitance of the object under test is not known, and it is not possible to make an exact calculation of the parameters to be used in the impulse generator. In the case of transformer tests, these difficulties increase because, in addition to the inherent capacitance of their insulation, there is also an inductance contribution to the test circuit from their windings. This fact makes it even more difficult to obtain a normalized waveform according to the NBR IEC 60060-1 standard. The present Master's Dissertation presents and evaluates methodologies that allow the performance of standardized voltage impulse tests in transformers with low inductances, common in electric power distribution systems. It will be highlighted in the results obtained with the insertion of a Glaninger circuit, compared to the methodology based on the increase of the total parallel resistance of the circuit under test. The computational simulations are performed in the ATP (Alternative Transient Program) program, using rated values of physical parameters of the high voltage equipment of the Extra High Voltage Laboratory of the Federal University of Pará (LEAT). Through an initial modeling of the voltage impulse generator of the LEAT in the ATP program, the simulated results are validated by performing a real test in the LEAT. After validation, a test simulation in a low inductance distribution transformer is performed in order to present the deformations in the waveform of the impulse that occur, due to the low inductances of the transformer windings. Through the introduction of a suitably adapted Glaninger circuit, the solution to the above problem is presented, permitting tests on transformers with low inductances to be performed according to criteria established by current standards.

KEYWORDS: High Voltage, Transformers, Low Inductance, Voltage Impulse, Atmospheric Impulse, Glaninger Circuit, UFPA Extra High Voltage Laboratory, ATP Program, Simulation, Tail Time Adjustment.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sistemas elétricos de potência apresentaram um grande desenvolvimento nos últimos anos, principalmente, considerando-se o nível de tensão da transmissão de energia, que evoluiu de 10 kV à 1200 kV (HAUSCHILD e LEMKE, 2014). Este rápido crescimento alavancou a engenharia de materiais de alta tensão, no que diz respeito ao desenvolvimento de novos materiais dielétricos e tecnologias capazes de suportar tensões cada vez mais elevadas. Isto inclui cálculos precisos de campos elétricos, conhecimento das reações dos dielétricos sobre a influência de altos campos elétricos além do conhecimento sobre o processo de descargas que ocorrem nestes materiais.

A princípio, os novos materiais elétricos desenvolvidos deveriam ser testados em laboratórios de alta tensão apenas com tensões a frequência industrial que superavam a tensão para o qual os equipamentos eram projetados. Esta medida era necessária e suficiente para garantir que o equipamento trabalhasse de maneira confiável quando colocado em operação. Entretanto, em meados de 1920, houve o início da conscientização da necessidade de que a isolação dos enrolamentos de transformadores fosse capaz de suportar sobretensões de curta duração originadas por descargas atmosféricas (BEZERRA et al., 2010). A partir de então, diversos estudos foram realizados no intuito de avaliar as altas tensões que trafegavam na linha de transmissão após a incidência de descargas atmosféricas diretas sobre a linha ou em suas proximidades, além das influências que estas causavam quando aplicadas em um material dielétrico. A partir de diversos registros gráficos destas sobretensões e de avaliações estatísticas dos seus parâmetros, foi possível criar uma padronização destas formas de onda no intuito de reproduzi-las em laboratório para a avaliação do comportamento da isolação diante destas sobretensões.

A análise do comportamento da isolação de equipamentos diante de altas tensões à impulso de tensão e a frequência industrial constitui a essência dos ensaios realizados em laboratórios de alta tensão no Brasil e no mundo. A importância dos laboratórios de alta tensão se deve ao fato de que estes certificam que os equipamentos estão aptos a entrarem em operação de maneira segura e confiável. A aplicação de altas tensões aos equipamentos identifica: falhas no dielétrico que compõe a isolação do equipamento, erros de fabricação, fragilidade da isolação diante de altas tensões impulsivas, entre outros.

Tratando-se de ensaios em transformadores, normas gerais de ensaios em alta tensão como a NBR IEC 60060-1, e específicas do transformador, como a NBR 5356-3 e NBR 5356-4 estipulam os requisitos gerais necessários para os ensaios nestes equipamentos. No que se refere aos ensaios em alta tensão, especificamente ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico (IA), a forma de onda padronizada que deve ser aplicada ao equipamento é de $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ de tempo de subida e $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ de tempo de cauda, com valor de crista de onda especificado de acordo com a classe de tensão do transformador a ser ensaiado. Todavia, equipamentos como transformadores e reatores, apresentam, em alguns casos, baixas indutâncias em seus enrolamentos, tornando ensaios de impulsos de tensão padronizados complexos no que se refere ao tempo de cauda, pois, para baixos valores de indutância, o tempo de cauda fica limitado a um valor inferior ao mínimo tolerável para este parâmetro. Neste caso, a utilização de circuitos auxiliares, como o circuito Glaninger, torna-se necessária e facilita a execução do ensaio como proposto no presente trabalho (GAMLIN e SCHWENK, 2011).

As simulações computacionais são ótimas ferramentas em laboratórios de alta tensão. Sua utilização é muito vantajosa quando se deseja avaliar um circuito antes mesmo que o ensaio aconteça. Através de um pré-teste em um simulador, com os parâmetros elétricos adequadamente representados, é possível avaliar, de maneira rápida, a forma de onda do impulso aplicado aos terminais dos equipamentos.

FESER (1977), apresenta estudos relacionados a ensaios em alta tensão em transformadores de potência, destacando situações e características de um circuito de ensaio, bem como condições em que as baixas indutâncias dos enrolamentos dos transformadores afetam a forma de onda do impulso de tensão aplicado.

ZHOU e BOGGS (2004), desenvolvem e testam um gerador de impulsos de tensão de baixa energia no intuito de apresentar aspectos operacionais deste. Com este objetivo, é implementado em laboratório um gerador de impulsos de menor porte, sendo avaliado o desempenho do mesmo. Já AGRAWAL, CHANDAN e KISHOR (2006), realizam simulações de um circuito gerador de impulsos genérico no intuito de desenvolver um laboratório de alta tensão virtual. Para isto, são utilizadas as linguagens PHP e Java, desenvolvendo-se uma interface gráfica para tal.

RAI, PANDEY e WADHWA (2015) realizam simulações de um circuito Multi estágio de Marx utilizando o programa ATP (*Alternative Transient Program*) no intuito de mostrar as características de um circuito gerador de impulsos atmosféricos, bem como as influências da localização do gerador em laboratórios de alta tensão. NAIR e PACHORI (2013) e

KAMARUDIN et al. (2008), apresentam diferentes simulações, utilizando o programa PSpice, para avaliar os parâmetros de um gerador de impulsos Multi estágios quando utilizados em ensaios em transformadores de potência.

Diante deste cenário, a Universidade Federal do Pará conta hoje com um laboratório de alta tensão capaz de gerar até 3600 kV de onda impulsiva além de 800 kV de tensão a 60 Hz, representando assim um importante centro tecnológico da região Norte do país.

1.2 MOTIVAÇÕES

A principal dificuldade na realização de ensaios de impulsos atmosféricos em laboratórios de alta tensão está no ajuste da forma de onda do impulso, principalmente para equipamentos que possuem enrolamentos, como transformadores e reatores. O enrolamento destes equipamentos introduzirá um valor de indutância ao circuito de ensaio que dificultará a obtenção de uma forma de onda padronizada pela norma NBR IEC 60060-1 (2013). Caso esta indutância seja extremamente baixa, o tempo de cauda do impulso aplicado será extremamente baixo, sendo praticamente impossível a obtenção de uma forma de onda normalizada no que se refere a este parâmetro. Além disto, um valor baixo de indutância, resultará em um valor de crista de polaridade oposta ao impulso (*undershoot*) extremamente alto, sendo que, este não poderá ultrapassar o máximo permitido pela norma NBR IEC 60060-1 (2013) que é de 50% do valor de crista. Desta forma, um circuito adicional denominado Glaninger se faz necessário para resolução de tal problema.

O ajuste físico dos parâmetros do gerador de impulsos nem sempre é uma tarefa fácil e requer experiência do operador, além de consumir bastante tempo. Com isso, a utilização do programa ATP com uma representação adequada dos parâmetros elétricos nominais do Laboratório de Extra Alta Tensão da UFPA se faz necessária, além de proporcionar uma análise prévia do ensaio a ser realizado.

1.3 OBJETIVOS

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo apresentar, de maneira sistemática, a simulação de ensaios de tensão suportável à impulsos atmosféricos em transformadores, no programa ATP, utilizando-se os dados reais do gerador de impulsos atmosféricos do LEAT (Laboratório de Extra Alta tensão da UFPA). Será apresentada a metodologia para aumentar o tempo de cauda do impulso em ensaios de transformadores que

apresentam baixas indutâncias em seus enrolamentos. Vale ressaltar que os transformadores que apresentam estas características são tipicamente os que possuem altas potências e baixas tensões, comumente os de distribuição de energia.

Desta forma, objetiva-se apresentar a utilização do circuito Glaninger como método padrão para o aumento do tempo de cauda em transformadores com baixas indutâncias, bem como, a simulação de ensaio em um transformador industrial de distribuição com as características mencionadas. Com isso, as simulações de ensaios em outros transformadores com características similares poderão ser realizadas, facilitando o ajuste do gerador de impulsos, diminuindo assim o tempo de execução dos ensaios.

1.4 ESTRUTURA

O presente texto está dividido em 6 capítulos, sendo o primeiro referente a introdução e o sexto, a conclusão.

No segundo capítulo são apresentados os conceitos teóricos a respeito das sobretensões de origem atmosféricas em sistemas elétricos. Além disto, apresentam-se os conceitos teóricos sobre a geração de impulsos de tensão normalizados em laboratórios de alta tensão bem como os circuitos elétricos necessários para tal.

No terceiro capítulo, um estudo sobre ensaios de impulsos atmosféricos em transformadores é desenvolvido no intuito de subsidiar as análises das formas de onda que serão realizadas posteriormente.

No quarto capítulo, são apresentados os equipamentos que compõem o sistema gerador de impulsos de tensão do LEAT, bem como detalhes de sua operação e manuseio.

No quinto capítulo, são apresentadas os ensaios e simulações referentes ao gerador de impulsos atmosféricos do LEAT bem como sua adaptação com o circuito Glaninger, possibilitando assim a execução de ensaio em um transformador que apresenta indutância extremamente baixa em seus enrolamentos.

2 IMPULSOS ATMOSFÉRICOS E GERADORES DE IMPULSOS

2.1 SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas elétricos estão submetidos a diversas formas de fenômenos transitórios envolvendo variações abruptas de tensão e corrente, fazendo com que os valores nominais de operação sejam afetados. Tais fenômenos em geral, estão associados à incidência de descargas atmosféricas, faltas, manobras entre outros.

O estudo das sobretensões em sistemas elétricos tem se tornado cada vez mais importante a medida em que o nível de tensão dos sistemas de transmissão tem aumentado (ESMERALDO, FILHO e FRONTIN, 2013). Tais estudos tendem a aumentar tanto a eficiência quanto a confiabilidade do sistema, visto que são de vital importância para o aperfeiçoamento da suportabilidade dielétrica dos equipamentos, melhorando assim a coordenação do isolamento.

Em relação à definição, as sobretensões são eventos transitórios que ocorrem em sistemas de energia elétrica, definidos como qualquer tensão entre fase e terra, ou entre fases, que excedem o valor máximo de tensão do equipamento, conforme apresenta a norma NBR 6939 (2000). Dependendo de seu tempo de duração (relacionado à frente de onda) e de seu grau de amortecimento (relacionado ao tipo de sobretensão, se de curta ou longa duração), são classificadas em sobretensões atmosféricas, sobretensões de manobra e sobretensões temporárias.

As sobretensões atmosféricas são oriundas de descargas atmosféricas que atingem diretamente o sistema ou incidem em suas proximidades. São caracterizadas por uma frente de onda rápida de alguns microssegundos e um decaimento de algumas dezenas de microssegundos de acordo com a norma NBR 6939 (2000).

As sobretensões de Manobra são caracterizadas por algum evento interno ao sistema, relacionados principalmente à ocorrência de chaveamentos e defeitos. Esta, apresenta tempo de frente mais lento em relação à anterior, da ordem de algumas dezenas ou centenas de microssegundos, com decaimento de alguns milhares de microssegundos de acordo com a norma NBR 6939 (2000). A ocorrência deste tipo de sobretensão é mais comumente observada em: energização e religamento de linhas de transmissão, aplicação e eliminação de defeitos, energização de transformadores e rejeição de carga (ESMERALDO, FILHO e FRONTIN, 2013).

Em relação as sobretensões temporárias, estas são caracterizadas por uma grande duração e amplitudes reduzidas. As frentes de onda não apresentam importância significativa visto que, são constituídas de parte sustentada das sobretensões de manobra. Observa-se este tipo de Sobretensão em: manobras do tipo rejeição de carga, ocorrência de defeitos com deslocamento de neutro e energização de linhas em vazio (ESMERALDO, FILHO e FRONTIN, 2013).

Diante destes fenômenos, o projeto de novos equipamentos elétricos, no que se refere à coordenação de isolamento, deverá levar em consideração tais sobretensões, sendo necessário que sejam realizados ensaios dielétricos, em Laboratórios de Alta Tensão, para atestar que estes equipamentos suportarão as solicitações referentes a suas classes de tensão.

A Figura 1 mostra diferentes tipos de sobretensões normatizadas de acordo com a norma NBR 6939 (2000). Estas formas de onda são usadas como base para a realização de ensaios dielétricos em alta tensão. Destaca-se principalmente a Sobretensão transitória de frente rápida denominada Impulso Atmosférico que será bastante discutida no presente trabalho.

Figura 1 – Classes e Formas das solicitações de Tensão

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Fonte: NBR 6939 (2000, p. 12)

2.2 IMPULSOS ATMOSFÉRICOS NORMALIZADOS

Impulsos atmosféricos ou impulsos de tensão de frente rápida são sobretensões que podem surgir em um sistema elétrico na ocorrência de descargas atmosféricas. Um impulso atmosférico pleno normalizado para ensaios em alta tensão é mostrado na Figura 2.2. Esta forma

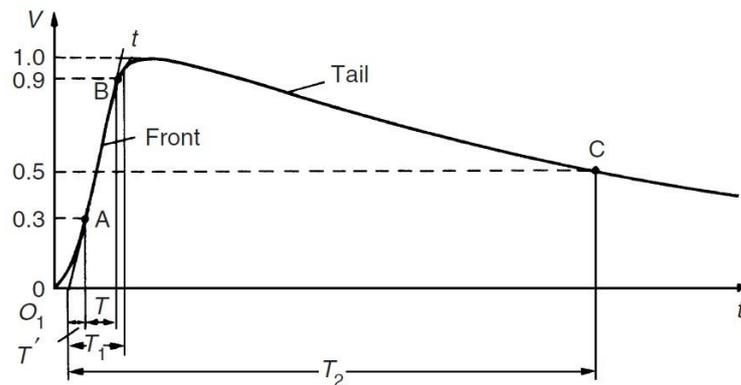
de onda é caracterizada por um parâmetro T_1 , definido como Tempo de Frente, T_2 definido como Tempo de Cauda ou Tempo até o meio valor e um valor de crista de onda V que representa o nível básico de isolamento (NBI) do equipamento a ser ensaiado e depende de sua classe de tensão.

O parâmetro T_1 representa um valor aproximado do tempo em que a onda leva para atingir entre 30 % e 90 % de seu valor de crista sendo calculado de acordo com a relação (2.1) a seguir, conforme apresentado pela norma NBR IEC 60060-1 (2013).

$$T_1 = 1,67 \cdot (t_{90\%} - t_{30\%}) = 1,67 \cdot T \quad (2.1)$$

O parâmetro T_2 representa o tempo em que a onda leva, após ultrapassar o valor máximo de tensão, para atingir 50 % do valor de crista. Ou seja, é o intervalo de tempo entre a origem e 50% do valor de crista do impulso conforme mostra a Figura 2, de acordo com orientações da norma NBR IEC 60060-1 (2013).

Figura 2 – Impulso de Tensão pleno padronizado



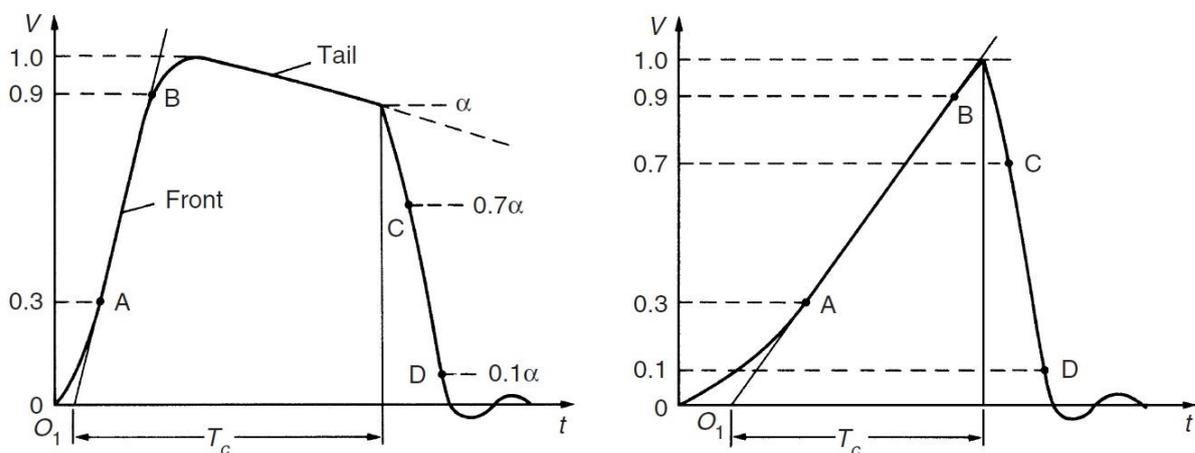
Fonte: (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000, p. 50)

Um impulso atmosférico pleno é caracterizado por representar uma descarga atmosférica completa que se propaga por uma linha de transmissão, onde não há interrupção por algum tipo de falha na isolação de equipamentos. Esta forma de onda transitória deve possuir tempo de frente igual a $1,2 \mu\text{s}$ e tempo de cauda igual a $50 \mu\text{s}$, sendo denominada por impulso $1,2/50 \mu\text{s}$. Os valores estipulados para o tempo de frente e tempo de cauda foram definidos por especialistas membros de organismos internacionais de normatização, no intuito de permitir reprodutividade e repetibilidade destas formas de onda em laboratórios de alta tensão. Todavia, estes parâmetros possuem algumas tolerâncias especificadas de acordo com a norma NBR IEC 60060-1 (2013), sendo elas:

- Valor da Tensão de Ensaio: $\pm 3\%$ (NBI $\pm 3\%$)
- Tempo de Frente: $\pm 30\%$ ($0,84\ \mu\text{s}$ à $1,56\ \mu\text{s}$)
- Tempo de Cauda: $\pm 20\%$ ($40\ \mu\text{s}$ à $60\ \mu\text{s}$)

Além do impulso atmosférico pleno, existem duas outras formas de onda de impulsos que poderão acontecer nos sistemas elétricos, sendo estas normatizadas e especificadas para ensaios dielétricos em alta tensão. Estas formas são: Impulso cortado na cauda e Impulso cortado na frente conforme é mostrado na Figuras 3.

Figura 3 – Impulsos de Tensão cortados na cauda e na frente respectivamente



Fonte: (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000, p. 50)

Nota-se que o Impulso de Tensão cortado na cauda e o impulso de tensão cortado na frente são derivados do impulso atmosférico pleno e apresentam T_c como parâmetro, sendo este caracterizado como o Tempo de corte. A tolerância aceitável para este parâmetro em relação ao impulso cortado na cauda e na frente, de acordo com a NBR IEC 60060-1 (2013):

- Impulso Cortado na Cauda: $2\ \mu\text{s} \leq T_c \leq 5\ \mu\text{s}$
- Impulso Cortado na Frente: $T_c \leq 0,5\ \mu\text{s}$

Para a análise das condições nas quais os equipamentos elétricos estão submetidos é de vital importância que se conheça os três tipos de impulsos atmosféricos apresentados previamente. Um impulso atmosférico pleno, mostrado na Figura 2, simula uma onda de tensão que se propaga ao longo de uma linha de transmissão até atingir equipamentos elétricos. Devido ao seu rápido crescimento, decaimento mais lento e elevado valor de tensão associado, este solicita de maneira severa a isolamento dos equipamentos.

Um impulso atmosférico cortado na cauda, mostrado na Figura 3, representa um impulso que, em determinado trecho da linha de transmissão, sofre um afundamento de tensão repentino provocado pela falha da isolação de um isolador. Com isso, uma onda cortada se propagará pela linha de transmissão até atingir equipamentos situados na subestação. Um impulso atmosférico cortado na frente, conforme mostrado na Figura 3, simula uma onda, derivada do impulso pleno, que é cortada na frente ao atingir diretamente ou nas proximidades dos terminais dos equipamentos. Desta forma, o elevado nível de crescimento da tensão nas proximidades dos terminais do equipamento provoca uma falha da isolação quase imediata no equipamento atingido. Estes impulsos são caracterizados por possuírem elevadas taxas de variação de tensão.

Ao se tratar da determinação do valor da tensão de ensaio, especificada como o valor de crista do impulso atmosférico, as normas específicas dos equipamentos sob teste deverão ser consultadas. Todavia, a norma NBR 6939 (2000) especifica valores de tensões suportáveis normatizadas de impulso atmosférico para diferentes classes de tensão para nortear ensaios em equipamentos elétricos. A Tabela 2.1 mostra alguns valores típicos de tensão de ensaio para classes de tensão $U_n < 245 \text{ kV}$.

Conforme observa-se na Tabela 1, a isolação dos equipamentos elétricos deverá suportar sobretensões de origem atmosférica com valor de tensão (NBI) bem maior do que o valor da tensão máxima do equipamento (U_n), sendo o NBI aproximadamente oito vezes maior do que U_m em alguns casos.

Os impulsos atmosféricos discutidos anteriormente, com seus respectivos parâmetros normatizados, são reproduzidos em laboratórios de alta tensão através de equipamentos robustos denominados Geradores de Impulsos Atmosféricos, capazes de gerar tensões impulsivas da ordem de alguns megavolts.

2.3 GERADOR DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS

Um gerador de impulsos atmosféricos é um equipamento construído sobre uma estrutura metálica, que suporta ou engloba seus principais componentes tais como: capacitores de carga, centelhadores, resistências série e paralela, resistores de carga, chave de aterramento, entre outros. É utilizado para gerar impulsos de elevados valores de tensão para a realização de ensaios em alta tensão em diversos equipamentos (HAUSCHILD e LEMKE, 2014).

Tabela 1 – Níveis de Isolamento Normalizados para a faixa ($U_n < 245$ kV)

Tensão Máxima do Equipamento (kV)	Tensão Suportável à Frequência Industrial (kV)	Tensão Suportável à Impulso Atmosférico (kV)
3,6		20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
15	34	95
		100
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
		200
72,5	140	325
		350
92,4	150	380
		450
		450
145	230	450
		550
		650
		650
245	360	650
		750
		850
		950
		1050

Fonte: Adaptada da norma NBR 6939 (2000, p. 14)

A obtenção de formas de onda com rápido tempo de frente e decaimento um pouco mais lento se dá a partir de um circuito gerador de impulsos contendo dois elementos armazenadores de energia, visto que, a forma de onda em questão poderá ser formada através da soma de duas funções exponenciais. Os elementos armazenadores de energia do circuito são capacitores, sendo um referente ao gerador de impulsos e outro associado ao objeto sob ensaio conforme será visto com maiores detalhes neste texto.

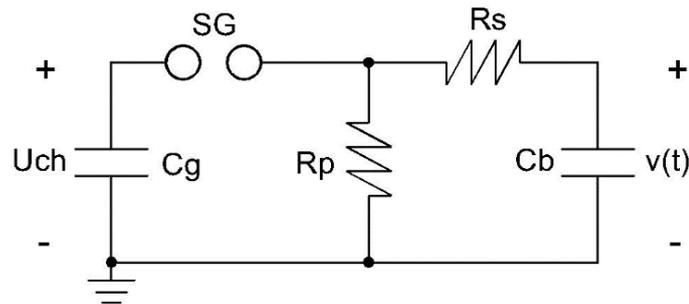
Um circuito gerador de impulsos simplificado de um estágio, com objeto sob ensaio puramente capacitivo, pode ser observado na Figura 4.

O princípio de funcionamento de um gerador consiste no carregamento do capacitor de carga C_g do gerador de impulsos, através de uma fonte CC controlada, em geral não maior que 200 kV. Assim, por meio do chaveamento do centelhador, a energia acumulada em C_g descarrega, através da resistência R_s , sobre o capacitor C_b , carregando-o. Este primeiro processo de formação da onda de impulso refere-se à frente de onda, sendo observado que o tempo de

frente T_1 é governado essencialmente pela resistência R_s e pela capacitância C_b (ZISCHANK, 2010), logo, como primeira avaliação nota-se que:

$$T_1 \propto R_s \cdot C_b \quad (2.1)$$

Figura 4 – Circuito elétrico de um gerador de impulsos de um estágio com objeto sob ensaio puramente capacitivo



Fonte: Adaptado de (HAUSCHILD e LEMKE, 2014, p. 289)

Na qual:

C_g – Capacitância do gerador;

U_{ch} – Tensão de Carregamento;

SG – Centelhador: Elemento de chaveamento do gerador funcionando como uma chave controlada por tensão;

R_p – Resistência paralela ou Resistência de cauda: Possui relação direta com o tempo de cauda do impulso;

R_s – Resistência série ou Resistência de frente: Possui relação direta com o tempo de frente do impulso;

C_b – Capacitância de carga (Capacitância do objeto sob ensaio + capacitância do divisor de tensão + capacitâncias adicionais);

$v(t)$ – Forma final de impulso de tensão sobre o objeto teste.

A relação (2.1), que apresenta o tempo de frente T_1 em função da resistência série R_s e da capacitância de carga C_b será discutida com maiores detalhes no subitem 2.3.2 deste trabalho.

Após este processo, o decaimento de tensão é determinado pelo tempo em que C_b é descarregado através das resistências R_s e R_p para o terra. Como $C_g \gg C_b$ e $R_p \gg R_s$ (ZISCHANK, 2010), o tempo de cauda T_2 é predominantemente governado por:

$$T_2 \propto R_p \cdot C_g \quad (2.2)$$

A relação (2.2) que apresenta o tempo de cauda T_2 em função da resistência paralela R_p e da capacitância do gerador C_g será discutida com maiores detalhes no subitem 2.3.3 deste trabalho.

Desta forma, os resistores R_s e R_p são, essencialmente, os elementos que modelam o impulso, sendo T_1 função da variação da resistência de amortecimento do circuito R_s e T_2 função da resistência de descarregamento dos capacitores R_p . Em um gerador de impulsos de tensão, os valores das resistências série e paralela são manipuláveis para obtenção do impulso padronizado mencionado anteriormente.

2.3.1 ANÁLISE CIRCUITAL

Primeiramente, é necessário salientar que um dos principais parâmetros de um gerador de impulsos é seu armazenamento de energia máximo (W), definido em função da capacitância do gerador de impulsos (C_g) e da tensão máxima de carregamento (U_{ch}). Desta forma:

$$W = \frac{1}{2} C_g U_{ch}^2 \quad (2.3)$$

Como a capacitância do gerador de impulsos C_g é muito maior que a do objeto sob ensaio C_b , o valor do armazenamento de energia máximo determina principalmente o custo final de um gerador (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000).

Iniciando-se a análise circuital para o circuito da Figura 4, sabe-se que para $t \leq 0$ o capacitor C_g do gerador de impulsos é carregado com uma tensão inicial igual a U_{ch} . Todavia, para $t > 0$, haverá o fechamento da chave SG de tal forma que o capacitor C_g será descarregado, por meio dos resistores R_s e R_p , em C_b . Com isso, utilizando-se a Transformada de Laplace e considerando o circuito para $t > 0$, obtém-se o circuito da Figura 5 que será utilizado como ponto de partida para a análise matemática, no qual:

$$Z_g(s) = \frac{1}{sC_g} \quad (2.4)$$

$$Z_b(s) = \frac{1}{sC_b} \quad (2.5)$$

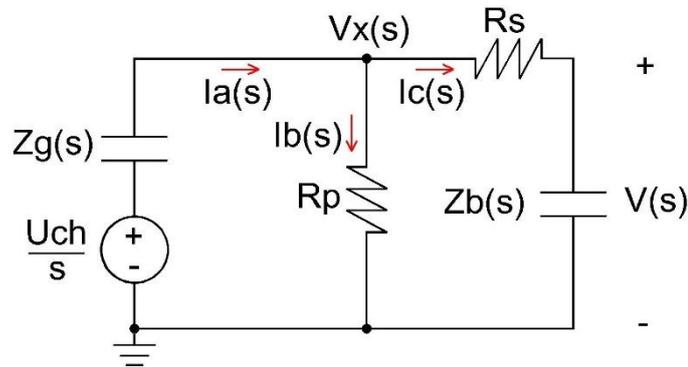
Desta forma, utilizando-se a Lei de Kirchhoff das correntes para o nó $V_x(s)$, obtêm-se:

$$I_a(s) = I_b(s) + I_c(s) \quad (2.6)$$

Logo:

$$\frac{U_{ch}/s - V_x(s)}{Z_g(s)} = \frac{V_x(s)}{R_p} + \frac{V_x(s) - V(s)}{R_s} \quad (2.7)$$

Figura 5 – Circuito elétrico de um gerador de impulsos de um estágio com objeto sob ensaio puramente capacitivo



Fonte: Adaptada de (CAGIDO, 2014, p. 7)

Entretanto, a corrente $I_c(s)$ poderá ser escrita na forma:

$$I_c(s) = \frac{V(s)}{Z_b(s)} = \frac{V_x(s) - V(s)}{R_s} \quad (2.8)$$

Isolando-se $V_x(s)$, tem-se:

$$V_x(s) = V(s) \cdot \left(1 + \frac{R_s}{Z_b(s)}\right) \quad (2.9)$$

Substituindo-se a equação (2.9) em (2.7) e escrevendo-se $V(s)$ em função de U_{ch} , após alguns passos algébricos obtém-se:

$$V(s) = \frac{U_{ch}}{s} \cdot \frac{R_p \cdot Z_b(s)}{Z_g(s) \cdot Z_b(s) + Z_g(s) \cdot R_s + Z_g(s) \cdot R_p + Z_b(s) \cdot R_p + R_s \cdot R_p} \quad (2.10)$$

Substituindo-se (2.4) e (2.5) em (2.10):

$$V(s) = \frac{U_{ch}}{s} \cdot \frac{R_p \cdot \frac{1}{sC_b}}{\frac{1}{sC_g} \cdot \frac{1}{sC_b} + \frac{1}{sC_g} \cdot R_s + \frac{1}{sC_g} \cdot R_p + \frac{1}{sC_b} \cdot R_p + R_s \cdot R_p} \quad (2.11)$$

De tal forma que:

$$V(s) = \frac{U_{ch}}{R_s \cdot C_b} \cdot \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_s C_g} + \frac{1}{R_p C_g} + \frac{1}{R_s C_b}\right)s + \frac{1}{R_s R_p C_g C_b}} \quad (2.12)$$

Reescrevendo a equação anterior, tem-se:

$$V(s) = \frac{U_{ch}}{k_1} \cdot \frac{1}{s^2 + k_2s + k_3} \quad (2.13)$$

Na qual:

$$k_1 = R_s \cdot C_b \quad (2.14)$$

$$k_2 = \frac{1}{R_s C_g} + \frac{1}{R_p C_g} + \frac{1}{R_s C_b} \quad (2.15)$$

$$k_3 = \frac{1}{R_s R_p C_g C_b} \quad (2.16)$$

Com isso, para encontrar a equação que representa o impulso de tensão no domínio do tempo, utiliza-se a transformada inversa de Laplace aplicada à equação (2.13), obtendo-se:

$$v(t) = \frac{1}{\beta - \alpha} \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \cdot \frac{U_{ch}}{k_1} \quad (2.17)$$

Na qual,

$$\alpha = -\frac{k_2}{2} - \sqrt{\frac{k_2^2}{4} - k_3} \quad (2.18)$$

$$\beta = -\frac{k_2}{2} + \sqrt{\frac{k_2^2}{4} - k_3} \quad (2.19)$$

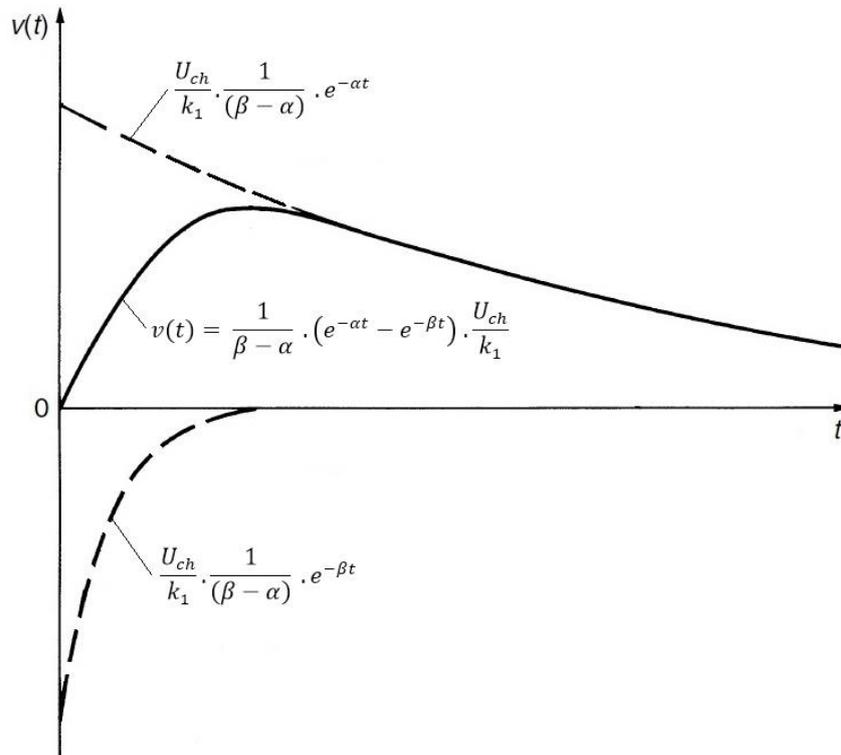
A equação (2.17) representa a expressão analítica de um impulso atmosférico aplicado ao objeto sob ensaio. Nota-se que esta equação é formada pela soma de duas funções exponenciais como esperado, retratando em uma resposta de tensão $v(t)$ superamortecida do circuito gerador de impulsos da Figura 5. A Figura 6, adaptada de (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000), mostra a composição das duas funções exponenciais para a formação do impulso de tensão atmosférico.

2.3.2 ANÁLISE DO TEMPO DE FRENTE EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE

Conforme discutido anteriormente, o tempo de frente é essencialmente função da variação da resistência série do circuito. No momento inicial de formação do impulso, a

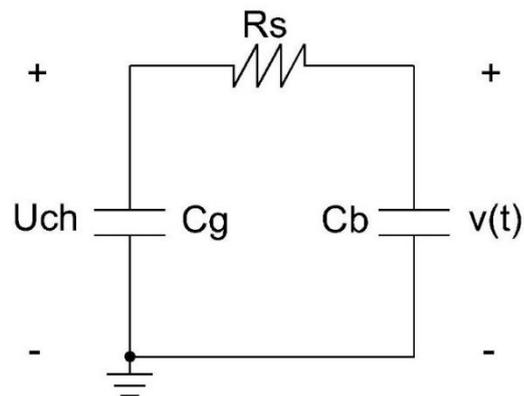
resistência paralela é desconsiderada, de tal forma que um circuito equivalente poderá ser obtido, conforme mostra a Figura 7.

Figura 6 – Formação do impulso de tensão através da composição de duas funções exponenciais



Fonte: adaptada de (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000, p. 55)

Figura 7 – Circuito gerador de impulsos após desconsideração da resistência paralela



Fonte: Adaptada de (CAGIDO, 2014, p. 15)

Desta forma, considerando-se a equação de um circuito RC para carregamento de capacitores tem-se:

$$v(t) = U_{ch} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R_s \cdot C_1}}\right) \quad (2.20)$$

Sendo, C_1 o valor equivalente das capacitâncias, ligadas em série, envolvidas no momento da carga conforme é mostrado na equação abaixo:

$$C_1 = \frac{C_g \cdot C_b}{C_g + C_b} \quad (2.21)$$

O tempo de frente de onda, de acordo com a equação (2.1), é definido como um intervalo de tempo em que a onda leva de 30% a 90% para atingir o seu valor de crista. Desta forma, aplicando-se primeiramente $t_{90\%}$ à equação (2.20) tem-se:

$$0,9 \cdot U_{ch} = U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{90\%}}{R_s \cdot C_1}}\right) \quad (2.22)$$

$$U_{ch} = \frac{e^{-\frac{t_{90\%}}{R_s \cdot C_1}}}{0,1} \quad (2.23)$$

E após, aplicando-se $t_{30\%}$ à equação (2.20) tem-se:

$$0,3 \cdot U_{ch} = U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{30\%}}{R_s \cdot C_1}}\right) \quad (2.24)$$

$$U_{ch} = \frac{e^{-\frac{t_{30\%}}{R_s \cdot C_1}}}{0,7} \quad (2.25)$$

Igualando-se as equações (2.23) e (2.25), e, após alguns passos algébricos obtém-se:

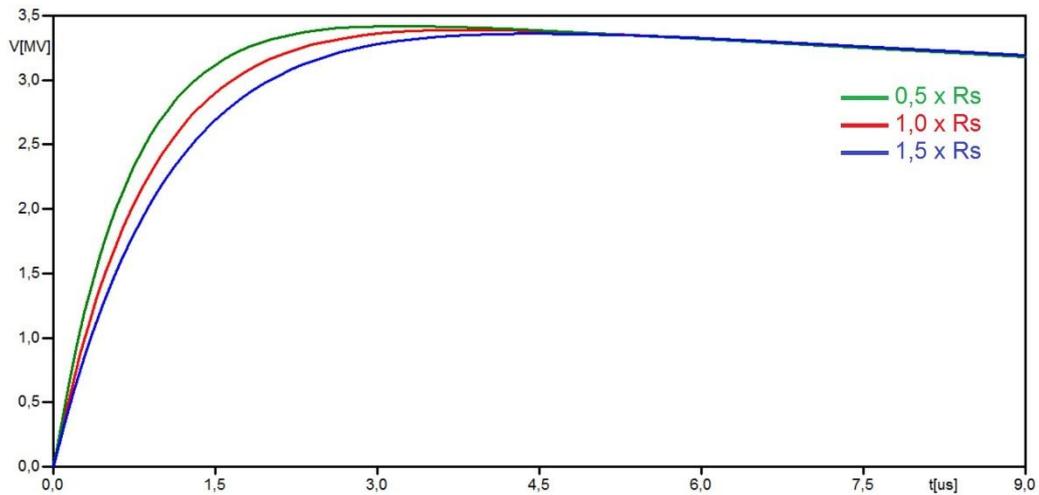
$$\frac{t_{90\%} - t_{30\%}}{R_s \cdot C_1} = 1,9459 \quad (2.26)$$

Logo, compondo-se a equação (2.1) e (2.26) é possível definir o tempo de frente em função da resistência série total do circuito gerador de impulsos conforme é mostrado na relação seguinte:

$$T_1 = 1,67 \cdot (1,9459 \cdot R_s \cdot C_1) = 3,25 \cdot R_s \cdot C_1 \quad (2.27)$$

A Figura 8 apresenta o efeito da variação da resistência série total do circuito no tempo de frente do impulso, mantendo-se a resistência paralela constante. Este efeito é aumentar ou diminuir o tempo de frente T_1 de maneira proporcional a R_s .

Figura 8 – Efeito da resistência série no tempo de frente



Fonte: Do autor

2.3.3 ANÁLISE DO TEMPO DE CAUDA EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA PARALELA

O tempo de cauda é essencialmente governado pela variação da resistência paralela do circuito. No momento de descarregamento do circuito para a terra, a resistência série é desconsiderada, de tal forma que um circuito equivalente poderá ser obtido conforme mostra a Figura 9.

Com isso, considerando-se a equação de um circuito RC para o descarregamento de capacitores tem-se:

$$v(t) = U_{ch} \cdot e^{\frac{-t}{R_p \cdot C_2}} \quad (2.28)$$

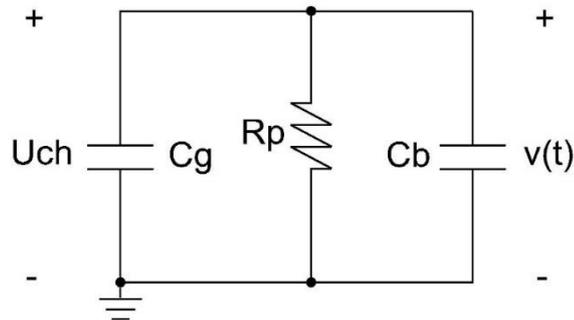
Sendo, C_2 o valor equivalente das capacitâncias, ligadas em paralelo, envolvidas no momento da descarga conforme é mostrado na equação abaixo:

$$C_2 = C_g + C_b \quad (2.29)$$

O tempo de cauda é definido como o tempo em que o impulso, após ultrapassar o valor de crista, atinge 50% do seu valor de pico. Desta forma, aplicando $t_{50\%}$ à equação (2.28) tem-se:

$$0,5 \cdot U_{ch} = U_{ch} \cdot e^{\frac{-T_2}{R_p \cdot C_2}} \quad (2.30)$$

Figura 9 – Circuito gerador de impulsos após desconsideração da resistência série



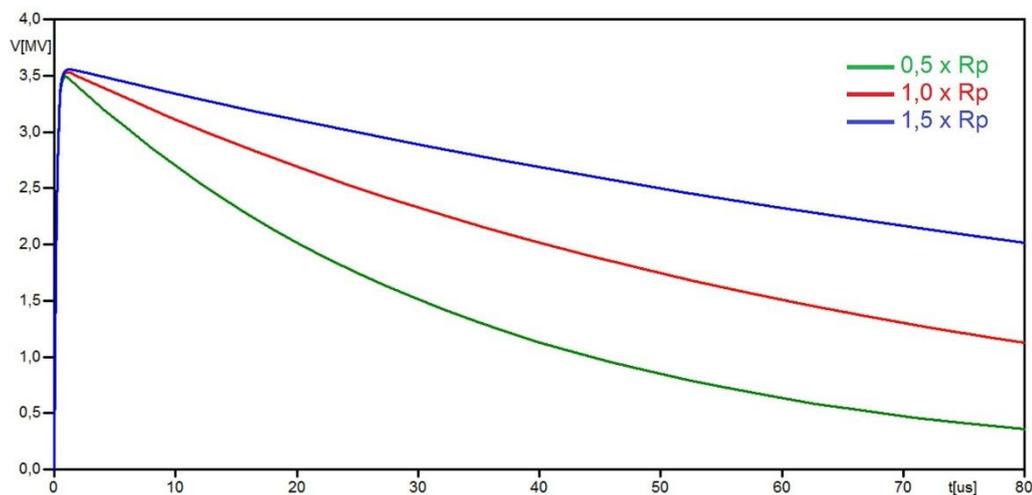
Fonte: Adaptada de (CAGIDO, 2014, p. 17)

Desenvolvendo-se os cálculos, é possível definir o tempo de cauda em função da resistência paralela total do circuito gerador de impulsos conforme é mostrado na equação seguinte:

$$T_2 = 0,693 \cdot R_p \cdot C_2 \quad (2.31)$$

A Figura 10 apresenta o efeito da variação da resistência paralela total do circuito no tempo de cauda do impulso, mantendo-se a resistência série constante.

Figura 10 – Efeito da resistência paralela no tempo de cauda



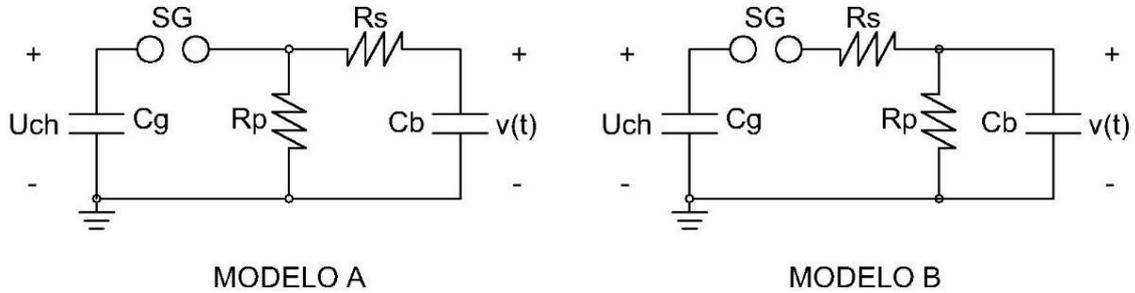
Fonte: Do autor

2.3.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO GERADOR

Um gerador de impulsos de tensão poderá ser montado de duas maneiras distintas, sendo estas chamadas de modelo A e modelo B, divididas para facilitar o cálculo de seus rendimentos (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000). Estas diferenças de montagem estão

relacionadas ao posicionamento da resistência série e paralela no circuito, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Modelos de montagem de um gerador de impulsos



Fonte: Adaptada de (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000, p. 53)

Para ambos os modelos, o valor de pico da tensão de saída do gerador (V_p) é menor do que o valor de sua tensão de carregamento (U_{ch}) devido as perdas internas do gerador. Desta forma, define-se eficiência ou rendimento (η) de um gerador de impulsos como a relação entre seu valor máximo de tensão sobre sua tensão de carregamento, como a seguir:

$$\eta = \frac{V_p}{U_{ch}} \quad (2.32)$$

2.3.4.1 MODELO A

Para se calcular o valor de pico, primeiramente calcula-se t_{max} , sendo este o tempo em que V_p ocorrerá. Para isto, aplica-se $\frac{dv(t)}{dt} = 0$ à equação (2.17), logo:

$$\frac{d\left[\frac{1}{\beta-\alpha} \cdot (e^{-\alpha t_{max}} - e^{-\beta t_{max}}) \cdot \frac{U_{ch}}{k_1}\right]}{dt} = 0 \quad (2.33)$$

Após algumas manipulações matemáticas obtém-se:

$$t_{max} = \frac{\ln(\beta/\alpha)}{\beta-\alpha} \quad (2.34)$$

Substituindo-se a equação (2.34) em (2.17) tem-se:

$$V_p = \frac{1}{\beta-\alpha} \cdot (e^{-\alpha t_{max}} - e^{-\beta t_{max}}) \cdot \frac{U_{ch}}{k_1} \quad (2.35)$$

$$Vp = \frac{1}{\beta - \alpha} \cdot \left[\left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{-\alpha/(\beta - \alpha)} - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{-\beta/(\beta - \alpha)} \right] \cdot \frac{U_{ch}}{k_1} \quad (2.36)$$

Substituindo-se a equação (2.36) em (2.32) resulta:

$$\eta = \frac{1}{(\beta - \alpha)k_1} \cdot \left[\left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{-\alpha/(\beta - \alpha)} - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{-\beta/(\beta - \alpha)} \right] \quad (2.37)$$

Então, aplicando-se as constantes α e β das equações (2.18) e (2.19) na equação (2.37) e, após algumas aproximações (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000), tem-se que o rendimento do gerador de impulsos em função de seus parâmetros é dado por:

$$\eta \cong \frac{C_g}{(C_g + C_b)} \frac{R_p}{(R_s + R_p)} = \frac{1}{(1 + C_g/C_b)} \frac{1}{(1 + R_s/R_p)} \quad (2.38)$$

2.3.4.2 MODELO B

Considerando-se α e β como raízes da equação (2.17) tem-se :

$$\alpha \cdot \beta = k_3 \quad (2.39)$$

$$\alpha + \beta = k_2 \quad (2.40)$$

Substituindo (2.14), (2.15) e (2.16) em (2.39) e (2.40):

$$k_1 = R_s \cdot C_b = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha + \beta}{\alpha \cdot \beta} \right) \left[1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha \cdot \beta}{(\alpha + \beta)^2} \left(1 + \frac{C_b}{C_g} \right)} \right] \quad (2.41)$$

Partindo-se de $C_g \gg C_b$, na maioria dos casos, e considerando que $\beta \gg \alpha$ para formas de onda padronizadas de 1,2/50 μ s, a relação (2.41) se reduz a:

$$k_1 \cong \frac{\left(1 + \frac{C_b}{C_g} \right)}{\alpha + \beta} \quad (2.42)$$

Então, substituindo-se a equação (2.42) em (2.37) tem-se:

$$\eta \cong \frac{C_g}{(C_g + C_b)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_b}{C_g} \right)} \quad (2.43)$$

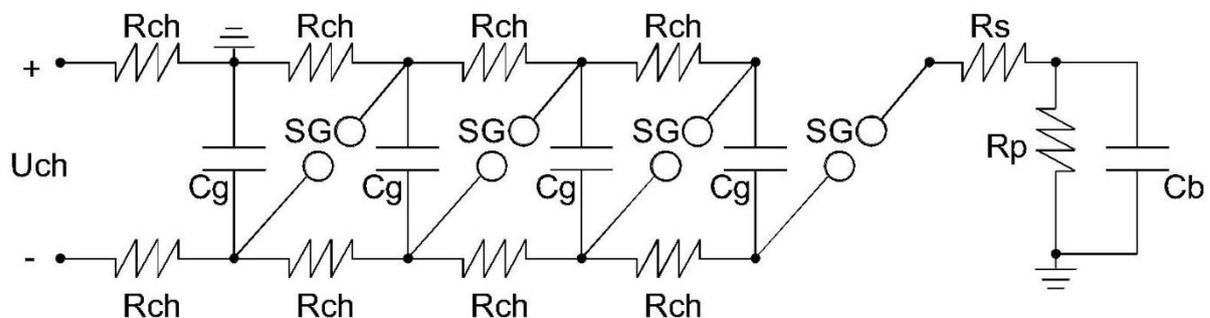
Ou seja, o rendimento é essencialmente função da razão C_b/C_g .

2.4 CIRCUITO GERADOR DE IMPULSO DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

Com o passar dos tempos, circuitos geradores de impulsos de maior porte, semelhantes ao da Figura 4, foram sendo criados para suprir a necessidade de tensões impulsivas cada vez mais elevadas, visto que, o nível de tensão dos sistemas de transmissão de energia aumentava também cada vez mais. Com isso, observou-se que estes circuitos, tal como eram construídos, começaram a apresentar diversas limitações físicas como por exemplo, a dificuldade em ajustar os centelhadores para disparo em tensões de carregamento mais elevadas, o aumento do tamanho físico dos circuitos, a dificuldade em obter níveis de tensão contínua mais elevados para carregamento dos capacitores do gerador e por fim, a ocorrência de efeito corona nos elementos do circuito durante o carregamento dos capacitores de carga (KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J., 2000).

Para superar as dificuldades apresentadas anteriormente, em 1923, Marx, sugeriu um arranjo no qual uns números de estágios de capacitores idênticos são carregados em paralelo, através de resistores de carga elevados, e são descarregados em série através de centelhadores (NAIDU e KAMARAJU, 2009). Com isso, o carregamento dos estágios é realizado com uma fonte de tensão contínua limitada à 200 kVcc na maioria dos casos. No descarregamento, os capacitores são descarregados em série, para obtenção de um impulso atmosférico de magnitude elevada, proporcional ao número de estágios utilizados. Desta forma, um gerador de impulsos de vários estágios poderá gerar altas tensões impulsivas a partir de uma fonte de alimentação C.C. relativamente pequena. A Figura 12 mostra um exemplo de um gerador de Marx.

Figura 12 – Diagrama esquemático de um circuito de Marx de 4 estágios



Fonte: Adaptada de (NAIDU e KAMARAJU, 2009, p. 138)

Conforme observa-se na Figura 12, o gerador é alimentado por uma tensão C.C. representada por U_{ch} que carrega igualmente os capacitores C_g através de resistores de carga R_{ch} . Após o carregamento, inicia-se o processo de disparo do gerador com a disrupção do centelhador SG do primeiro estágio, provocando a disrupção em cascata dos demais centelhadores. Na prática, para que isso ocorra, é necessário que o espaçamento das esferas centelhadoras do primeiro estágio seja um pouco menor do que as demais, fazendo com que a disrupção seja iniciada por esta. Além disto, o processo de disparo poderá ser iniciado também através de um equipamento auxiliar denominado Trigger, sendo este um gerador de centelha que será apresentado posteriormente com maiores detalhes no capítulo 4. Com o fechamento dos centelhadores, os capacitores se descarregarão em série sobre os elementos modeladores de forma de onda (R_s e R_p) e o objeto sob teste representado por C_b .

Nota-se que, no circuito da Figura 12, o resistor série está localizado entre os capacitores e o objeto sob teste. Caso um gerador fosse construído desta maneira, o valor total de tensão estaria sobre este resistor, fazendo com que as dimensões físicas e os custos associados a este elemento fossem elevados. Todavia, uma maneira de resolver esta situação é introduzir resistores série de maneira distribuída ao longo dos estágios do gerador. Um gerador de impulsos típico utilizado em laboratórios de alta tensão pode ser observado na Figura 13, no qual as resistências série e paralela são distribuídas através dos “n” estágios do gerador, eliminando assim o problema previamente mencionado.

Para uma melhor compreensão do circuito gerador de impulsos de múltiplos estágios no momento do disparo, o circuito da Figura 13 poderá ser simplificado através de um equivalente de um estágio, semelhante ao da Figura 2.6, conforme equações apresentadas a seguir:

$$C'_g = \frac{C_g}{n} \quad (2.44)$$

$$R'_p = n \cdot R_p \quad (2.45)$$

$$R'_s = n \cdot R_s \quad (2.46)$$

nas quais:

C'_g – Capacitância total do gerador na configuração série;

C_g – Capacitância por estágio;

R'_p – Resistência paralela total;

R_p – Resistência paralela por estágio;

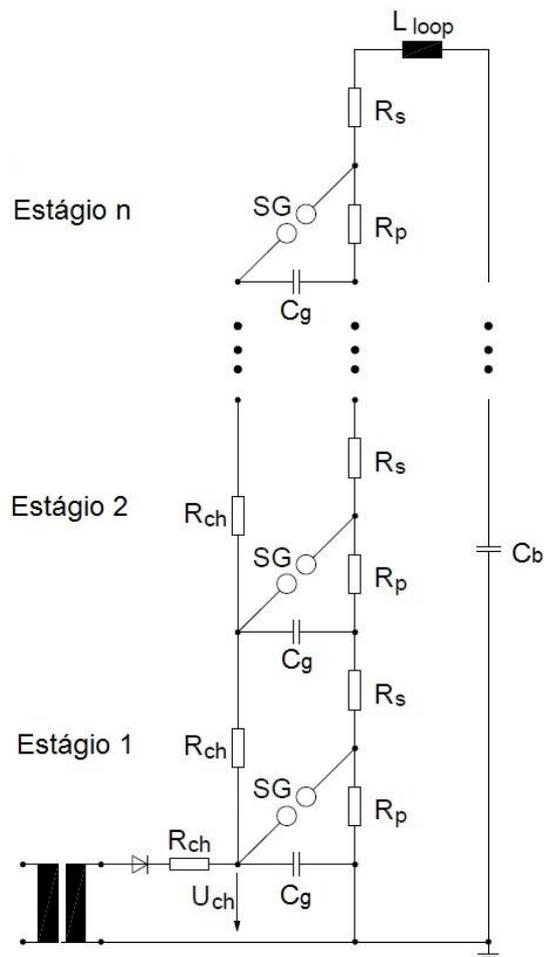
R'_s – Resistência série total;

R_s – Resistência série por estágio;

n – Número de estágios.

As equações (2.44), (2.45) e (2.46) representam um valor equivalente do montante de capacitores e resistores envolvidos no gerador de impulsos de múltiplos estágios. A resistência paralela total R'_p é calculada da mesma maneira que a resistência série total R'_s pois são valores equivalentes dos respectivos resistores, não significando que os resistores em paralelo estão conectados todos em paralelo no momento da descarga.

Figura 13 – Gerador de impulsos de múltiplos estágios com resistências série e paralela distribuídas.

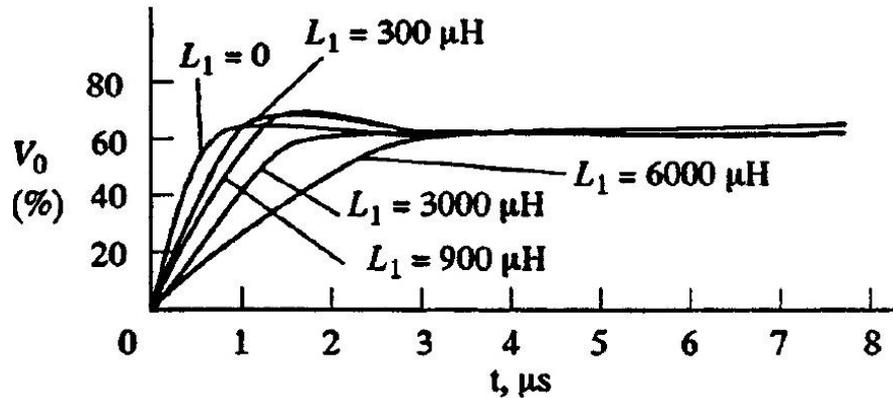


Fonte: Adaptada de (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 15)

Vale ressaltar que na prática, um circuito gerador de impulsos poderá apresentar em sua composição indutâncias parasitas em série não desejadas que deverão ser incluídas em seu modelo. Estas indutâncias causam oscilações na frente do impulso e devem ser minimizadas no processo de construção dos componentes do gerador. Na Figura 13 as indutâncias parasitas estão representadas como L_{loop} , sendo este um valor equivalente da contribuição de indutância de cada estágio. O valor das indutâncias se altera em função das dimensões físicas do gerador

e poderá variar de $10 \mu\text{H}$ à centenas de microhenry (NAIDU e KAMARAJU, 2009). A Figura 14 apresenta o efeito da variação da indutância parasita nas oscilações de um impulso de tensão.

Figura 14 – Influência da indutância parasita na frente de onda do impulso. V_0 é a porcentagem da tensão de carregamento do gerador.



Fonte: (NAIDU e KAMARAJU, 2009, p. 136)

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo em questão abordou aspectos teóricos a respeito das sobretensões atmosféricas em sistemas de energia elétrica, bem como, a geração de altas tensões impulsivas para ensaios em equipamentos. É de vital importância que o leitor se familiarize com os termos utilizados neste capítulo, principalmente no que se refere a parâmetros de um impulso de tensão, pois estes serão bastante discutidos nos capítulos seguintes.

3 ENSAIOS DE TENSÃO SUPORTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADORES

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos mais importantes equipamentos de conversão de energia encontrado nos sistemas elétricos é o transformador de potência. A grande vantagem da corrente alternada em relação a contínua deve-se a este equipamento que possibilita a obtenção de diferentes níveis de tensão quase sem perdas. Na geração de energia, o funcionamento mais econômico dos geradores síncronos é feito em tensões de até 25 kV. Por outro lado, no intuito de minimizar as perdas por efeito joule e maximizar a potência transmitida, a transmissão de energia para longas distâncias se dá em níveis de tensão de até 1000 kV (ESMERALDO, FILHO e FRONTIN, 2013). Já na distribuição, por questões econômicas e de segurança humana, a tensão chega até o consumidor final em valores mais baixos limitados à 34,5 kV. Desta forma, nos sistemas elétricos, há sempre a necessidade de se trabalhar em diferentes níveis de tensão, sendo o transformador o equipamento que desempenha esta função.

Durante a sua operação, o transformador poderá estar submetido a vários tipos de solicitações de tensão, sejam elas atmosféricas, temporárias ou de manobra. Com isso, a isolação interna dos enrolamentos e a isolação entre enrolamentos e terra deverão ambas suportarem diferentes sobretensões. No intuito de melhorar a confiabilidade dos sistemas, vários ensaios dielétricos são especificados em norma para avaliar o comportamento da isolação do transformador. Estes ensaios constam fundamentalmente da aplicação de tensões à frequência industrial (tensões aplicadas e tensões induzidas), impulso de manobra (forma dupla exponencial 250/2500 μ s) e impulsos atmosféricos (forma dupla exponencial 1,2/50 μ s).

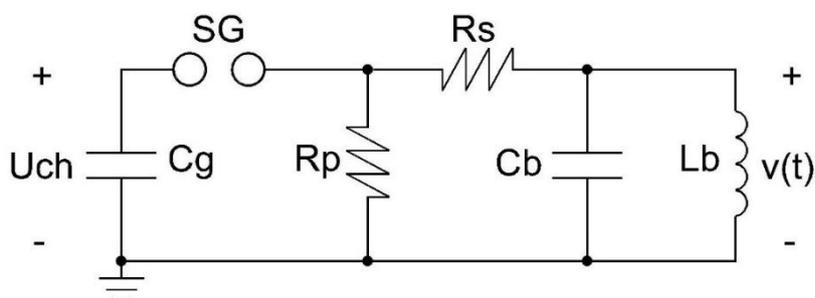
De maneira específica, tratando-se dos ensaios de impulsos de manobra e atmosférico no transformador, estes visam a detecção de falhas nos enrolamentos e na isolação geral quando o equipamento é submetido a estes transitórios de tensão. Para isto, são impostas sobretensões impulsivas severas, com valores de até 10 pu, conforme mostrado na Tabela 1. Portanto, de uma maneira geral, um transformador deverá responder linearmente para um impulso de tensão normalizado e para outro com metade deste, mantendo sua impedância constante quando analisada a corrente em seus enrolamentos.

O presente capítulo busca apresentar as premissas, metodologias e circuitos para realização dos ensaios de tensão suportável de impulso atmosférico em transformadores, de acordo com as normas nacionais e internacionais vigentes.

3.2 CIRCUITO DE ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADOR

No capítulo 2, foram discutidas metodologias gerais a respeito do funcionamento dos geradores de impulsos utilizados em laboratórios de alta tensão. Todavia, quando se definiu um circuito gerador de impulsos padrão para ensaios, conforme Figura 4, considerou-se um objeto sob teste puramente capacitivo representado apenas pela capacitância C_b . De fato, a utilização do circuito da Figura 4 é suficiente para a maioria dos ensaios visto que o teste avalia a suportabilidade da isolação do equipamento, que é bem representada por uma capacitância apenas. Entretanto, tratando-se de ensaios em transformadores, uma indutância efetiva de ensaio L_b deverá ser adicionada para representar o efeito indutivo do enrolamento do transformador, tornando o objeto sob ensaio capacitivo e indutivo simultaneamente. Um circuito geral para ensaio de tensão aplicada de impulso atmosférico em transformadores é mostrado esquematicamente na Figura 15.

Figura 15 – Circuito elétrico de um gerador de impulsos de um estágio com objeto sob ensaio capacitivo e indutivo.



Fonte: Adaptada de (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 19)

onde,

C_g – Capacitância do gerador;

U_{ch} – Tensão de Carregamento;

SG – Centelhador: Elemento de chaveamento do gerador funcionando como uma chave controlada por tensão;

R_p – Resistência paralela ou Resistência de cauda: Possui relação direta com o tempo de cauda do impulso;

R_s – Resistência série ou Resistência de frente: Possui relação direta com o tempo de frente do impulso;

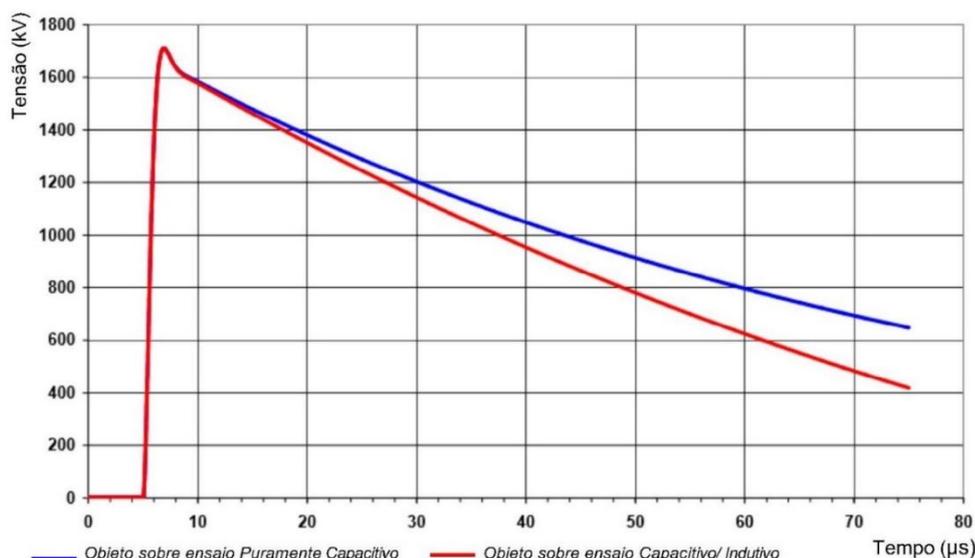
C_b – Capacitância de carga;

L_b – Indutância efetiva de ensaio ;

$v(t)$ – Forma final de impulso de tensão sob o objeto teste.

A inserção desta indutância mudará a característica do impulso de tensão aplicado, especificamente, no que se refere ao seu tempo de cauda, conforme é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Influência da indutância L_b na forma de onda do impulso



Fonte: Adaptada de (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 22)

A indutância efetiva de ensaio L_b é adicionada ao circuito para representar o efeito indutivo do enrolamento do transformador. Vale ressaltar que a indutância L_b é uma função da indutância de curto circuito do transformador L_{cc} . Por sua vez, L_{cc} pode ser calculada, de acordo com (GAMLIN e SCHWENK, 2011), através da equação abaixo:

$$L_{cc} = \frac{u_{cc} \cdot U_n^2}{100 \cdot \omega \cdot S_n} \quad (3.1)$$

na qual:

L_{cc} – Indutância de curto circuito;

u_{cc} – Impedância de curto circuito do transformador em %;

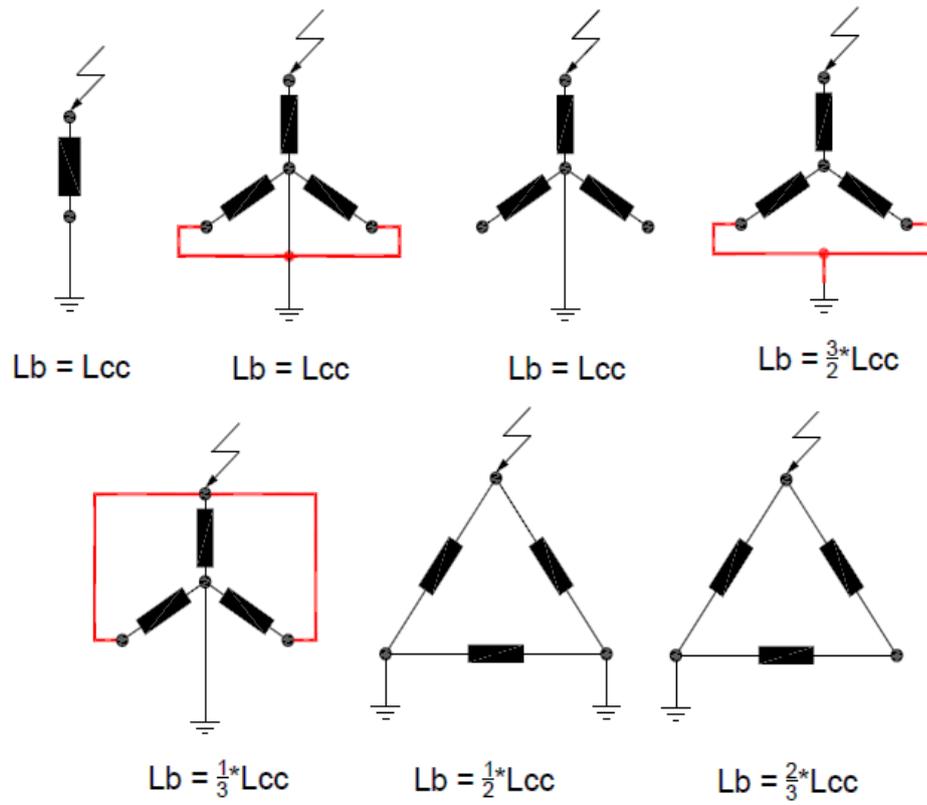
U_n – Tensão nominal do transformador;

$\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência nominal do transformador;

S_n – Potência nominal do transformador.

A indutância efetiva de ensaio poderá ser determinada utilizando-se a equação (3.1) e dependerá do tipo de conexão dos enrolamentos do transformador (delta ou estrela), bem como da conexão destes enrolamentos durante o ensaio. A Figura 17 mostra os diferentes tipos de conexão dos transformadores durante um ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico, bem como a relação da indutância efetiva L_b com a indutância de curto circuito L_{cc} .

Figura 17 – Dependência da indutância efetiva de ensaio L_b com o tipo de conexão do transformador durante o ensaio



Fonte: Adaptada de (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 20)

Com isso, após apresentada a indutância efetiva de ensaio L_b e tendo-se mostrado um circuito equivalente simplificado para ensaio de tensão suportável em transformadores, é possível realizar algumas análises no intuito de encontrar as especificidades que os ensaios em equipamentos com enrolamentos têm em relação aos outros.

3.3 ANÁLISE DA INDUTÂNCIA L_b E CONTROLE DO TEMPO DE CAUDA

Os ensaios em transformadores poderão apresentar diferentes valores de indutâncias e isto poderá afetar a forma de onda de impulso que será gerada para tal. Uma classificação apresentada na norma NBR 5356-4 (2008) será utilizada para quantificar os valores das indutâncias de acordo com a sua influência no circuito de ensaio. Desta forma, os enrolamentos poderão ser classificados da seguinte forma: Enrolamentos de Alta Indutância ($L_b \geq 100$ mH); Enrolamentos de Média Indutância ($20 \text{ mH} \leq L_b < 100$ mH) e Enrolamentos de Baixa Indutância ($L_b < 20$ mH).

3.3.1 ENROLAMENTOS DE ALTA INDUTÂNCIA ($L_b \geq 100$ mH)

Para altos valores de indutância, acima de 100 mH, o efeito indutivo poderá ser desconsiderado no circuito da Figura 15, visto que a impedância do enrolamento, para altas frequências, será elevada. Logo, o tempo de frente e o tempo de cauda sofrerão influência mínima da indutância L_b podendo ser calculados com uma boa aproximação pelas equações (2.27) e (2.31).

3.3.2 ENROLAMENTOS DE MÉDIA INDUTÂNCIA (20 mH $\leq L_b < 100$ mH)

Para esta faixa de valores, a impedância do enrolamento será significativamente pequena e influenciará o circuito de ensaio reduzindo o tempo de cauda do impulso aplicado ao transformador. Com isso, a equação (2.31) não poderá ser utilizada, sendo que, a resistência paralela deverá ser aumentada progressivamente até compensar a redução do tempo de cauda. De acordo com norma NBR 5356-4 (2008), diferentes valores de resistências paralelas devem ser testados, sendo que, experimentos realizados apontam valores de 2 a 10 vezes o valor de R_p calculado de acordo com a equação (2.31).

3.3.3 ENROLAMENTOS DE BAIXA INDUTÂNCIA ($L_b < 20$ mH).

Primeiramente, é necessário destacar que os menores valores de indutância são encontrados em transformadores que possuem mais baixas tensões, abaixo de 36 kV, comumente os utilizados na distribuição de energia. FESER (1977), apresenta diferentes valores de indutância de curto circuito de enrolamentos de transformadores (L_{cc}) calculados de acordo com a equação (3.1) para diferentes transformadores considerando a impedância de curto circuito u_{cc} igual a 15 % à frequência de 50 Hz. Recalculando-se estes dados para a frequência de 60 Hz, obtém-se os dados de acordo com a Tabela 2.

Para uma indutância menor que 20 mH, a impedância do enrolamento será significativamente pequena, introduzindo uma significativa oscilação na forma de onda do impulso com diminuição do seu tempo de cauda. Além disto, é introduzido um *undershoot* à forma de onda (valor de crista de polaridade oposta) o qual não deve ser superior a 50 % do valor de pico do ensaio conforme recomendações da norma NBR 5356-4 (2008). Os transformadores com menores indutâncias de enrolamentos ampliam os problemas citados,

causando deformação expressiva na forma de onda do circuito de ensaio, encurtando seu tempo de cauda e dificultando a obtenção da forma de onda padrão 1,2/50 μ s (FESER, 1977).

Tabela 2 – Indutâncias de Curto Circuito de Enrolamentos de Transformadores

Tensão máxima do Equipamento (kV)	NBI (kV)	Indutância Lcc (mH)						
		Potência Nominal (MVA)						
		50	100	200	400	600	1000	2000
1100	2800	-	-	2407	1203	802	481	240
765	2400	-	-	1164	582	388	232	116
525	1550	-	-	548	274	182	109	54,8
420	1425	-	701	350	175	116	70,1	35
245	1050	477	238	119	59	39,8	23,8	11,9
123	550	120	60	30	15	10	-	-
36	170	10	5,15	2,57	1,28	0,85	-	-
24	125	4,58	2,29	1,14	0,57	-	-	-
12	75	1,14	0,57	0,28	-	-	-	-

Fonte: Adaptada de (FESER, 1977, p. 4)

Em relação ao problema no qual baixas indutâncias causam ao tempo de cauda de impulso, algumas metodologias poderão ser aplicadas ao circuito de ensaio para resolução desta questão, sendo estas:

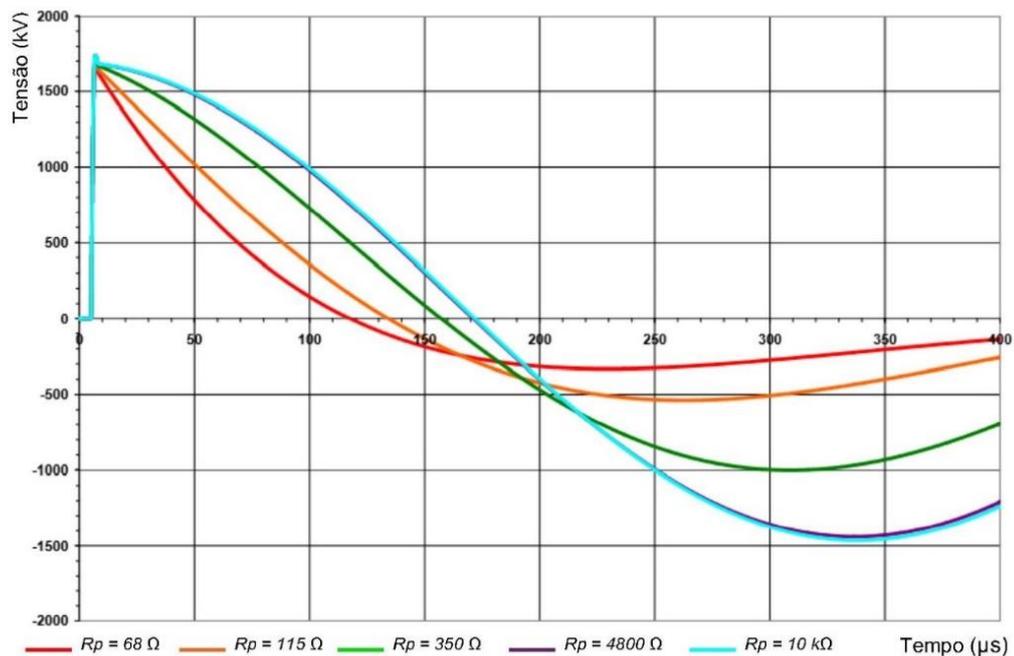
- Aumento da resistência paralela total do circuito (R_p) com o conseqüente aumento do tempo de cauda do impulso, conforme discutido no item 2.3.3;
- Aumento do valor da capacitância total do gerador de impulso (C_g) com conseqüente aumento da energia acumulada;
- Inserção de um circuito Glaninger para indutâncias menores que 3 mH.

O aumento do valor da resistência paralela devido ao baixo valor de indutância L_b do enrolamento do transformador irá resultar em um alto valor de crista de polaridade oposta, quanto maior for o valor de R_p . Com isso, este método é útil em alguns casos, porém é limitado diante dos altos valores de *undershoot* ocasionados. Tal método é o mais utilizado para calibrar o tempo de cauda nos ensaios de impulso da grande maioria dos equipamentos, entretanto, tratando-se de ensaios em transformadores, sua utilização está limitada aos casos em que o equipamento apresenta enrolamentos de alta e média indutância. Os problemas de altos valores de *undershoots* podem ser confirmados através da Figura 18 na qual são mostrados impulsos

de tensões aplicados a um objeto sob ensaio hipotético que possui $C_b = 3\text{nF}$ e $L_b = 200\text{mH}$, para diferentes valores de R_p (GAMLIN e SCHWENK, 2011).

No caso de aumento da capacitância total do gerador, sabe-se que o tempo de cauda é diretamente proporcional à capacitância do gerador de impulsos, conforme equação (2.31) apresentada previamente. Logo, um aumento neste parâmetro resultará em um significativo aumento no tempo de cauda e consequente diminuição do valor de crista de polaridade oposta (GAMLIN e SCHWENK, 2011). Maiores valores de capacitância poderão ser alcançados utilizando-se estágios conectados em paralelo ou série paralelo de geradores de impulso de múltiplos estágios, conforme o gerador de impulsos de tensão mostrado na Figura 13.

Figura 18 – Influência do aumento da resistência paralela em objetos sob ensaios capacitivos/indutivos



Fonte: (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 23)

Caso a indutância do objeto sob ensaio possua valor extremamente baixo ($L_b < 3 \text{ mH}$), o tempo de cauda não poderá ser alcançado apenas com o aumento da resistência R_p . Nestes casos, um circuito especial denominado Glaninger é necessário. O circuito Glaninger é constituído basicamente de uma indutância L_d e um resistor paralelo R_d . A correta inserção do Glaninger ao circuito de ensaio é mostrada na Figura 19, na qual, a indutância L_d é conectada em paralelo com a resistência de frente R_s (GAMLIN e SCHWENK, 2011).

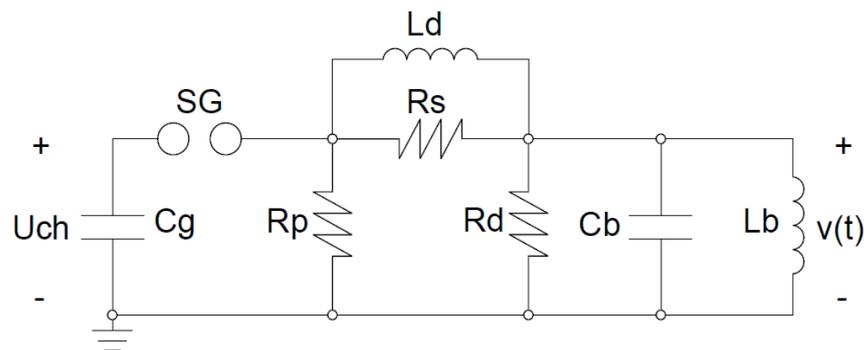
A indutância L_d possui uma alta impedância se comparada ao resistor R_s durante a frente de onda, logo, não influenciará no tempo de frente T_1 . Em relação ao decaimento da onda, a indutância L_d curto circuitará a resistência R_s de tal forma que o tempo de cauda dependerá de

uma oscilação cossenoidal entre $(L_d + L_b)$ com C_g , a qual é amortecida pelo resistor R_p do gerador de impulsos de tensão.

Para valores muito baixos de L_b , uma divisão de tensão ocorre entre L_d e L_b . Por esta razão, um resistor R_d é conectado em paralelo com o objeto sob ensaio. O valor deste resistor deve ser escolhido de tal forma que a divisão de tensão entre R_s e R_d , enquanto C_b carrega, seja equivalente a divisão de tensão entre L_d e L_b durante o descarregamento de C_b . Logo, R_d poderá ser calculado de acordo com a equação (3.2). É importante destacar que o circuito Glaninger sempre necessitará de uma resistência R_d em paralelo ao objeto sob ensaio (GAMLIN e SCHWENK, 2011).

$$R_d = R_s \cdot \frac{L_b}{L_d} \quad (3.2)$$

Figura 19 – Circuito equivalente de um gerador de impulsos com objeto sob ensaio capacitivo/indutivo após inserção do Glaninger.



Fonte: Adaptada de (HAUSCHILD e LEMKE, 2014, p. 325)

A indutância L_d do circuito Glaninger, de acordo com (HAUSCHILD e LEMKE, 2014), deve ser escolhida de tal forma que satisfaça a condição da inequação (3.3), logo, um valor entre 1% e 10% do valor da indutância L_b .

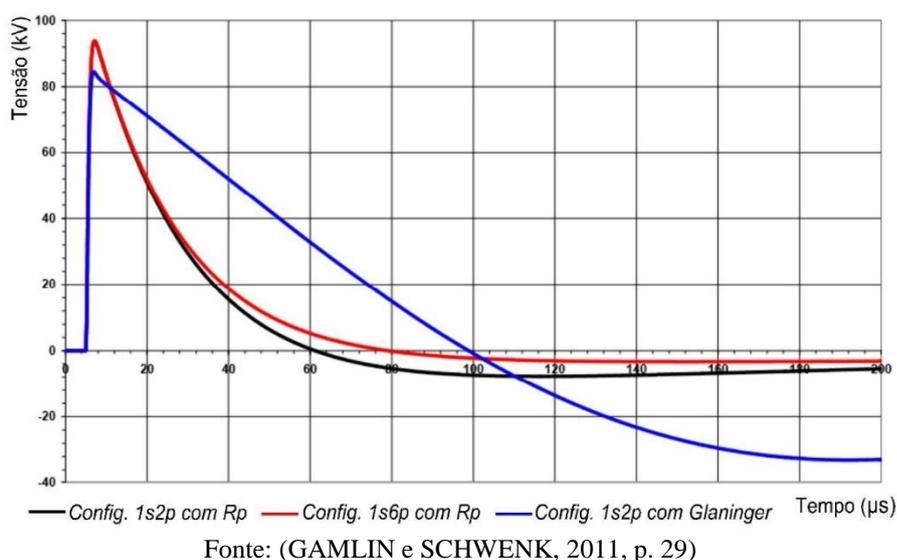
$$0,01 L_b \leq L_d \leq 0,1 L_b \quad (3.3)$$

A Figura 20 apresenta o impulso de tensão aplicado a um objeto sob ensaio com $C_b = 13$ nF e $L_b = 1,1$ mH. O gerador de impulsos utilizado para este exemplo possui 6 estágios, 2 nF e 10 kJ por estágio (GAMLIN e SCHWENK, 2011). A notação 1s2p mostrada na legenda da figura refere-se à configuração do gerador de impulsos com 1 estágio em série e 2 em paralelo. Quanto mais estágios conectados em paralelo, maior será a capacitância do gerador.

Com isso, a configuração 1s6p representa a maior capacitância possível de se obter com este gerador de impulsos.

Nota-se claramente que devido à baixa indutância do objeto sob ensaio, um aumento significativo da capacitância do gerador não surtirá grandes efeitos no tempo de cauda do impulso. Porém, ao se utilizar um circuito Glaninger, consegue-se claramente obter uma forma de tensão impulsiva que se aproxima da padronizada, tipicamente a utilizada em ensaios de impulso de tensão.

Figura 20 – Influência do circuito Glaninger na Forma de impulso aplicado



3.4 METODOLOGIA DE ENSAIO DE ACORDO COM A NBR 5356-3 e NBR 5356-4

No tópico 3.2, foi apresentado um circuito de ensaio de impulso atmosférico equivalente, sendo usado apenas para representar os elementos elétricos envolvidos no processo e suas influências na forma de onda final. Entretanto, em termos práticos, o circuito para ensaio de impulso atmosférico pleno e de onda cortada para transformadores apresentam algumas especificidades em relação ao mostrado anteriormente que serão destacadas nos tópicos a seguir.

O ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico (IA) em transformadores é normatizado de acordo com as recomendações das normas NBR 5356-3 (2008) e NBR 5356-4 (2008). O ensaio deve ser realizado apenas nos enrolamentos que possuem terminais acessíveis externamente. Para transformadores com isolamento a óleo, a tensão de ensaio deve ter polaridade negativa, reduzindo assim o risco de descargas externas no circuito de ensaio.

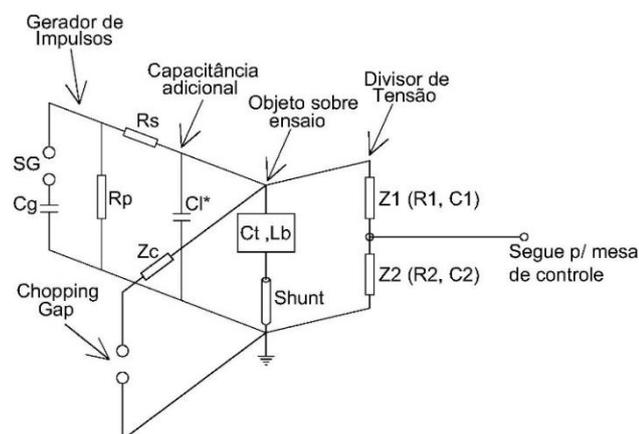
Os centelhadores de buchas precisam ser retirados ou o seu espaçamento deve ser aumentado para que estes não mascarem os resultados dos ensaios. Esta prevenção é necessária para que possíveis disrupções na bucha não sejam confundidas com disrupções na isolação interna ou externa.

Quando da existência de dispositivo de proteção contra sobretensões como para-raios colocados dentro ou fora do transformador, haverá uma diferença significativa na forma de onda de impulso aplicada. Isto acontece, pois, a norma NBR 5356-4 (2008) recomenda que antes da aplicação do impulso pleno especificado pelo NBI, sejam aplicados impulsos reduzidos com magnitude de 50% a 75% da tensão total, causando desta forma diferentes respostas do para-raios. Caso o objeto sob ensaio possua estes dispositivos e não haja forma de removê-los, deve-se aplicar dois ou mais impulsos reduzidos, com diferentes níveis de tensão, no intuito de confirmar que não há diferenças significativas oriundas da atuação do para-raios. Para mostrar o caráter reverso do efeito não linear do para-raios, os mesmos impulsos reduzidos devem ser aplicados após a aplicação da onda plena.

3.4.1 APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE ENSAIO

O circuito para ensaio de impulso atmosférico pleno e de onda cortada para transformadores pode ser dividido em 5 partes bem definidas, sendo elas: gerador de impulsos, objeto sob ensaio, circuito de medição de tensão (divisor de tensão), circuito de corte (*chopping gap*) e circuito para detecção de falhas, em geral *shunts* (derivadores) resistivos. A figura 21, adaptada da norma NBR 5356-4 (2008) apresenta um circuito típico para ensaio de impulsos em transformadores e a Figura 22 apresenta a adaptação do circuito Glaninger ao circuito de ensaio.

Figura 21 – Circuito típico de ensaio de impulso atmosférico em transformador



Fonte: Adaptada da norma NBR 5356-4 (2008, p. 3)

sendo:

C_g – Capacitância do gerador;

SG – Centelhador;

R_p – Resistência paralela ou Resistência de cauda;

R_s – Resistência série ou Resistência de frente;

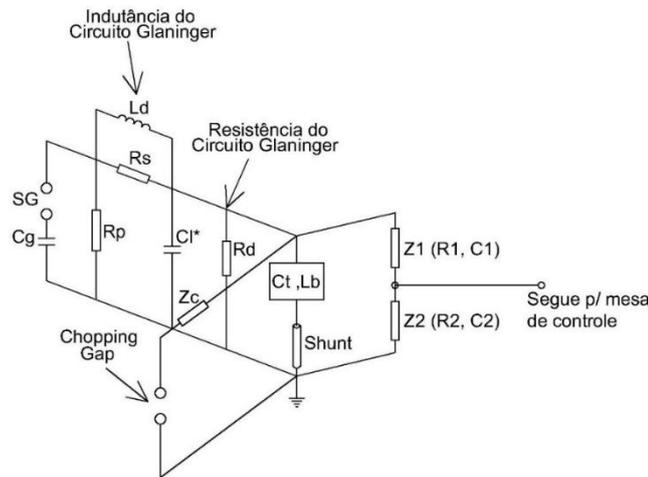
CI^* – Capacitância de carga adicional (Utilizada para aumentar a carga capacitiva);

C_t, L_b – Capacitância e indutância efetiva do objeto sob ensaio, respectivamente;

Z_1, Z_2 – Impedância do lado de alta e baixa do divisor de tensão, respectivamente;

Z_c – Impedância adicional do *chopping gap*.

Figura 22 – Circuito típico de ensaio de impulso atmosférico em transformador com circuito Glaninger



Fonte: Adaptada da norma NBR 5356-4 (2008, p. 3)

3.4.1.1 OBJETO SOB ENSAIO

O objeto sob ensaio é caracterizado por uma capacitância C_t inerente da isolação do transformador e uma indutância efetiva de ensaio L_b que dependerá da indutância de curto circuito dos enrolamentos do transformador conforme discutido no tópico 3.3.

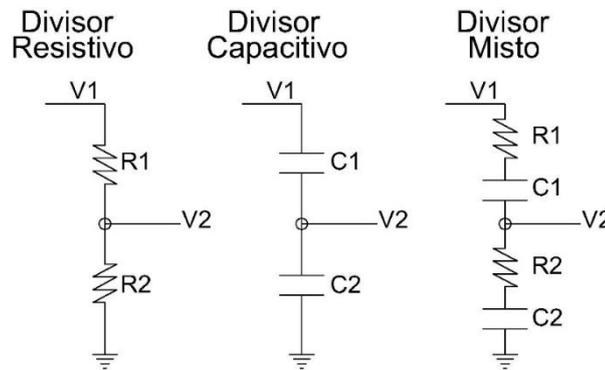
3.4.1.2 DIVISORES DE TENSÃO

A medição da tensão de ensaio se dá através dos divisores de tensão e deve satisfazer as prescrições da norma NBR IEC 60060-2 (2013). Um divisor de tensão é um equipamento destinado a fornecer apenas uma fração da tensão total de ensaio, sendo assim, possível de ser medida em equipamentos de baixa tensão como voltímetros e osciloscópios. A tensão total é aplicada aos terminais do divisor que normalmente é constituído de duas impedâncias em série. A primeira delas, o braço de alta tensão, representado por Z_1 na Figura 21, suporta a maior

parte da tensão de ensaio. No braço de baixa tensão, representado por Z_2 , a tensão é utilizada para medição.

Para que seja possível medir a tensão real que foi utilizada no ensaio, é necessário que os valores de Z_1 e Z_2 sejam conhecidos para que se calcule o fator de escala (FE) do divisor, fator este que será multiplicado pela tensão sobre a impedância Z_2 . O fator de escala é um parâmetro que depende da composição do divisor de tensão, sendo que, os mais utilizados em laboratórios de alta tensão são os divisores resistivos, capacitivos e mistos conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Divisores de tensão típicos para medição de impulsos



Fonte: Adaptada de (NAIDU e KAMARAJU, 2009, p. 188-194)

As relações (3.4), (3.5) e (3.6) a seguir apresentam os fatores de escala (FE) dos divisores de tensão resistivos, capacitivos e mistos, respectivamente.

$$FE = \frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad (3.4)$$

$$FE = \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1} + 1 \quad (3.5)$$

$$FE = \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1} + 1 ; \text{ com } R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (3.6)$$

3.4.1.3 CHOPPING GAP

O circuito *chopping gap* se faz necessário para realizar o corte da forma de onda aplicada ao equipamento, obtendo-se as formas de impulso de tensão cortado na cauda e impulso de tensão cortado na frente, conforme apresentado no capítulo 2. O circuito *chopping gap* consiste de um centelhador ou um conjunto de centelhadores conectados entre o terminal ensaiado do objeto sob ensaio e a terra, conforme mostrado na Figura 21. Essencialmente, ocorrerá o disparo do *chopping gap* em função da distância entre as esferas envolvidas no processo e das condições

atmosféricas existentes no local, visto que a rigidez dielétrica do ar é influenciada por estas condições conforme apresenta a norma NBR 5356-4 (2008).

Entretanto, poderá ser utilizado um centelhador com disparo controlado para permitir boa repetibilidade dos ensaios no intuito de avaliar as condições do equipamento após várias aplicações de impulsos cortados.

3.4.1.4 CIRCUITO PARA DETECÇÃO DE FALHAS

A detecção de falhas poderá ser realizada através da avaliação dos oscilogramas de tensão, oriundos da resposta do divisor de tensão, bem como dos oscilogramas de corrente, oriundos da resposta de corrente do *shunt* conectado aos enrolamentos dos transformadores de acordo com a Figura 21. Os registros que poderão ser obtidos para a detecção de falhas são os referentes a:

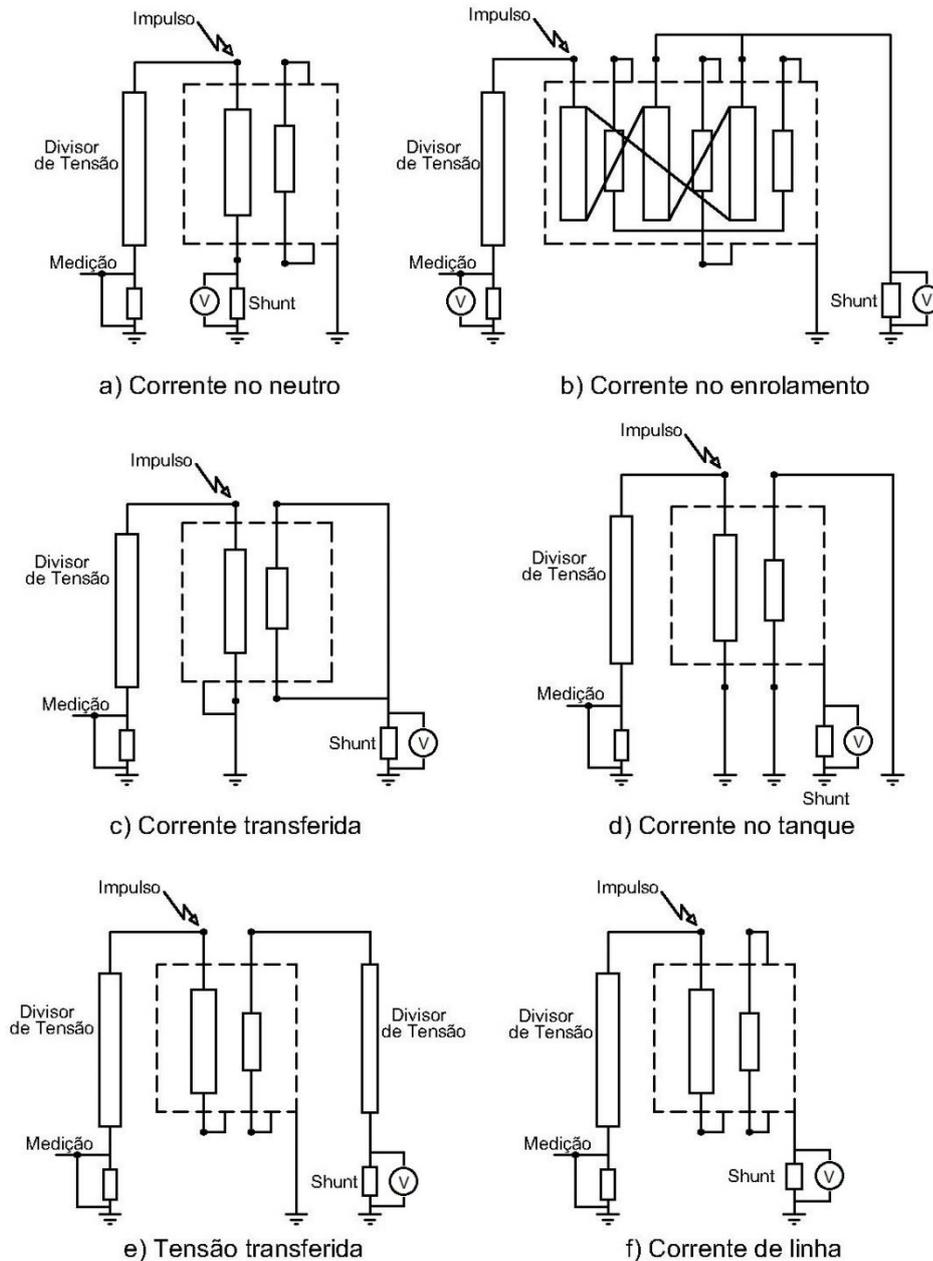
- Corrente no Neutro (para transformadores e reatores com neutro, para aterramento durante o ensaio);
- Corrente no enrolamento sob ensaio (para transformadores e reatores trifásicos com enrolamentos em triangulo e para transformadores ligados em estrela ou zigzague, cujo o neutro não pode ser aterrado durante o ensaio);
- Corrente transferida a um enrolamento adjacente;
- Corrente no tanque;
- Tensão transferida a um enrolamento não ensaiado;
- Corrente de linha.

A Figura 24 apresenta os diferentes tipos de conexões dos transformadores durante o ensaio, bem como, o posicionamento do divisor de tensão e *shunt* para possibilitar o registro dos oscilogramas de tensão e corrente mencionados anteriormente.

3.4.2 ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO (IA)

A montagem do circuito de ensaio deverá considerar as limitações físicas do laboratório de alta tensão, levando-se em consideração principalmente as proximidades com outras estruturas. Descargas disruptivas poderão ocorrer para paredes ou estruturas metálicas próximas ao circuito de ensaio, por isso o cuidado a ser tomado.

Figura 24 – Esquemas de ligação do transformador durante o ensaio



Fonte: NBR 5356-4 (2008, p. 6)

O gerador de impulsos produz elevadas taxas de variação de corrente que retornam ao gerador através dos elementos capacitivos envolvidos no ensaio. Estas correntes transitórias produzem diferenças de potencial entre vários pontos do lado terra do circuito, perturbando assim a medição, principalmente o registro de corrente realizado nos enrolamentos para detecção de falhas. Para minimizar este efeito, largas tiras metálicas são utilizadas como condutores de retorno de terra, pois assim, diminui-se a indutância do condutor minimizando os efeitos mencionados.

O procedimento para realização do ensaio de impulso atmosférico deve consistir primeiramente do ajuste da forma de onda para obtenção da forma padrão 1,2/50 μs com suas respectivas tolerâncias de acordo com a Figura 2, apresentada anteriormente. O ajuste da forma de onda nem sempre é uma tarefa fácil, visto que a capacitância do objeto sob ensaio é desconhecida. Além disto, a forma de onda padrão nem sempre poderá ser obtida pois o objeto sob ensaio pode apresentar uma alta capacitância ou uma baixa indutância, sendo necessário a utilização de um dos métodos mencionados no item 3.3. Caso os métodos não sejam efetivos, a norma permite que tolerâncias mais amplas sejam admitidas no que tange os parâmetros do impulso de tensão pleno.

Para obtenção do tempo de frente de $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$, pode ser necessário a utilização de um valor muito baixo de resistência série do gerador. Porém, este valor não pode ser tão baixo a ponto de criar altas oscilações na crista da tensão. Para obtenção do tempo de frente normalizado, pode ser necessário admitir oscilações na crista fora da tolerância aceitável pela norma NBR 5356-3 (2008) que fixa um valor de $\pm 5\%$, e esta deve ser limitada a no máximo $\pm 10\%$.

Com isso, o ajuste da forma de onda consta da aplicação de alguns impulsos de tensão reduzidos no sentido de identificar a forma de onda aplicada. Estes impulsos em geral possuem amplitude de 50% do valor de crista da tensão especificada para o objeto sob ensaio. A partir da análise do tempo de frente e cauda do primeiro impulso, é possível ter uma boa referência sobre quais as manipulações que devem ser realizadas nas resistências série e paralela do gerador para obtenção da forma de onda padrão 1,2/50 μs . Adicionalmente, deve-se utilizar os métodos mencionados anteriormente caso a obtenção da forma de onda padrão não seja obtida pela simples manipulação das resistências série e paralela do gerador. Após o ajuste da forma de onda, a seguinte sequência de impulsos deve ser aplicada:

- Aplicação de um impulso pleno com valor reduzido, entre 50% e 75% do especificado;
- Aplicação de três impulsos plenos com valor suportável nominal especificado de 100%;

Caso haja, durante o ensaio, atuação dos centelhadores das buchas, descargas externas ou falha no instrumento de medição de tensão ou corrente, esta aplicação é desconsiderada e uma nova deve ser realizada.

3.4.2.1 CIRCUITO DE ENSAIO EM TERMINAIS DE LINHA

A sequência de impulsos mencionada anteriormente deve ser aplicada a cada terminal de linha do transformador. Quando um transformador trifásico é ensaiado, a tensão impulsiva é aplicada em um enrolamento enquanto os outros são aterrados diretamente ou através de uma impedância de baixo valor. Caso o transformador possua um terminal de neutro, este deve ser aterrado diretamente ou por meio de uma impedância de baixo valor, sendo necessário a inserção de um *shunt* para medição da corrente neste terminal. Adicionalmente, o tanque do transformador é aterrado.

Desta forma, a ligação do objeto sob ensaio ao gerador de impulsos é realizada da seguinte forma: os terminais de baixa tensão não ensaiados são aterrados. Em seguida, conecta-se o gerador de impulsos a uma das fases do lado de alta tensão do transformador, por exemplo, o terminal H1. Após isto, aterra-se as fases restantes H2 e H3 e utiliza-se um *shunt* do tipo resistivo para registro do oscilograma de corrente para detecção de falhas.

Com o circuito montado, aplica-se a sequência de impulsos especificada e avalia-se os oscilogramas de corrente e tensão resultantes. A aplicação da sequência de impulsos deve ser repetida para os terminais H2 e H3 seguindo o mesmo procedimento abordado neste parágrafo.

O procedimento de montagem do ensaio abordado nesta seção é padrão para os ensaios de impulsos aplicados aos transformadores. Todavia, existem exceções que podem ser requeridas aos laboratórios de alta tensão conforme será visto nos itens 3.4.3.2 e 3.4.3.3.

3.4.2.2 ENSAIO NO TERMINAL DE NEUTRO

Um ensaio de tensão suportável a impulso atmosférico pode ser requerido para avaliar a suportabilidade do terminal de neutro de um enrolamento. Todavia, a suportabilidade deste terminal pode ser verificada de duas maneiras distintas.

A primeira delas é indiretamente, ou seja, é aplicado um impulso a qualquer terminal de linha ou aos três terminais de linha ligados juntos, com o terminal de neutro aterrado através de uma impedância. A tensão que é desenvolvida nesta impedância após a aplicação do impulso nos terminais de linha, é denominada como tensão suportável nominal para o terminal de neutro. O valor de crista do impulso que deve ser aplicado ao terminal de linha não é especificado nas normas, entretanto, é recomendado que o valor da tensão de ensaio não ultrapasse 75% do valor de crista nominal especificado para este terminal.

A segunda maneira é diretamente, ou seja, um impulso de tensão, correspondente a tensão suportável de impulso do neutro, é aplicado diretamente a este terminal, aterrando-se os demais terminais de linha. Em relação a forma de onda aplicada, a norma assume apenas que o tempo de frente do impulso pode admitir valores de até 13 μ s.

3.4.2.3 MÉTODO DO SURTO TRANSFERIDO PARA O ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO

O método do surto transferido é especificado quando os enrolamentos de baixa tensão do transformador não estão sujeitos a sobretensões atmosféricas provenientes do sistema de baixa tensão. Caso isso ocorra, um ensaio de impulso transferido, do enrolamento de alta tensão para o de baixa tensão, poderá ser solicitado.

Para a realização deste ensaio, os terminais do enrolamento de baixa tensão são aterrados por meio de resistores. O valor da resistência deverá ser tal que o valor da amplitude do impulso transferido entre o terminal de linha e terra seja tão elevado quanto possível, mas, inferior a tensão suportável nominal de impulso atmosférico especificada para este enrolamento.

3.4.2.4 OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E CORRENTE

O Registro do ensaio é realizado através dos oscilogramas de tensão e corrente proveniente da resposta do divisor de tensão e do *shunt*. Os equipamentos de medição responsáveis por traçar os oscilogramas são os osciloscópios digitais com no mínimo dois canais, para registro de tensão e corrente. Em geral, grandes fabricantes de equipamentos para ensaios em alta tensão comercializam osciloscópios digitais específicos para ensaios, com funções de cálculo automático de tempo de frente, cauda e pico de tensão.

Para a avaliação dos oscilogramas, escolhe-se o impulso atmosférico aplicado como avaliação da tensão de ensaio. Para a corrente, a detecção de falhas geralmente é realizada através da corrente que circula no neutro (do enrolamento sob ensaio para terra), porém, caso esta não possa ser usada, a corrente transferida para um enrolamento não ensaiado e curto circuitado é a que apresenta melhor sensibilidade para detecção.

Outras escolhas para detecção de falhas podem ser utilizadas como a corrente que circula do tanque para terra ou a tensão transferida para enrolamentos não ensaiados, entretanto, a sua utilização está condicionada a um acordo entre o comprador do transformador e o fornecedor.

O registro oscilográfico da corrente é o método mais sensível para a detecção de falhas, sendo este o principal método utilizado. Portanto, a corrente deve ser representada tão claramente possível com suas componentes de frequência mais elevadas, principalmente nas proximidades da frente de onda do impulso. Geralmente, as correntes no neutro e nos enrolamentos apresentam oscilações iniciais, e após isto, são determinadas essencialmente pela indutância do enrolamento e a capacitância do gerador de impulsos. O registro oscilográfico precisa ser feito pelo menos até a primeira crista indutiva para constatação de alguma modificação na indutância, que pode ser um indicativo de falha da isolação entre espira e espira. Além disto, o registro oscilográfico deve ser realizado por um período tal que capte a ocorrência de falhas tardias na isolação. O tempo para isto é da ordem de 500 μ s.

3.4.2.5 CRITÉRIO DE ENSAIO

O principal critério para a avaliação de falhas é a ausência de diferenças significativas entre os registros oscilográficos de corrente e tensão após a aplicação de impulsos com valor reduzido e impulsos com valor pleno. Qualquer discrepância significativa entre estes é um indicativo de falha da isolação. Além disto, sons anormais do equipamento durante o ensaio podem confirmar as diferenças avaliadas nos oscilogramas.

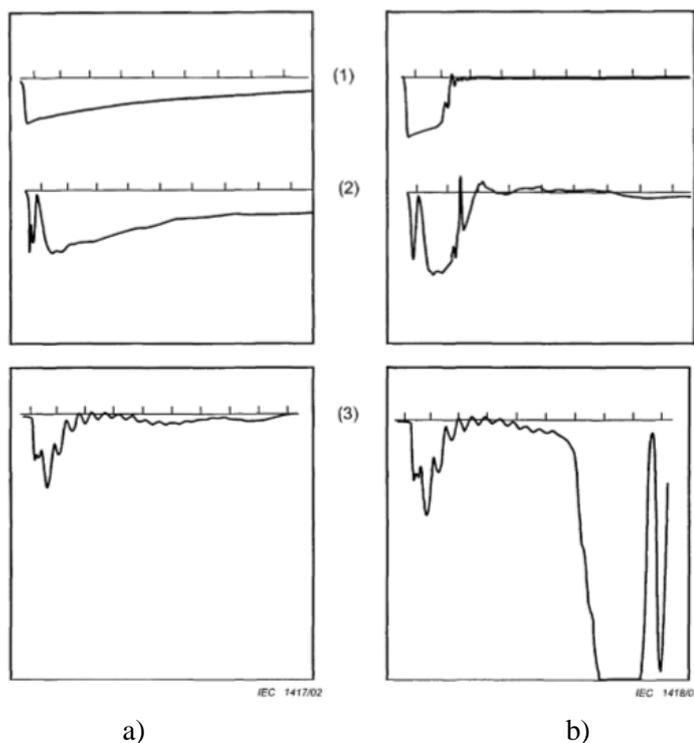
Nota-se que a avaliação destes resultados é puramente empírica e requer uma avaliação apurada para evitar falsos diagnósticos. Existe a possibilidade de diferenças significativas nas formas de onda com impulso reduzido e pleno representarem falhas não danosas. Estas falhas podem ser confirmadas e explicadas por um novo ensaio. Como exemplo deste tipo de situação, podem ocorrer: atuação de para-raios, saturação do núcleo e influências externas no circuito de ensaio como a proximidade de estruturas metálicas.

As oscilações de corrente são as mais sensíveis as oscilações que não representam falhas da isolação. Para não haver erros de diagnósticos, uma boa avaliação das discrepâncias que podem ser originadas do circuito de ensaio, de medição ou do aterramento se fazem necessárias.

A Figura 25 apresenta um exemplo de falha do tipo fase para terra através do enrolamento de alta tensão ensaiado. Este exemplo apresenta um colapso de tensão repentino provocado por falha da isolação interna do transformador, na isolação do terminal ensaiado ou próximo a ele. Foram utilizados 3 canais do osciloscópio, com o primeiro recebendo a informação da tensão impulsiva aplicada ao enrolamento; o segundo, a tensão induzida ao enrolamento de baixa tensão e o terceiro, a corrente no neutro. Diferenças significativas das tensões e correntes obtidas, após a aplicação de impulsos de tensão reduzidos (75%) e nominais

(100%), são observadas nos três oscilogramas simultaneamente, caracterizando um indicativo de falha.

Figura 25 – Exemplo de falha do tipo fase para terra através do enrolamento de alta tensão ensaiado: a) Impulso pleno com valor reduzido (75%) caracterizando não falha; b) Impulso pleno com valor nominal (100%) caracterizando falha



Fonte: NBR 5356-4 (2008, p. 26)

3.4.3 ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO COM ONDA CORTADA.

Este ensaio é especificado nas normas apenas para os terminais de linha do transformador. O ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico com onda cortada constitui um dos principais ensaios realizados em laboratórios de alta tensão. Este, combina a aplicação de impulsos de tensão plenos e cortados no intuito de levar a isolação do transformador a uma condição extrema. O impulso cortado especificado deve possuir forma e parâmetros conforme mostrado na Figura 3, na qual o tempo de corte deve estar entre 2 e 5 μs . Além disto, o valor de tensão de polaridade oposta (*undershoot*) do impulso cortado não deve ser superior a 30% do valor da amplitude da tensão aplicada. A sequência de aplicação de impulsos é descrita a seguir:

- Aplicação de um impulso pleno com valor reduzido, entre 50% e 75% do especificado;

- Aplicação de um impulso pleno com valor suportável nominal especificado de 100%;
- Aplicação de um ou mais impulsos cortados com valor reduzido;
- Aplicação de dois impulsos cortados com valor com valor especificado de 110%;
- Aplicação de dois impulsos plenos com valor suportável nominal especificado de 100%;

3.4.3.1 CRITÉRIO DE ENSAIO E OSCILOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO

Considerando que os tempos de corte do impulso com valor reduzido e com valor de 110% sejam os mesmos, a detecção de defeitos se dá a partir da avaliação das oscilações de corrente e tensão após o corte, semelhante ao caso para impulso pleno. Com isso, todas as outras formas de avaliação já mencionadas devem ser aplicadas.

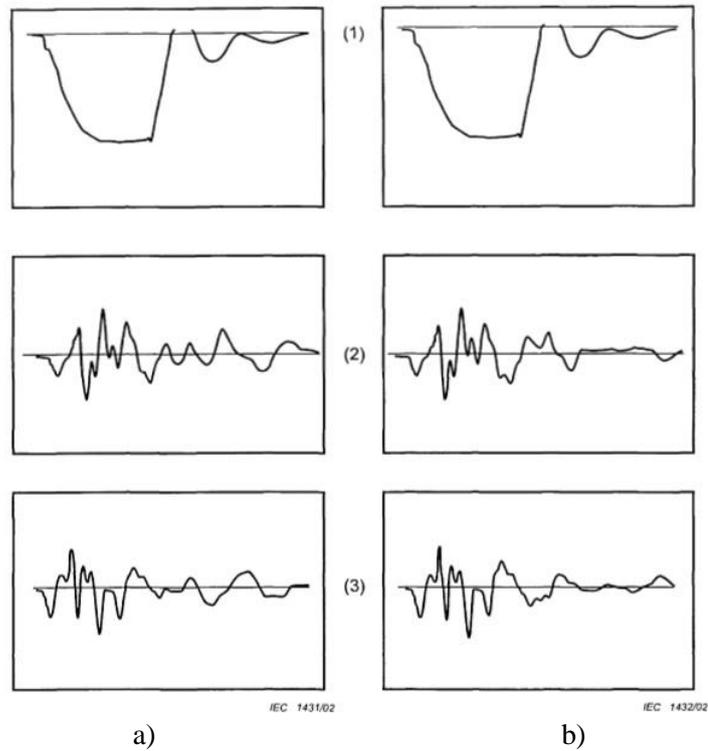
A Figura 26 apresenta um exemplo de falha entre espiras no enrolamento de alta tensão ensaiado. Foram utilizados 3 canais do osciloscópio, com o primeiro recebendo a informação do impulso de tensão cortado aplicado ao enrolamento; o segundo, a corrente transferida ao enrolamento adjacente curto circuitado e o terceiro, a corrente no neutro. Nota-se que esta falha ocorre após o corte do impulso, sendo observadas diferenças significativas apenas nos oscilogramas de corrente (2) e (3), caracterizando uma falha.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo em questão faz uma abordagem a respeito das peculiaridades de ensaios de impulso atmosférico em transformadores. Deve-se notar que o transformador apresenta enrolamentos, logo, possui indutâncias que serão inseridas ao circuito de ensaio de impulso. Caso a indutância dos enrolamentos do transformador possua valor extremamente baixo, poderá ser difícil a obtenção de uma forma de onda normalizada 1,2/50 μ s, principalmente tratando-se do seu tempo de cauda. Desta forma, um circuito adicional denominado Glaninger é um excelente acessório encontrado em sistemas geradores de impulsos, capaz de reverter este problema.

Além do exposto anteriormente, este capítulo apresenta as metodologias padrões de ensaios de tensão suportável de impulsos atmosféricos em transformadores de potência, utilizando-se como referência as orientações das normas NBR 5356-3 (2008) e NBR 5356-4 (2008).

Figura 26 – Exemplo de falha entre espiras no enrolamento de alta tensão ensaiado: a) Impulso cortado com valor reduzido (60%) caracterizando não falha; b) Impulso cortado com valor nominal (100%) caracterizando falha



Fonte: NBR 5356-4 (2008, p. 30)

4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO GERADOR DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DO LABORATÓRIO DE EXTRA ALTA TENSÃO DA UFPA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Laboratório de Extra Alta Tensão da UFPA é um importante centro de ensino, pesquisa, extensão e prestação de serviços para o atendimento da Região Norte e de todo o Brasil. Localizado no Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá, na UFPA. Em fase final de implantação, a sua infraestrutura é dotada principalmente de três equipamentos para ensaios em alta tensão, sendo estes: Gerador de impulsos de Tensão com energia total de 540 kJ capaz de gerar até 3600 kV de impulso de tensão com forma 1,2/50 μ s; Gerador de impulsos de corrente 120 kJ/ 1200kV capaz de gerar impulsos de corrente atmosféricos de até 20 kA com forma 8/20 μ s e Fonte Série Ressonante capaz de gerar até 800 kV de tensão a frequência industrial 60 Hz suprimindo um máximo de 10A de corrente.

O presente capítulo tem por finalidade apresentar todos os equipamentos que compõem o sistema gerador de impulsos atmosféricos do LEAT, destacando as suas características e potencialidades para ensaios em equipamentos elétricos, principalmente no que tange aos ensaios em transformadores. Os outros equipamentos de ensaio citados anteriormente, não fazem parte do escopo deste trabalho e não serão discutidos neste capítulo, entretanto, apresentam importância significativa para o laboratório.

O sistema gerador de impulso de tensão do LEAT é composto por um gerador de impulsos de 18 estágios, retificador, divisores de tensão, *shunts* coaxiais, Múltiplo *Chopping Gap* e Circuito Glaninger, sendo estes apresentados no decorrer deste capítulo.

4.2 GERADOR DE IMPULSOS DE TENSÃO TIPO SGV 18 ESTÁGIOS

O gerador de impulsos tipo SGV é um equipamento construído por 18 estágios montados sobre uma estrutura composta principalmente por 3 colunas isoladas. Para a montagem de cada estágio, dois capacitores são conectados em série e são dispostos de maneira triangular, semelhante a um “V”. Os centelhadores são internos e dispostos em uma câmara de ar isolada. Os resistores série e paralelo são totalmente manipuláveis e são mantidos por suporte entre os centelhadores e os capacitores. Os resistores de carregamento são colocados contíguos à câmara em que se encontram os centelhadores e são acoplados por suportes aparafusáveis. Os resistores de potencial são dispostos entre os capacitores de carga. Além disto, o gerador possui ainda

uma escada e plataformas a cada 3 estágios, facilitando as alterações que venham a ser feitas no circuito de ensaio (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010). O gerador de impulsos SGV do LEAT com seus 18 estágios e parâmetros nominais de 3600kV e 540kJ de energia é mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Sistema Gerador de impulsos de Tensão 18 estágios, 3600kV, 540 kJ do LEAT



Fonte: Do autor

Nota-se, pela Figura 27, que o gerador de impulsos é um equipamento robusto e com dimensões consideráveis, com altura de aproximadamente 15 metros. Entretanto, ainda é considerado de dimensões compactas visto que é capaz de gerar até 3,6 MV de onda impulsiva. A seguir, serão apresentados todos os acessórios que compõe o gerador de impulsos

4.2.1 CAPACITORES DO GERADOR

Os capacitores do gerador de impulsos são compostos por um tanque hermético feito em chapa de aço, soldado e coberto por uma camada de epóxi na cor azul. A sua parte ativa é

formada por elementos planos, impregnados por óleo de rícino, conectados em série e paralelo (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010). A Figura 28 apresenta os capacitores mencionados.

Figura 28 – Capacitores do gerador de impulsos



Fonte: Do autor

O gerador em questão apresenta 36 capacitores de carga com características nominais de $3 \mu\text{F}$ e 100 kV . Cada estágio do gerador possui dois destes capacitores conectados em série, totalizando $1,5 \mu\text{F}$ e 200 kV por estágio. Para grandes geradores de impulsos, como o do LEAT, é necessário a utilização de dois capacitores por estágios devido a limitada tensão nominal encontrada em capacitores, por isso a utilização de dois de 100 kV para a obtenção de 200 kV por estágio (HAUSCHILD e LEMKE, 2014). Por apresentar 18 estágios, este gerador é capaz de aplicar, se conectado em série, até 3600 kV de tensão impulsiva, com uma capacitância equivalente de $83,3 \text{ nF}$.

4.2.2 RESISTORES DE FRENTE E CAUDA

Os resistores de frente e cauda do gerador de impulsos do LEAT são peças que possuem um formato chato cobertas por resina em epóxi de colorações diversas. Estes resistores são projetados para possuírem indutância extremamente baixa, no intuito de minimizar oscilações não desejadas na forma de onda do impulso aplicado. Os resistores possuem conectores de

encaixe especiais, facilitando a manipulação destes para alterações no circuito de ensaio. Os resistores em questão são mostrados na Figura 29.

Figura 29 – Resistores de Frente e Cauda do Gerador de Impulsos do LEAT



Fonte: Do autor

Ao todo, o gerador de impulsos do LEAT apresenta o quantitativo de resistores série e paralelo mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantitativo de resistores série e paralelo do Gerador de impulsos do LEAT

Descrição	Cor	Valor	Quantidade
Resistor paralelo	Marrom Claro	92 Ω	36
Resistor Série	Marrom escuro	11 Ω	18
Resistor Série	Azul	17 Ω	18

Fonte: Do autor

4.2.3 RESISTORES DE CARREGAMENTO

Todos os estágios do gerador de impulsos são carregados em paralelo através de um valor de tensão C.C. predefinido do retificador. Para o carregamento destes bancos de capacitores, resistores de valor ôhmico elevado, denominados resistores de carga, são utilizados no intuito de limitar a corrente C.C. de carregamento. Ao todo, o gerador de impulsos possui 17 destes resistores, com valor nominal igual a 30k Ω . Os resistores de carregamento do gerador de impulsos do LEAT são mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Resistores de carregamento do Gerador de Impulsos do LEAT



Foto: Do autor

4.2.4 RESISTORES DE POTENCIAL

Os resistores de potencial possuem valor ôhmico igual a $940\text{ k}\Omega$ e são utilizados no intuito de equalizar os potenciais de carregamento dos capacitores de 100 kV que compõe os estágios do gerador de impulsos. Sua utilização é necessária para manter a mesma tensão de carregamento entre os dois capacitores, por isto, a necessidade de sua utilização em geradores de impulsos que utilizam mais de um capacitor por estágio. Os resistores de potencial do gerador de impulsos do LEAT são mostrados na Figura 31.

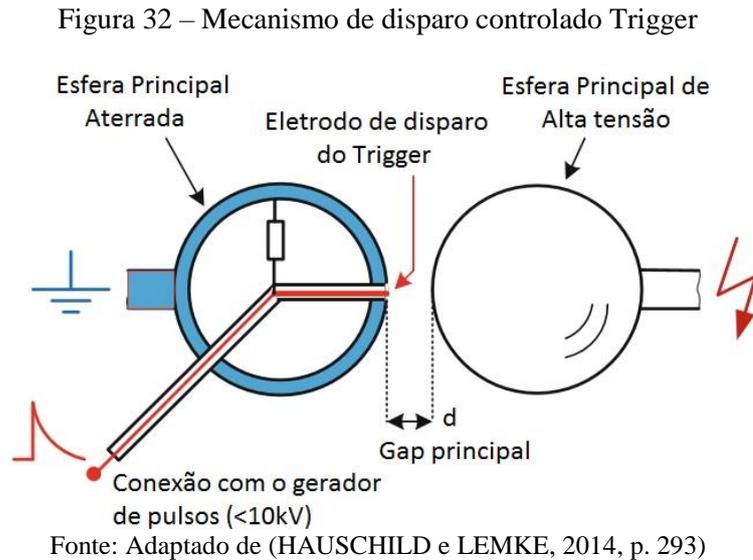
Figura 31 – Resistores de potencial do Gerador de Impulsos do LEAT



Fonte: Do autor

4.2.5 CENTELHADORES E MECANISMO DE DISPARO

Os centelhadores do gerador de impulsos do LEAT estão dispostos em uma câmara cilíndrica isolada, de maneira vertical. Os centelhadores que compõe o primeiro estágio são dotados de um sistema denominado *Trigger*, necessário para realizar o disparo do gerador de impulsos. A Figura 32 apresenta o mecanismo de disparo controlado *Trigger*.



O disparo do gerador de impulsos ocorre de baixo para cima e é iniciado com a disrupção dielétrica que ocorre entre os primeiros centelhadores, com o surto de tensão sendo transferido para os demais estágios. Para controlar este disparo, um eletrodo é inserido no interior da primeira esfera, aterrada, e é conectado a um gerador de pulsos de tensão. A distância “d” do *gap* principal deverá ser escolhida de acordo com a tensão de carregamento do gerador de impulsos. Esta distância deverá ser um pouco superior a distância crítica para a qual ocorrerá naturalmente uma disrupção entre as esferas.

Com o gerador de impulsos carregado e pronto para disparar, um pulso de tensão de aproximadamente 12 kV (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010) é gerado pelo dispositivo trigger e é aplicado na extremidade do eletrodo que se encontra dentro da primeira esfera. Este pulso, inicia a disrupção forçada do primeiro estágio do gerador, sendo que, as sobretensões geradas por esta disrupção são transmitidas para as próximas esferas, ocorrendo o disparo do restante dos estágios do gerador de maneira simultânea.

Todavia, o *Trigger* possui uma faixa de operação para a qual funciona de maneira eficaz (CAGIDO, 2014). A faixa de operação (FO) é definida de acordo com a equação (4.1), a seguir.

$$FO = \frac{(U_{max} - U_{min})}{U_{max}} \times 100\% \quad (4.1)$$

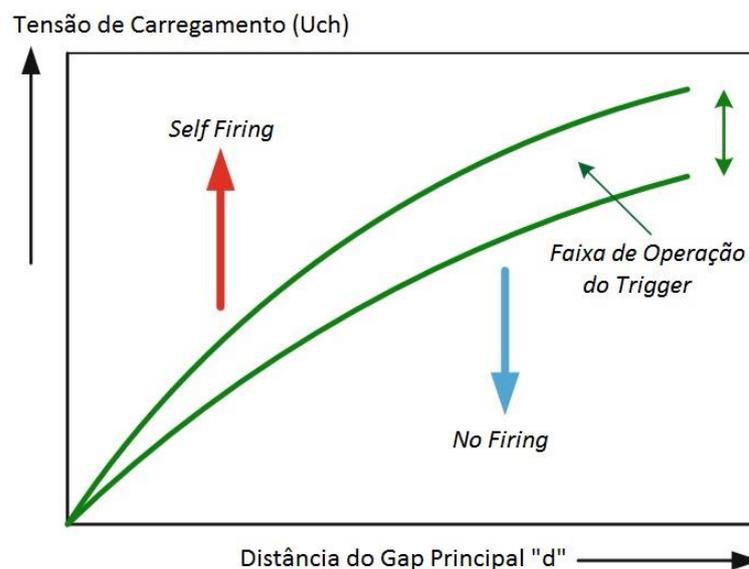
sendo,

U_{max} = Tensão máxima C.C. que o gap suporta, para uma determinada distância específica. Portanto, acima desta tensão ocorre o disparo não controlado dos centelhadores denominado *Self Firing*;

U_{min} = Tensão mínima C.C. para a qual o dispositivo *Trigger* atua na interrupção dos centelhadores do gerador, para uma determinada distância específica. Portanto, abaixo desta tensão, não ocorre o disparo dos centelhadores, mesmo com a ajuda do *Trigger*. Esta condição é denominada *No Firing*.

O gráfico da Figura 33 exemplifica a faixa de operação do *Trigger* e as condições de disparo *Self Firing* e *No Firing*. Quanto maior a faixa de operação do *Trigger*, maior será a sua eficiência nos disparos do gerador de impulsos.

Figura 33 – Faixa de operação do *Trigger*



Fonte: Adaptado de (HAUSCHILD e LEMKE, 2014, p. 293)

Para detecção das condições *Self Firing* e *No Firing*, o gerador de impulsos possui um divisor de tensão capacitivo conectado em seu primeiro estágio. Através das informações deste divisor, o equipamento de aquisição de dados recebe a informação e apresenta a mensagem “*Self Firing*” ou “*No Firing*” para o operador.

A Figura 34 apresenta o sistema *Trigger* utilizado no Múltiplo *chopping gap* do LEAT, que é semelhante ao do gerador de impulsos.

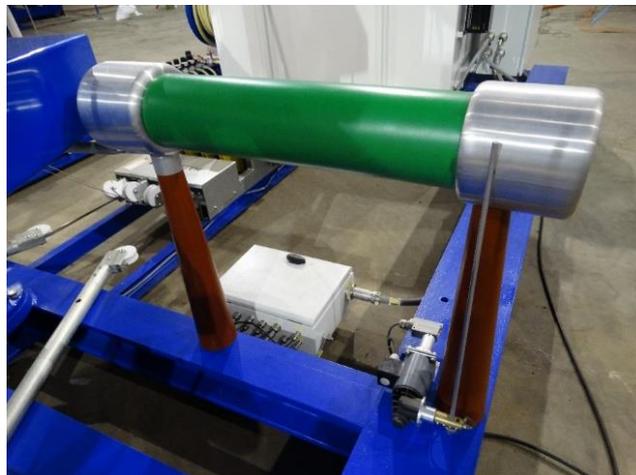
Figura 34 – Sistema Trigger utilizado no Múltiplo *chopping gap*

Fonte: Do autor

4.2.6 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O gerador de impulsos tipo SGV possui três sistemas para aterramento. O primeiro é um sistema de fitas metálicas automatizadas, controladas por um motor. Este sistema garante o aterramento de todos os seus estágios, atestando que nenhum capacitor esteja carregado após o término dos ensaios, evitando assim que acidentes com pessoas no laboratório venham a acontecer. Os outros dois sistemas são resistores de aterramento acoplados por uma chave, sendo um de 5,45 k Ω e outro de 13 k Ω . A primeira chave de aterramento é acoplada na entrada C.C. de alimentação do gerador, proveniente do retificador. A segunda chave de aterramento é acoplada entre o resistor de potencial e os dois capacitores em série que compõe um estágio, garantindo o aterramento eficiente dos componentes possivelmente carregados. As Figuras 35, 36 e 37 mostram os sistemas mencionados.

Figura 35 – Chave de aterramento 1



Fonte: Do autor

Figura 36 – Chave de aterramento 2



Fonte: Do autor

Figura 37 – Sistema de aterramento automatizado por fitas



Fonte: Do autor

4.2.7 ELETRODO TOROIDAL

Em geral, os geradores de impulsos necessitam de apenas um eletrodo circular metálico, em forma de chapa em sua parte superior (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010). Entretanto, o gerador de impulsos do LEAT, por possuir maiores dimensões e capacidade de gerar altas tensões impulsivas, possui um eletrodo de topo do tipo toroidal conforme é mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Eletrodo Toroidal na parte superior do gerador de impulsos



Fonte: Do autor

O uso deste eletrodo é necessário pois, na parte superior do gerador de impulsos, ocorrem pré-descargas mesmo antes da aplicação do impulso sobre o item ensaiado. Este fenômeno pode ser notado como pequenos pulsos sobrepostos à forma de onda de impulso de tensão obtida. Portanto, o uso do eletrodo toroidal na parte superior do gerador de impulsos aumenta a tensão inicial de pré-descarga, principalmente para impulsos de manobra de altas magnitudes (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010).

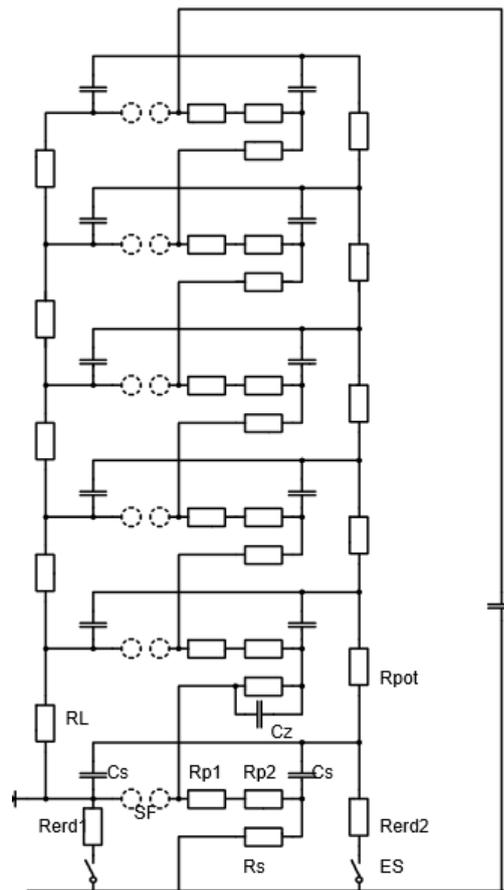
4.2.8 MODOS DE OPERAÇÃO DO GERADOR DE IMPULSOS

Ensaio de impulsos atmosféricos são especificados para diferentes equipamentos que compõe os sistemas de potência. Todavia, cada equipamento testado apresenta uma característica diferente em relação a sua capacitância e, no caso de transformadores e reatores, na sua indutância efetiva de ensaio. Na maioria dos casos, estes valores são desconhecidos, fazendo-se necessário que o operador adapte o gerador de impulsos para cada situação.

Para facilitar a obtenção da forma de onda padrão de impulsos $1,2/50 \mu\text{s}$ para cada objeto testado, o gerador de impulsos do LEAT apresenta 2 modos de operação. Estes modos tornam o gerador de impulsos versátil, de modo que a sua capacitância pode ser alterada para atendimento de diferentes tipos de ensaios.

O primeiro modo de operação é denominado Configuração Série. O esquema de ligação deste modo é apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Esquema de ligação do Gerador de impulsos na configuração série



Fonte: (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010, p. 21)

no qual,

Cs – Capacitores do gerador;

Rs – Resistores série;

Rp1 / Rp2 – Resistores paralelos;

RL – Resistores de carga;

Rpot – Resistores de potencial;

Rerd1/Rerd2 – Resistores de aterramento;

ES – Chaves de aterramento;

SF – Centelhadores;

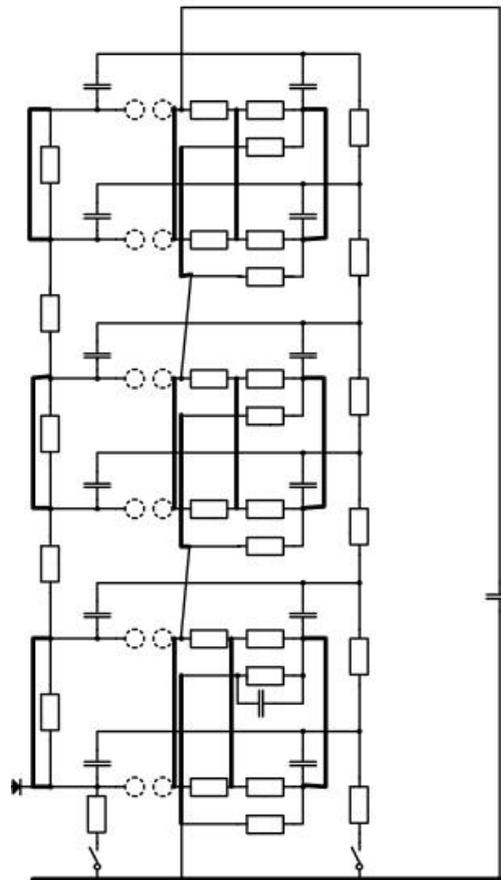
Cz – Capacitância do trigger.

A Figura 39 exemplifica um gerador de impulsos de 6 estágios na configuração série. A configuração série do gerador recebe este nome pois, na ocorrência do disparo, todos os estágios

são ligados em série através da disrupção dos centelhadores, elevando a tensão de saída do gerador a um valor proporcional a tensão de carregamento e ao número de estágios utilizados. Esta configuração oferece a maior tensão possível de saída, entretanto, a menor capacitância do gerador. Desta forma, o gerador deste exemplo recebe a nomenclatura 6s1p, implicando que o mesmo possui 6 estágios em série e 1 em paralelo. O gerador de impulsos do LEAT apresenta em sua configuração série a codificação 18s1p.

O segundo modo de operação é chamado de Configuração Série-Paralelo. O esquema de ligação deste modo é apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Esquema de ligação do Gerador de impulsos na configuração série-paralela



Fonte: (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010, p. 23)

Este modo de operação é utilizado para aumentar a capacitância do gerador de impulsos, entretanto, limita sua tensão máxima de saída. Através da observação da Figura 40, nota-se que dois estágios são agrupados em paralelo, então, 3 grupos destes são conectados em série, recebendo a codificação 3s2p. A simples manipulação destes estágios eleva a capacitância do gerador de impulsos de maneira significativa. A equação (4.2) apresenta uma formulação simples para obtenção da capacitância do gerador em função do seu modo de operação.

$$C_{total} = \frac{p \times C_{estágio}}{s} \quad (4.2)$$

sendo,

C_{total} = Capacitância total do gerador de impulsos;

$C_{estágio}$ = Capacitância por estágio do gerador;

p = Número de estágios conectados em paralelo;

s = Número de estágios conectados em série.

4.3 RETIFICADOR

O retificador é um equipamento vital para o gerador de impulsos, sendo utilizado para converter tensão alternada em tensão contínua para carregamento de seus capacitores. O retificador utilizado no gerador de impulsos do LEAT é de meia onda e é capaz de carregá-lo com uma tensão de até 200 kV, suprimindo uma corrente de até 200 mA (RICKMANN e WOLF, 1998). A Figura 41 apresenta o retificador mencionado anteriormente.

Figura 41 – Retificador



Fonte: Do autor

4.4 DIVISORES DE TENSÃO

O divisor de tensão é o equipamento utilizado em laboratório para medição de altas tensões. O LEAT possui dois divisores do tipo misto, sendo um para medições de tensões impulsivas de até 1200 kV e o outro para medições de até 2400 kV. Ambos os divisores mencionados são mostrados nas Figura 42 e 43.

Os braços de alta tensão são constituídos de uma ou mais unidades conectadas em série através de flanges adaptadas. Cada unidade mencionada, consiste de várias capacitâncias C_{11} empilhadas e impregnadas a óleo nas quais, vários resistores R_{11} série são inseridos. Todos

estes elementos são colocados no interior de um cilindro, hermeticamente selado por flanges, preenchido por óleo isolante do tipo “*Shell Diala D*” (GAMLIN e RASTELLO, 2004).

Figura 42 – Divisor de tensão para impulsos de até 1200 kV



Fonte: Do autor

Figura 43 – Divisor de tensão para impulsos de até 2400 kV



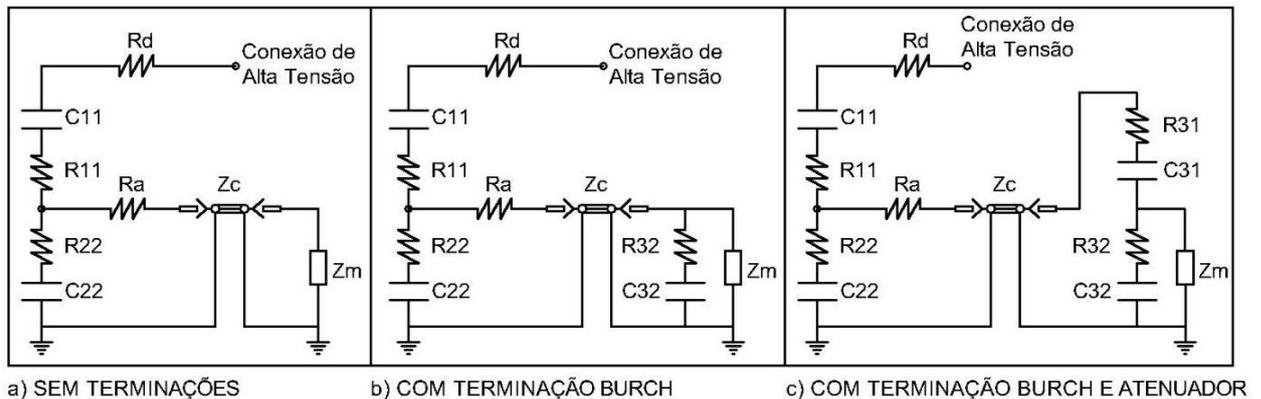
Fonte: Do autor

Os braços de baixa tensão são constituídos de capacitâncias C22 e resistências R22, conectadas em série e adaptadas para apresentar o melhor desempenho para medição.

Vale ressaltar que cabos de medição com comprimento acima de 70 metros possuem capacitância significativa, apresentando a mesma ordem de grandeza da capacitância $C22$ do braço de baixa tensão. Para compensar este efeito, um acessório denominado “*Burch*”, composto de um resistor $R32$ e um capacitor $C32$, precisa ser inserido próximo ao sistema de medição. Além deste, um outro acessório denominado Atenuador poderá ser utilizado a fim de evitar distúrbios oriundos de medições com baixa relação de tensão. Sua função é reduzir o valor da tensão de medição de aproximadamente 1,5 kV para em média 100 V (GAMLIN e RASTELLO, 2004).

A Figura 44 apresenta os circuitos equivalentes do divisor de tensão com a utilização dos acessórios terminais, descritos previamente.

Figura 44 – Circuitos equivalentes do divisor de tensão e suas devidas terminações



Fonte: Adaptada de (GAMLIN e RASTELLO, 2004, p. 18)

sendo,

- $C11$ – Capacitância total do braço de alta tensão;
- $R11$ – Resistência série total do braço de alta tensão;
- Rd – Resistor de amortecimento externo;
- $C22$ – Capacitância total do braço de baixa tensão;
- $R22$ – Resistência série total do braço de baixa tensão;
- Ra – Resistor terminal externo para casamento de impedância do cabo de medição;
- Zc – Impedância do cabo de medição ($Rc + Cc$);
- Zm – Impedância de entrada do sistema de medição;
- $R31/C31$ – Resistências e capacitâncias do Atenuador;
- $R32/C32$ – Resistências e capacitâncias do sistema *Burch*.

De acordo com GAMLIN e RASTELLO (2004), os fatores de escala podem ser obtidos a partir das equações (4.3), (4.4) e (4.5), as quais estabelecem:

$$a) \text{ Divisor sem terminações: } FE = \frac{C11+Cc+C22}{C11} \quad (4.3)$$

$$\text{b) Com terminação } Burch: FE = \frac{C_{11}+C_c+C_{22}+C_{32}}{C_{11}} \frac{C_{11}+C_c+C_{22}}{C_{11}} \quad (4.4)$$

$$\text{c) Com } Burch \text{ e Atenuador: } FE = \frac{C_{11}+C_c+C_{22}+\left(\frac{C_{31} \times C_{32}}{C_{31}+C_{32}}\right)}{C_{11}} \times \frac{C_{31}+C_{32}}{C_{31}} \quad (4.5)$$

Os valores nominais de capacitância para o cálculo do fator de escala dos divisores de tensão do LEAT são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros nominais dos divisores de Tensão do LEAT

	C11	C22	Cc
Divisor 1200 kV	665 pF	479,69 nF	3,35 nF
Divisor 2400 kV	350 pF	613 nF	3,35 nF

Fonte: Adaptada de (GAMLIN e RASTELLO, 2004, p. 18)

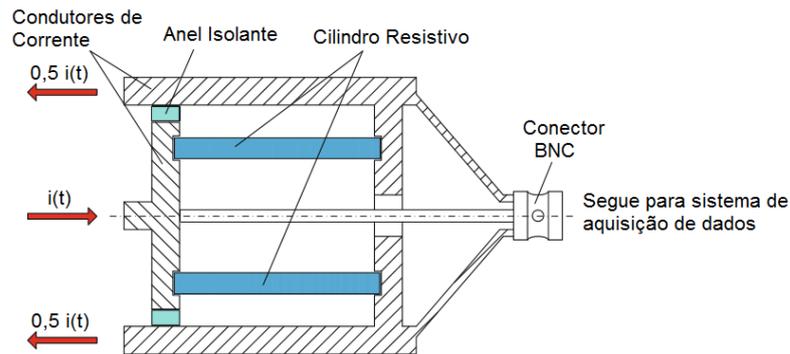
4.5 SHUNTS COAXIAIS

Shunts nada mais são do que resistores de valores baixíssimos utilizados para medição de correntes em equipamentos tais como: para-raios e enrolamentos de transformadores em laboratórios de alta tensão. Todavia, os *shunts* utilizados no LEAT são do tipo coaxiais, apresentando como vantagem um valor mínimo ou praticamente nulo de indutância.

Devido à alta frequência dos sinais medidos e por apresentarem uma baixa resistência, os *shunts* apresentariam uma impedância que seria governada essencialmente por sua indutância, por mínima que fosse. Para eliminar este efeito, um *shunt* coaxial é projeto de modo a conduzir a corrente em dois sentidos. Portanto, a corrente entra por sua parte mais interna, passa por um resistor em formato de cilindro e retorna por sua parte mais externa. Este encaminhamento gera um *loop* indutivo que cancela os fluxos magnéticos gerados pela passagem da corrente nos dois sentidos, mantendo a indutância mínima (HAUSCHILD e LEMKE, 2014). O esquema de um *shunt* coaxial é mostrado na Figura 45.

Com isso, através da medição da queda de tensão nesta resistência de valor ôhmico conhecido, é possível definir a corrente que o atravessa, possibilitando assim medições de corrente em laboratórios de alta tensão. O LEAT apresenta *shunts* coaxiais com valores diversos, variando de 0,47 Ω à 1 Ω . A Figura 46 apresenta os equipamentos em questão.

Figura 45 – Esquemático de um shunt do tipo coaxial



Fonte: Adaptada de (HAUSCHILD e LEMKE, 2014, p. 359)

Figura 46 – Shunts diversos do LEAT



Fonte: Do autor

4.6 MÚLTIPLO CHOPPING GAP

O múltiplo *chopping gap* do LEAT é de múltiplos estágios. Cada estágio é composto de duas colunas, sendo a primeira utilizada para suporte de dois centelhadores de 200 milímetros e a segunda para comportar uma capacitância amortecida por resistência, necessária para controlar a distribuição de tensão em todos os seus estágios durante o disparo. O centelhador inferior de cada estágio é montado em uma estrutura fixa entre o capacitor e a estrutura de suporte, enquanto que os centelhadores superiores são montadas numa estrutura móvel, utilizada para ajustar a distância do *gap* entre os centelhadores (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2004). Os centelhadores mais inferiores dos 3 primeiros estágios do múltiplo *chopping gap* estão equipados com um eletrodo ativado por um sistema *Trigger*, semelhante ao mostrado no item 4.2.5. Para os estágios superiores, as sobretensões naturais são suficientes para garantir um disparo rápido e homogêneo. Desta forma, o sistema *Trigger* do *chopping gap* é ativado em um tempo retardado em relação ao início do impulso de tensão, de modo a garantir que a forma

de onda sofra um corte entre 2 e 5 μs conforme a norma NBR IEC 60060-1 (2008). A Figura 47 apresenta o múltiplo *Chopping Gap* do LEAT.

Figura 47 – Múltiplo *Chopping Gap* do LEAT



Fonte: Do autor

4.7 CIRCUITO GLANINGER

O circuito Glaninger do LEAT apresenta uma estrutura metálica para suporte de suas indutâncias e resistências, de maneira a facilitar sua adaptação ao circuito do gerador de impulsos. O esquemático de montagem do circuito Glaninger do LEAT é mostrado na Figura 48, sendo destacados os seus componentes.

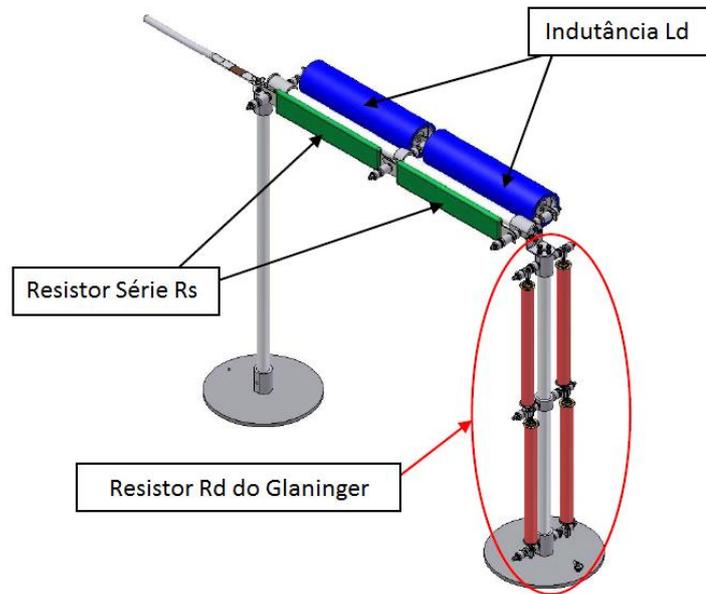
Este circuito é composto de 2 indutores de 0,2 mH cada, e alguns resistores de valores diversos, conforme apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantitativo de indutores e resistores do circuito Glaninger do LEAT

Descrição	Cor	Valor	Quantidade
Indutor	Azul	0,2 mH	2
Resistor	Vinho	50 Ω	2
Resistor	Amarelo	200 Ω	2
Resistor	Preto	400 Ω	2

Fonte: Do autor

Figura 48 – Esquemático de montagem do Circuito Glaninger



Fonte: Adaptada de (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 39)

A Figura 49 apresenta os elementos mencionados na Tabela 5 anterior.

Figura 49 – Elementos do circuito Glaninger do LEAT montados em pedestal próprio



Fonte: Do autor

4.8 SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

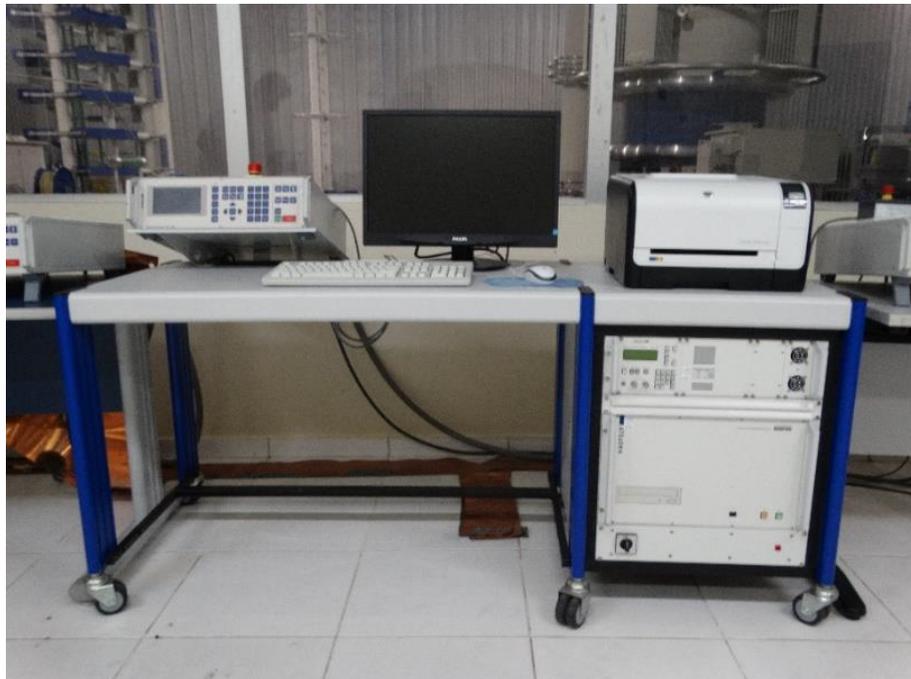
Devido ao alto nível de tensão utilizado em laboratório, todos os mecanismos de acionamento, controle, carregamento de capacitores e aterramento do gerador de impulsos são automatizados. Para gerenciar todo este processo, o gerador possui uma mesa de comando que

contém um sistema de controle de impulso e um sistema de aquisição de dados composto principalmente por um digitalizador de alta taxa de amostragem. A Figura 50 apresenta a mesa de comando do LEAT.

Através do sistema de controle é possível ajustar a distância entre os *gaps* principais do gerador de impulsos, ajustar a distância entre os *gaps* do múltiplo *chopping gap*, ativar de maneira manual o sistema *Trigger*, controlar o valor de tensão C.C. de carregamento entre outros.

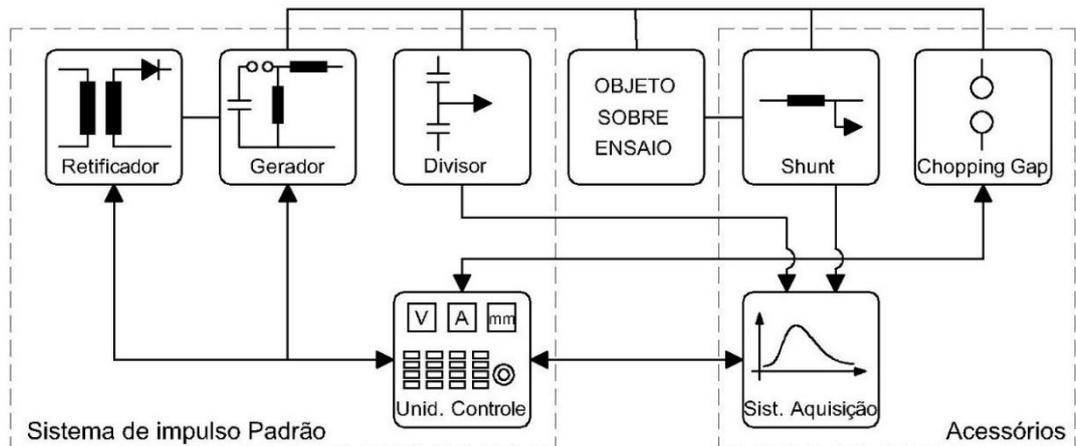
O sistema de aquisição de dados é basicamente um osciloscópio digital com alta taxa de amostragem. Este sistema recebe os sinais de tensão oriundos dos divisores de tensão e *shunts* utilizados no ensaio e então realiza o seu processamento. Este equipamento é capaz de calcular de maneira automática todos os parâmetros pertinentes de impulso de tensão tais como tempo de frente, cauda, valor de pico, bem como *overshoots* associados aos impulsos, e então, apresenta-os por meio de um monitor ao operador. A Figura 51 apresenta um diagrama funcional de todo o sistema gerador de impulsos do LEAT, com seus sistemas de controle e aquisição de dados embutidos, considerando todos os equipamentos, que de forma integrada, compõem o Gerador de Impulsos de tensão do LEAT.

Figura 50 – Mesa de controle e aquisição de dados



Fonte: Do autor

Figura 51 – Diagrama Funcional do sistema gerador de impulsos do LEAT



Fonte: Adaptado de (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2010, p. 17)

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 5

O capítulo apresentado destacou todos os equipamentos que compõe o sistema gerador de impulsos do LEAT. O entendimento do funcionamento dos equipamentos e acessórios do gerador de impulsos de tensão é de fundamental importância para que o leitor possa associar os conceitos teóricos abordados no capítulo 2 à prática sistêmica do processo de geração de impulsos em um laboratório de alta tensão. O conhecimento dos parâmetros elétricos do gerador de impulsos atmosféricos do LEAT dará subsídio às simulações que serão realizadas no capítulo 5.

5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO UTILIZANDO CIRCUITO GLANINGER NOS ENSAIOS NORMALIZADOS EM TRANSFORMADORES DE 5 MVA UTILIZANDO O PROGRAMA ATP

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As simulações computacionais de sistemas elétricos estão presentes no dia a dia dos engenheiros eletricitistas. Este recurso é de suma importância pois permite a reprodução de fenômenos físicos de maneira computacional, possibilitando a interpretação e análise dos resultados para assim, propor métodos para otimizar o processo (CARLETO, 2006).

Com o rápido avanço da tecnologia, principalmente na área da informática, os microprocessadores (*hardware*) processam dados cada vez mais rápido e os programas (*softwares*) se tornam cada vez mais versáteis, apresentando uma linguagem mais intuitiva e simplificada (CARLETO, 2006). Diante deste cenário, o programa ATP (*Alternative Transient Program*), é largamente utilizado para a realização de simulações na área de engenharia elétrica, seja para simulações de circuitos elétricos, transitórios eletromagnéticos, análise de sistemas de potência, entre outros. Este programa possui uma interface gráfica, sendo possível modelar de maneira fiel todos os elementos elétricos envolvidos nos ensaios em alta tensão.

A metodologia proposta nesta dissertação consiste na modelagem e simulação, através do programa ATP, de ensaios de impulso de tensão em transformadores de potência, utilizando-se os dados reais do gerador de impulsos de tensão do LEAT. O principal objetivo é avaliar e solucionar problemas de baixos tempos de cauda dos impulsos aplicados em transformadores com valores de tensão e potência específicos, e que apresentam indutâncias abaixo de 3 mH.

Serão destacados os resultados obtidos com a inserção de um circuito Glaninger, comparado com a metodologia baseada no aumento da resistência paralela total do circuito em teste. Através da introdução de um circuito Glaninger devidamente adaptado, apresenta-se a solução para a resolução do problema de deformação da forma de onda padronizada de impulso que acontece em ensaios de transformadores, com critérios estabelecidos pelas normas vigentes.

Desta forma, será possível avaliar os empecilhos causados pelo objeto em teste, além de nortear os operadores de laboratórios de alta tensão na resolução de problemas relacionados ao baixo tempo de cauda observados nas formas de onda dos impulsos. Como as simulações não requerem a montagem física do circuito de ensaio, a utilização do programa ATP permitirá que o operador faça uma avaliação prévia dos resultados do ensaio, poupando tempo e resguardando o equipamento de possíveis danos.

5.2 MODELAGEM DO GERADOR DE IMPULSOS (17s1p) NO ATP E VALIDAÇÃO

5.2.1 MODELAGEM DO GERADOR UTILIZANDO O PROGRAMA ATP

Para as simulações que serão realizadas no presente trabalho, o gerador de impulsos do LEAT foi modelado no software ATP em sua configuração 17s1p, visto que um estágio do gerador se encontra fora de operação. Para isto, foram inseridos todos os dados reais dos elementos elétricos que constituem o gerador de impulsos.

Foram utilizados 17 estágios, logo, 34 capacitores de valor nominal conforme apresentado em 4.2.1. Todavia, a estes capacitores foram atribuídas condições iniciais de tensão, isto para simular que estes estão carregados por um valor pré-estabelecido de tensão C.C. do retificador. Conforme já discutido, esta condição inicial de tensão é definida pelo operador e corresponde ao valor base para a obtenção de um impulso de tensão proporcional ao número de estágios.

Os 68 resistores série e paralelo, conforme item 4.2.2, além dos 16 resistores de carregamento, conforme item 4.2.3, foram dispostos de maneira a reproduzir de forma fiel a montagem atual do gerador de impulsos do LEAT com seus 17 estágios. A correta inserção destes elementos é necessária pois servirá de ponto de partida para as análises que serão realizadas posteriormente.

Os centelhadores do gerador foram representados através de chaves controladas por tempo, sendo seu disparo definido para um tempo $t = 0 \mu\text{s}$.

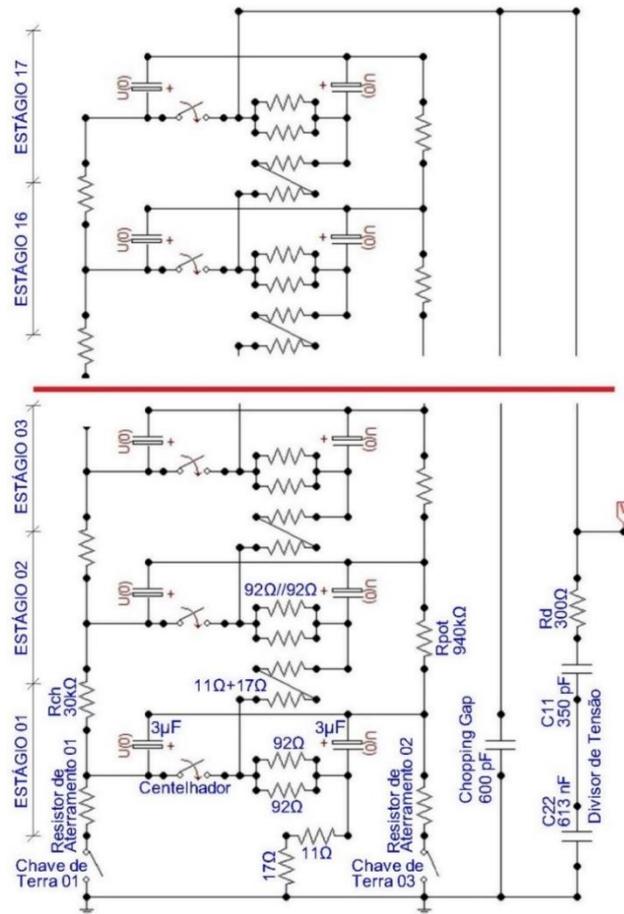
O divisor de tensão utilizado para este gerador possui em seu braço de alta tensão uma capacitância igual a 350 pF, com um resistor de amortecimento externo $R_d = 300 \Omega$ e, em seu braço de baixa tensão, uma capacitância igual a 613 nF. Além disto, o múltiplo *chopping gap* encontra-se conectado ao gerador, contribuindo com uma capacitância igual a 600 pF (GAMLIN, SCHWENK e WOLF, 2004).

Logo, após a inserção dos elementos elétricos do gerador ao software ATP, o modelo completo do gerador é mostrado na Figura 52. Destaca-se que, independente da aparente complexidade na ligação dos componentes, a mesma deve ser mantida para a garantia da segurança operacional.

Após este processo, uma simulação foi realizada utilizando-se como objeto sob ensaio a própria capacitância do divisor de tensão, bem como, a do múltiplo *chopping gap*. Portanto, carregando-se cada um dos estágios do gerador de impulsos com um valor de 35 kV, obteve-se

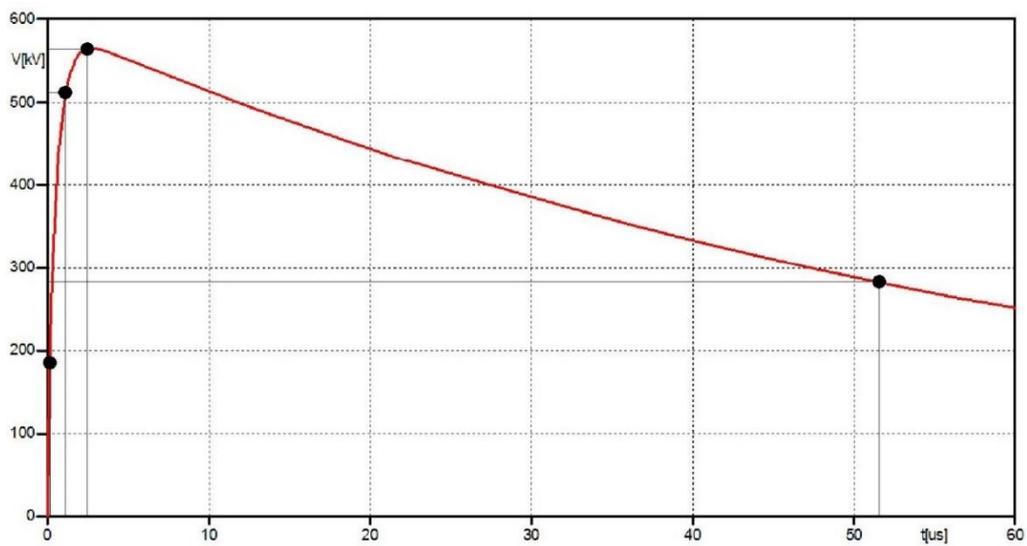
a forma de onda mostrada na Figura 53. Esta forma de onda resultante é obtida sem nenhuma alteração do gerador de impulsos de tensão.

Figura 52 – Modelo do gerador de impulsos de tensão no ATP na configuração 17s1p



Fonte: Do autor

Figura 53 – Impulso de tensão simulado para configuração 17s1p



Fonte: Do autor

A forma de onda do impulso de tensão simulada apresenta os valores mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do impulso de tensão simulado no ATP para configuração 17s1p

Configuração do Gerador	17s1p
Tensão C.C. de carregamento	35 kV
Valor de pico do impulso	564,38 kV
$V_{90\%}$	507,94 kV
$t_{90\%}$	1,09 μs
$V_{30\%}$	169,31 kV
$t_{30\%}$	0,12 μs
$T_1 = 1,67 \times (t_{90\%} - t_{30\%})$	1,62 μs
$V_{50\%}$	282,19 kV
T_2	51,59 μs

Fonte: Do autor

Vale ressaltar que um circuito equivalente deste gerador poderá ser montado no sentido de facilitar a execução dos testes. Para isto, considerando-se as equações (2.39), (2.40) e (2.41) previamente apresentadas, tem-se como parâmetros equivalentes do gerador de impulsos do LEAT, quando utilizados 17 estágios, os valores mostrados a partir dos cálculos a seguir:

$$C'_g = \frac{C_g}{n} = \frac{1,5 \mu F}{17} = 88,23 nF$$

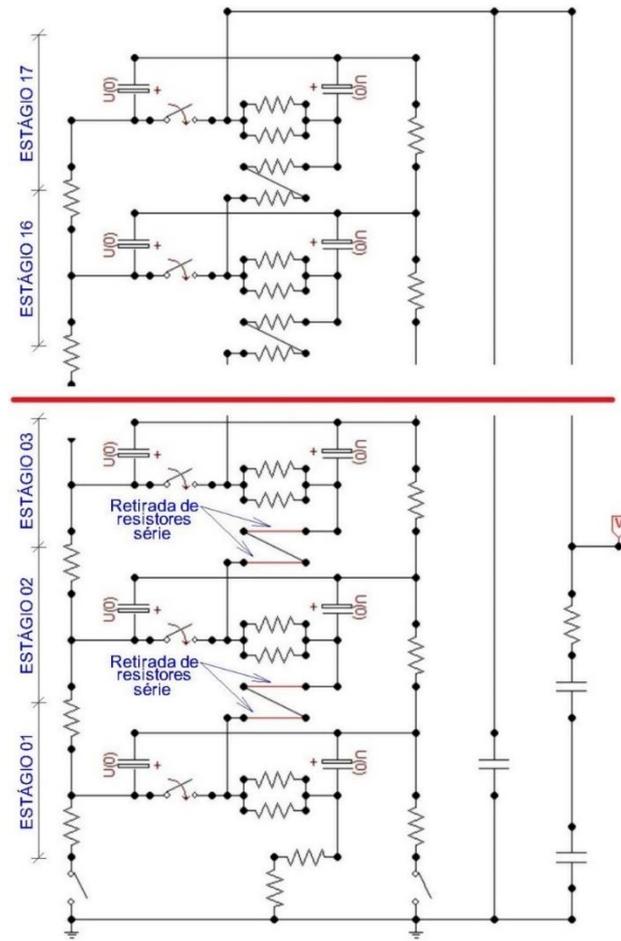
$$R'_p = n \times R_p = 17 \times 46 = 782 \Omega$$

$$R'_s = n \times R_s = 17 \times 28 = 476 \Omega$$

Após análise dos resultados, nota-se que o tempo de frente, observado na Tabela 5.1, não se encontra dentro de um valor tolerável pela norma NBR IEC 60060-1 (2013) que é de $1,2 \mu s \pm 30\%$. Desta forma, no intuito de adequar este parâmetro, decidiu-se retirar os resistores série que compõem o segundo e terceiro estágios do gerador, reduzindo a resistência série total do gerador em 56Ω . A adaptação realizada é mostrada na Figura 54 e a forma de onda obtida, após estas modificações é apresentada na Figura 55.

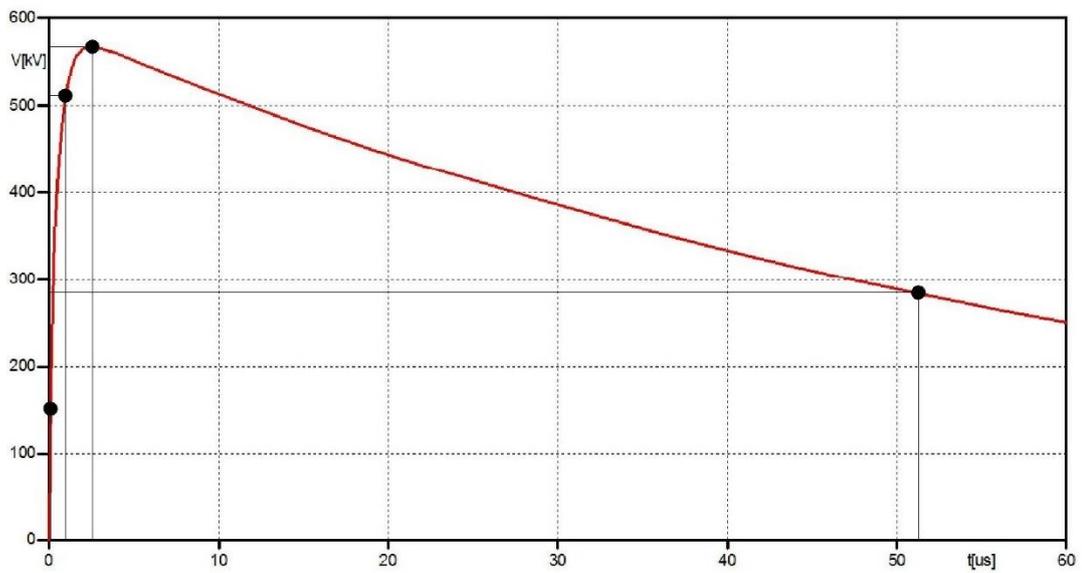
A Tabela 7 apresenta os novos resultados obtidos da forma de onda simulada da Figura 55, após as modificações realizadas. Com isso, observou-se uma redução do tempo de frente, de $1,62 \mu s$ para $1,47 \mu s$, estando desta forma, de acordo com as recomendações da norma NBR IEC 60060-1 (2013).

Figura 54 – Redução de resistências série no gerador de impulsos



Fonte: Do autor

Figura 55 – Impulso de tensão simulado após redução da resistência série



Fonte: Do autor

Tabela 7 – Parâmetros do impulso de tensão simulado no ATP após modificações

Configuração do Gerador	17s1p
Tensão C.C. de carregamento	35 kV
Valor de pico do impulso	566,38 kV
$V_{90\%}$	509,74 kV
$t_{90\%}$	0,98 μs
$V_{30\%}$	169,91 kV
$t_{30\%}$	0,10 μs
$T_1 = 1,67 \times (t_{90\%} - t_{30\%})$	1,47 μs
$V_{50\%}$	283,19 kV
T_2	51,31 μs

Fonte: Do autor

5.2.2 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO O GERADOR DO LEAT

De posse dos dados obtidos com a modelagem no ATP, partiu-se para a validação dos resultados através de um ensaio realizado no LEAT, com os mesmos equipamentos utilizados na modelagem realizada previamente. A Figura 56 apresenta o circuito de ensaio montado, mostrando a disposição do gerador de impulsos, do divisor de tensão de 2400kV bem como do múltiplo *chopping gap*.

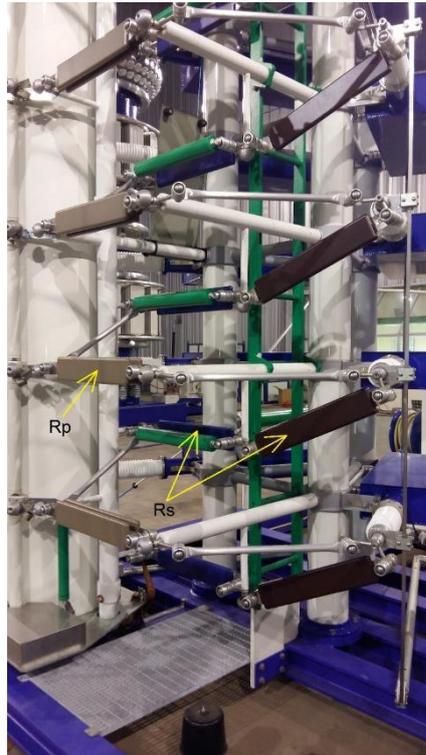
Após montagem do circuito, o gerador de impulsos é carregado com tensão C.C. de 40 kV. Devido ao rendimento do gerador de impulsos real, com valor aproximado de 83,23%, este é carregado com um valor ligeiramente maior do que os 35 kV utilizados na simulação com o ATP. As resistências série e paralela a princípio não são alteradas, permanecendo as mesmas que constituem os 17 estágios do gerador. A Figura 57 apresenta a disposição dos resistores série e paralelo para o ensaio em questão.

Figura 56 – Disposição dos equipamentos para o ensaio



Fonte: Do autor

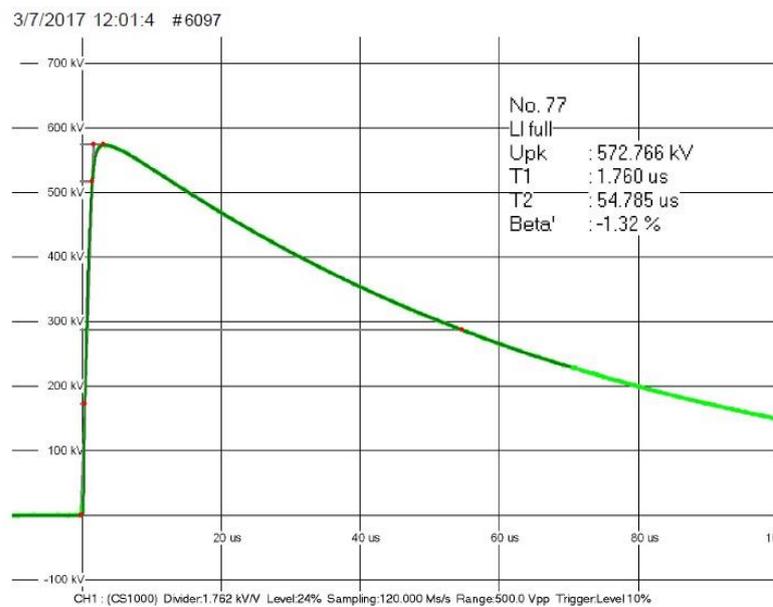
Figura 57 – Disposição dos resistores série e paralelo no circuito de ensaio



Fonte: Do autor

A Figura 58 apresenta o impulso de tensão aplicado ao múltiplo *chopping gap* e ao divisor de tensão.

Figura 58 – Impulso de tensão obtido no LEAT para configuração 17s1p



Fonte: Instrumentação do LEAT

A forma de onda do impulso de tensão obtida com o ensaio apresenta os valores mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros do impulso de tensão obtido no LEAT

Configuração do Gerador	17s1p
Tensão C.C. de carregamento	40 kV
Valor de pico do impulso	572,766 kV
T_1	1,76 μ s
T_2	54,78 μ s

Fonte: Instrumentação do LEAT

Após análise dos resultados, nota-se que o tempo de frente, observado na Tabela 8, não se encontra dentro de um valor tolerável pela norma NBR IEC 60060-1 (2013), semelhante ao caso simulado. Desta forma, retirou-se os resistores série que compõem o segundo e terceiro estágios do gerador substituindo-os por curto circuitos formados por barras de alumínio, reduzindo assim a resistência série em 56 Ω . Esta alteração foi idêntica a realizada na simulação, no sentido de verificar a equivalência entre os casos simulado e ensaiado no LEAT.

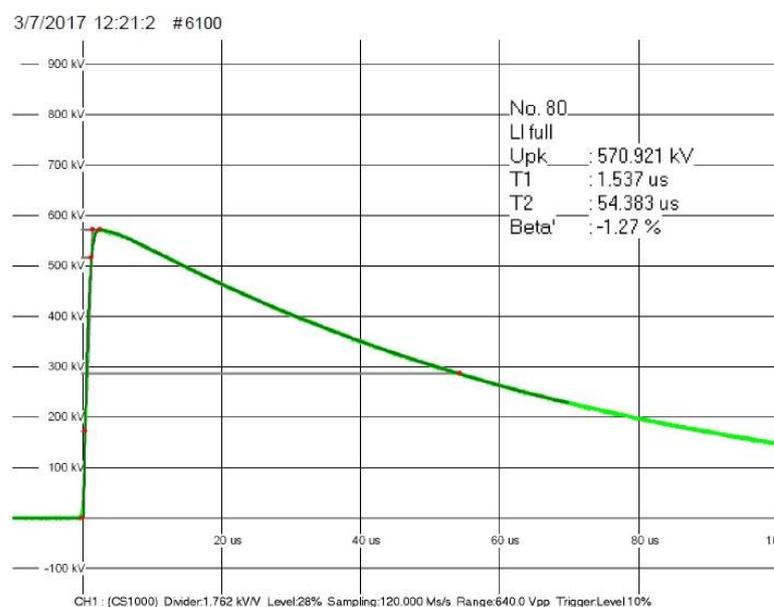
As adaptações realizadas no gerador de impulsos do LEAT são facilmente executáveis, visto que os seus resistores possuem conectores de encaixe especiais, facilitando a manipulação destes para alterações no circuito de ensaio. A Figura 59 apresenta um operador realizando as alterações necessárias no circuito de ensaio, bem como o circuito com sua forma final para o ensaio. A Figura 60 apresenta a forma de onda obtida após estas modificações e, a Tabela 9 apresenta os parâmetros da forma de onda.

Figura 59 – Disposição dos resistores série e paralelo no circuito de ensaio após modificações



Fonte: Do autor

Figura 60 – Impulso de tensão obtido para configuração 17s1p após modificações



Fonte: Instrumentação do LEAT

Tabela 9 – Parâmetros do impulso de tensão obtido no LEAT

Configuração do Gerador	17s1p
Tensão C.C. de carregamento	40 kV
Valor de pico do impulso	570,92 kV
T_1	1,537 μ s
T_2	54,38 μ s

Fonte: Instrumentação do LEAT

A tabela 10 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos com a simulação e com o ensaio realizado no LEAT, após as adequações realizadas em relação a resistência série.

Tabela 10 – Comparativo entre impulsos de tensão após adequações da resistência série

	Simulação ATP	Ensaio LEAT	Aumento percentual do parâmetro ensaiado em relação ao simulado
Tempo de frente (T_1)	1,47 μ s	1,537 μ s	4,55%
Tempo de cauda (T_2)	51,31 μ s	54,38 μ s	5,98%
Valor de pico	566,38 kV	570,92 kV	0,8%

Fonte: Do autor

O comparativo realizado na Tabela 10 demonstra a eficácia do modelo desenvolvido no programa ATP para simulação de ensaios de impulsos atmosféricos em laboratórios de alta tensão. Notou-se que os parâmetros ensaiados apresentam valores ligeiramente maiores do que

os simulados, porém, bem próximos, sendo observada a maior diferença em relação ao tempo de cauda, com valor 5,98% maior do que o parâmetro simulado. As diferenças são justificáveis pelo fato das resistências do gerador de impulsos do LEAT não possuírem valores idênticos aos nominais, mostrados em seu dado de placa. Vale salientar que as simulações realizadas utilizam os valores nominais dos resistores e replicam estes para os 17 estágios. Entretanto, no circuito real, isto não se aplica devido a existência de pequenas diferenças de valores entre os resistores que compõem os diversos estágios do gerador.

Desta forma, após comparados e validados os dados entre parâmetros simulados e ensaiados do gerador de impulsos do LEAT, serão realizadas simulações de ensaio em um transformador de potência para avaliar as deformações que ocorrem na forma de onda. Além disto, serão apresentadas as metodologias para a resolução do problema do baixo tempo de cauda, observados em ensaios desta natureza.

5.3 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO CIRCUITO GLANINGER NO ENSAIO DE UM TRANSFORMADOR DE 5 MVA UTILIZANDO O PROGRAMA ATP

Como a validação do circuito de ensaio no ATP, quando comparado com os resultados obtidos utilizando o gerador de impulso de tensão real, é considerada bastante satisfatória, foi realizado um ensaio simulado em um transformador industrial à óleo, com as características mostradas na Tabela 11. O referido transformador se enquadra na faixa de equipamentos capazes de distorcer a onda de impulso de tensão pela sua baixa indutância. Os resultados apresentados em relação ao transformador serão os simulados, pois não dispomos do referido equipamento para a realização dos ensaios em laboratório.

Tabela 11 – Características nominais do transformador de distribuição a ser ensaiado

Potência	5000 kVA
Classe de Tensão	15 kV
Tensão Primária	13,8 kV
Tensão Secundária	440/254 V
Primário	Triângulo
Secundário	Estrela, neutro acessível
Frequência nominal	60 Hz
NBI - Primário	95 kV
Impedância a 75° C	4 %

Fonte: Schneider Electric

Primeiramente, a indutância de curto circuito deste transformador é calculada de acordo com a equação (3.1). Logo:

$$L_{cc} = \frac{u_{cc} \cdot U_n^2}{100 \cdot \omega \cdot S_n} = \frac{4 \cdot (13,8 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 2\pi 60 \cdot 5 \cdot 10^6} = 4,04 \text{ mH}$$

Todavia, este transformador possui seu primário ligado em triângulo, sendo que, seus enrolamentos de alta tensão serão ensaiados individualmente. Nos ensaios, é aplicado um impulso de tensão em cada um dos enrolamentos de alta tensão enquanto os outros são aterrados. Portanto, de acordo com a Figura 17, a indutância efetiva de ensaio L_b será dada por:

$$L_b = \frac{1}{2} L_{cc} = 2,02 \text{ mH}$$

A capacitância deste transformador poderá ser estimada de acordo com A norma NBR 5356-4 (2008), conforme a equação (5.1) a seguir:

$$C_t = C_1 + \sqrt{C_2 \cdot C_3} \quad (5.1)$$

onde,

C_1 = Capacitância da Bucha;

C_2 = Capacitância série do enrolamento;

C_3 = Capacitância para terra do enrolamento.

Entretanto, de acordo com FESER (1977), em seu trabalho utilizando geradores de impulsos em ensaio com transformadores, um valor estimado de $C_t = 10 \text{ nF}$ foi disponibilizado, sendo este utilizado nas simulações do presente trabalho.

Após cálculos referentes ao espécime sob ensaio, serão definidos os parâmetros a serem utilizados no gerador de impulsos. Primeiramente, o nível básico de isolamento para este transformador é 95 kV, sendo este o valor de crista que deverá ser utilizado para o ensaio. O gerador de impulsos do LEAT possui 18 estágios com tensão nominal de 3600 kV. Entretanto, para o ensaio em questão, serão utilizados apenas 4 estágios, visto que o NBI do equipamento possui um valor muito inferior a máxima tensão do gerador. Portanto, será utilizada a configuração 2s2p para aumentar a capacitância do gerador, com o conseqüentemente aumento da energia por estágio.

Desta forma, a capacitância total do gerador de impulso para a configuração citada, de acordo com a equação (4.2), será:

$$C_{total} = \frac{p \times C_{est\u00e1gio}}{s} = \frac{2 \times 1,5 \mu F}{2} = 1,5 \mu F$$

Sabe-se que a indut\u00e2ncia do transformador \u00e9 muito baixa, todavia, o c\u00e1lculo da resist\u00eancia s\u00e9rie ser\u00e1 o mesmo apresentado no item 2.3.2, visto que a indut\u00e2ncia do objeto sob ensaio influenciar\u00e1 minimamente neste par\u00e2metro. Logo, para o c\u00e1lculo da resist\u00eancia s\u00e9rie necess\u00e1ria para o ensaio, ser\u00e3o utilizadas as equa\u00e7\u00f5es (2.21) e (2.27), portanto:

$$C_g = 1,5 \mu F$$

$$C_b = C_t + \frac{C_{11} \times C_{22}}{C_{11} \times C_{22}} = 10 \text{ nF} + \frac{665 \text{ pF} \times 479,69 \text{ nF}}{665 \text{ pF} + 479,69 \text{ nF}} = 10,66 \text{ nF}$$

$$C_1 = \frac{C_g \times C_b}{C_g + C_b} = \frac{1,5 \mu F \times 10,66 \text{ nF}}{1,5 \mu F + 10,66 \text{ nF}} = 10,58 \text{ nF}$$

$$R_{S \text{ calculado}} = \frac{T_1}{3,25 \times C_1} = \frac{1,2 \times 10^{-6}}{3,25 \times 10,58 \times 10^{-9}} = 34,89 \Omega$$

Ap\u00f3s c\u00e1lculo da resist\u00eancia s\u00e9rie, ser\u00e3o escolhidos os resistores a serem utilizados no gerador de impulsos. Para obter um valor de resist\u00eancia o mais pr\u00f3ximo poss\u00edvel da calculada, na configura\u00e7\u00e3o 2s2p do gerador, ser\u00e3o utilizados dois resistores de 17 Ω por est\u00e1gio conectados em s\u00e9rie, de tal forma que:

$$R_{S \text{ gerador}} = (17 + 17) // (17 + 17) + (17 + 17) // (17 + 17) = 34 // 34 + 34 // 34 = 34 \Omega$$

Para a resist\u00eancia paralela, ser\u00e1 utilizado, a princ\u00edpio, um resistor de 92 Ω por est\u00e1gio, totalizando:

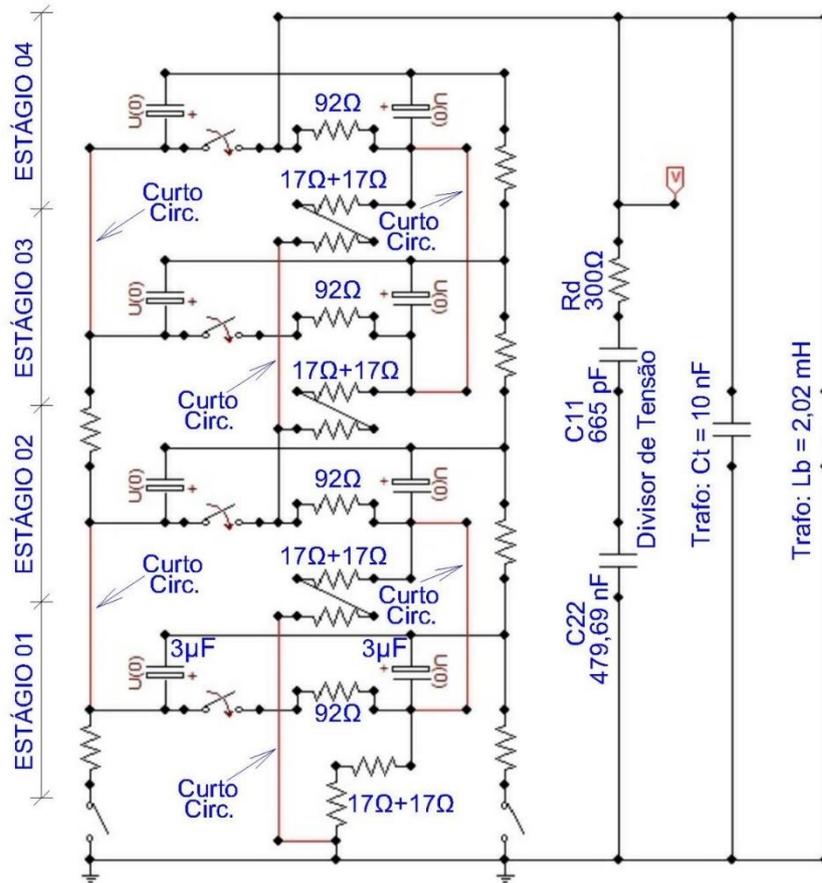
$$R_{p \text{ gerador}} = (92) // (92) + (92) // (92) = 92 \Omega$$

O divisor de tens\u00e3o escolhido ser\u00e1 o que apresenta os seguintes par\u00e2metros: tens\u00e3o m\u00e1xima de 1200 kV, $C_{11} = 665 \text{ pF}$, $C_{22} = 479,69 \text{ nF}$ e $R_d = 300 \Omega$, sendo este previamente mostrado na Figura 43.

A Figura 61 apresenta os seguintes equipamentos: o gerador de impulsos adaptado para a configura\u00e7\u00e3o 2s2p montado no programa ATP; o objeto sob ensaio, representado por $L_b = 2,02 \text{ mH}$ e $C_t = 10 \text{ nF}$; o resistor de amortecimento, representado por $R_d = 300 \Omega$ e o divisor de tens\u00e3o, representando por $C_{11} = 665 \text{ pF}$ e $C_{22} = 479,69 \text{ nF}$. A forma de onda do impulso de

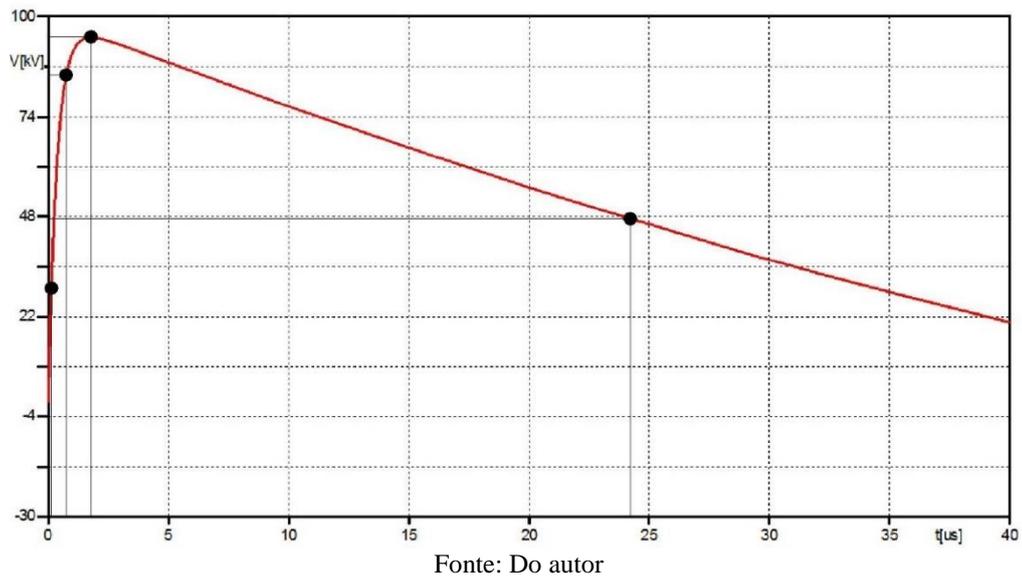
tensão, obtida após a primeira simulação, é mostrada na Figura 62. Além disso, a Figura 63 mostra o impulso de tensão com tempo o de simulação estendido, mostrando o seu *undershoot*.

Figura 61 – Circuito completo para o ensaio do transformador, no ATP

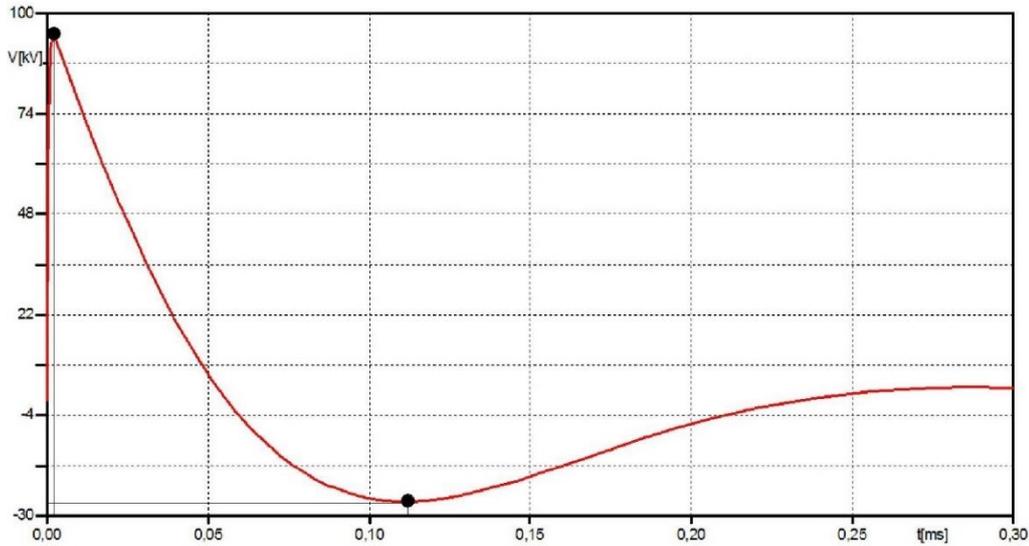


Fonte: Do autor

Figura 62 – Impulso de tensão simulado, aplicado em um dos terminais do transformador



Fonte: Do autor

Figura 63 – Impulso de tensão com *undershoot* representado

Fonte: Do autor

A Tabela 12 apresenta os parâmetros obtidos após a simulação ser realizada.

Tabela 12 – Resultados da simulação

Tensão C.C. de carregamento	49,50 kV
Valor de pico do impulso	94,64 kV
$V_{90\%}$	85,18 kV
$t_{90\%}$	0,78 μ s
$V_{30\%}$	28,39 kV
$t_{30\%}$	0,11 μ s
$T_1 = 1,67 \times (t_{90\%} - t_{30\%})$	1,12 μ s
$V_{50\%}$	47,32 kV
$T_2 = t_{50\%}$	24,22 μ s
Tensão mínima	-26,30 kV
$Undershoot = (Tensão\ mínima /Valor\ de\ pico) \times 100\%$	27,79%

Fonte: Do autor

Nota-se, com os resultados desta simulação, que o tempo de frente T_1 apresenta valor satisfatório, dentro da margem recomendada pela NBR IEC 60060-1 (2013) de 0,84 μ s à 1,56 μ s. Entretanto, o tempo de cauda T_2 não alcança o valor mínimo tolerável de 40 μ s para ensaios de impulso, como já era esperado devido a baixíssima indutância do objeto sob ensaio. Portanto, algumas alterações devem ser realizadas ao circuito de ensaio no intuito de melhorar este parâmetro, com conseqüente atendimento as normas.

Conforme apresentado no item 3.3.3 do presente trabalho, 3 metodologias poderão ser utilizadas para aumentar o baixo tempo de cauda observado, sendo estas: aumento da

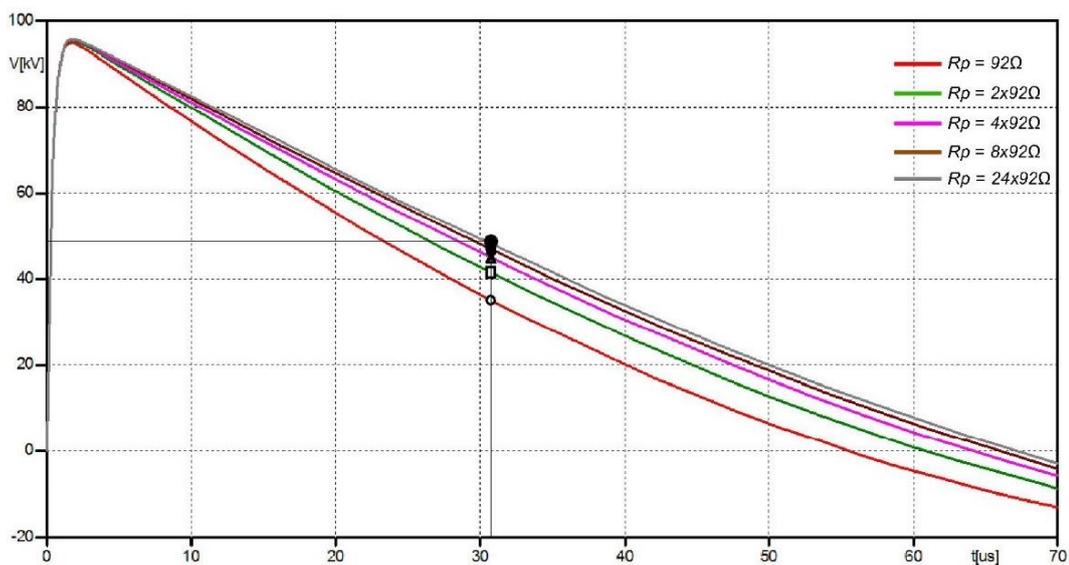
capacitância C_g do gerador de impulsos, aumento da resistência paralela R_p ou inserção de um circuito Glaninger.

Vale ressaltar que a configuração 2s2p do gerador de impulsos foi escolhida no intuito de aumentar a capacitância C_g do gerador, por isto, a metodologia do aumento da capacitância já foi utilizada para a montagem inicial do circuito, com o gerador de impulsos apresentando uma alta capacitância igual a $1,5 \mu\text{F}$. Todavia, conforme resultados obtidos, seu aumento não foi o suficiente para elevar o tempo de cauda de maneira considerável.

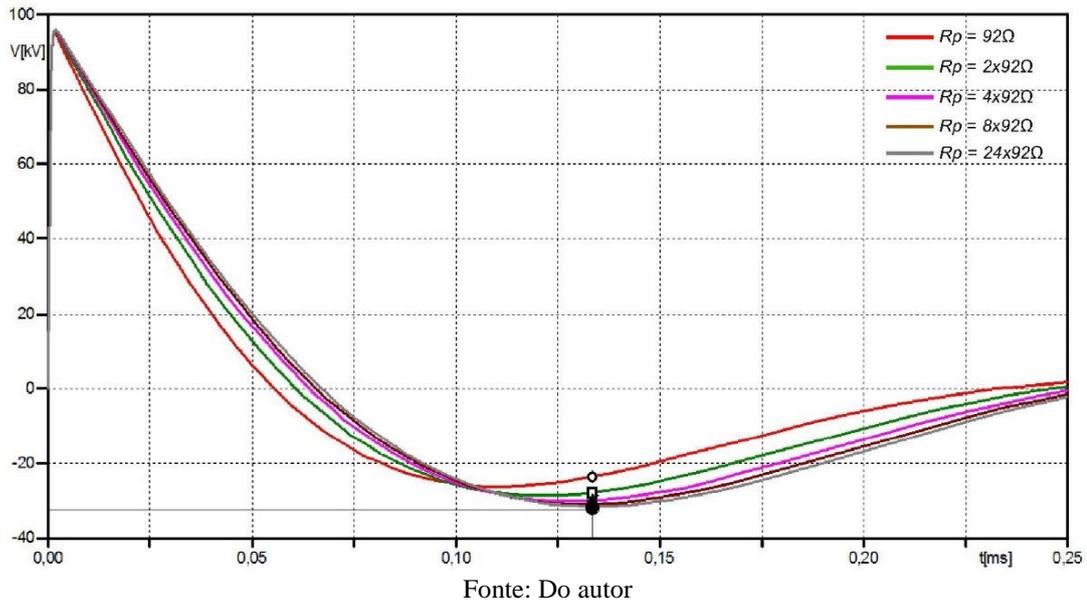
Conforme apresentado no capítulo 2, sabe-se que o tempo de cauda depende essencialmente da resistência paralela e das capacitâncias envolvidas no circuito de ensaio. Como a capacitância do objeto sob ensaio é fixa e a do gerador já foi alterada, será realizado o aumento da resistência paralela do gerador para assim, tentar aumentar o tempo de cauda do impulso. Entretanto, para valores de indutâncias muito baixos, menores que 3 mH , o aumento da resistência paralela não surtirá grandes efeitos, além de, aumentar demasiadamente o undershoot (GAMLIN e SCHWENK, 2011).

Simulando-se este mesmo caso para 5 valores distintos de resistência paralela (92Ω , $2 \times 92 \Omega$, $4 \times 92 \Omega$, $8 \times 92 \Omega$, $24 \times 92 \Omega$), observou-se que o tempo de cauda aumenta, porém não chega a atingir ao menos $40 \mu\text{s}$, conforme mostrado na Figura 64, na qual, o maior valor de tempo de cauda alcançado pela maior resistência paralela testada foi $T_2 = 30,75 \mu\text{s}$, com *undershoot* igual a $33,23 \%$, conforme mostrado na Figura 65.

Figura 64 – Impulsos de tensão para diferentes valores de resistência paralela



Fonte: Do autor

Figura 65 – Impulsos de tensão com *undershoots* representados

Neste caso, a aplicação do circuito Glaninger se torna necessária para a execução do ensaio, sendo possível alcançar o tempo de cauda estabelecido na norma NBR IEC 60060-1 (2013). Será utilizado assim, um circuito Glaninger no qual o valor da indutância escolhida será $L_d = 0,4$ mH, sendo este referente a dois indutores existentes, que estão disponíveis, no sistema Glaninger do LEAT. Nota-se que o valor L_d escolhido encontra-se dentro da faixa tolerável conforme a inequação (3.3), apresentada previamente. O valor da resistência R_d será determinada de acordo com a equação (3.2) logo,

$$R_d = R_s \cdot \frac{L_b}{L_s} = 34,89 \cdot \frac{2,02}{0,4} = 176,19 \Omega$$

Considerando os valores de resistências existentes no sistema Glaninger do LEAT, optou-se pela utilização de 4 resistores, sendo: 1 resistor de 50Ω , 2 resistores de 200Ω e 1 resistor de 400Ω . Primeiramente, agrupou-se 1 resistor de 50Ω e 1 resistor de 200Ω em paralelo. Após isto, agrupou-se 1 resistor de 200Ω e 1 resistor de 400Ω também em paralelo. Então, agrupou-se estes conjuntos de resistores em série, de tal forma que a resistência equivalente deste conjunto é dada por:

$$R_d = (50//200) + (200//400) = 173,33 \Omega$$

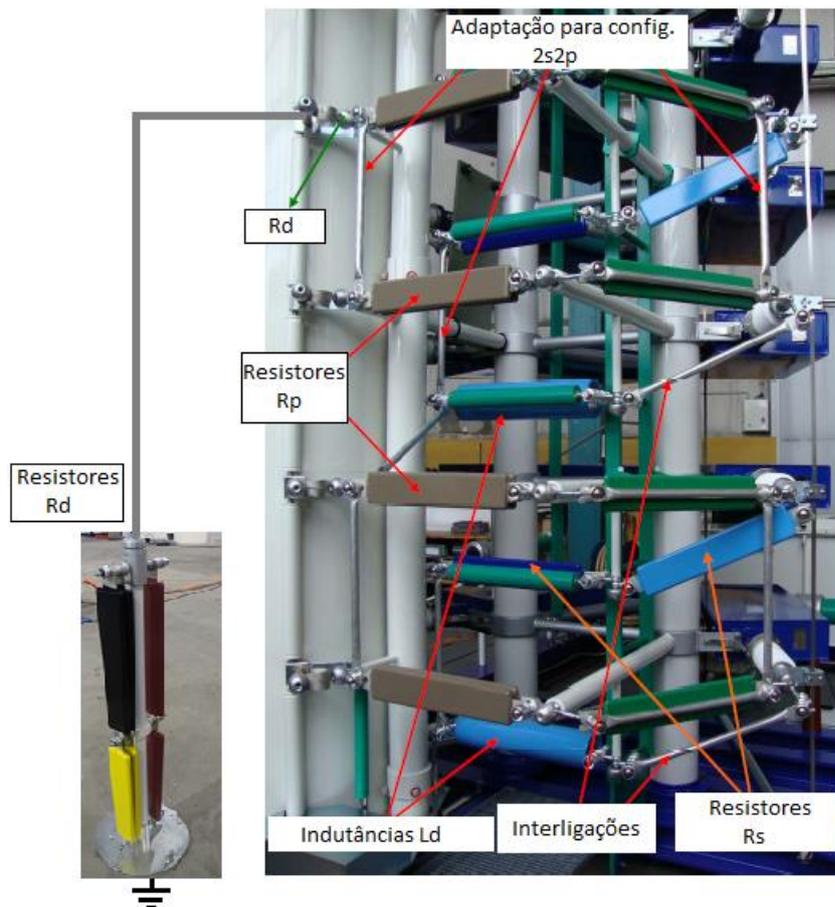
O agrupamento de resistências desta forma é possível, fisicamente, graças a um acessório em formato de pedestal do circuito Glaninger do LEAT, conforme mostrado na Figura 4.23 apresentada previamente.

De acordo com GAMLIN e SCHWENK (2011), a correta inserção do circuito Glaninger ao gerador de impulsos na configuração 2s2p, caso o objeto fosse ensaiado no LEAT, é mostrada na Figura 66.

Nota-se, da análise da Figura 66, que as resistências série, dos estágios 1 e 3, são retiradas para inserção das indutâncias do circuito Glaninger. Desta forma, é necessário que as resistências série da configuração inicial, mostradas na Figura 61, sejam remanejadas para os estágios 2 e 4. Com isso, será necessário a utilização de apenas dois resistores série de $17\ \Omega$, sendo um inserido ao 2º estágio e outro ao 4º estágio, totalizando $34\ \Omega$ no momento do disparo, como desejado. Além disso, observa-se nesta figura a correta inserção das resistências do circuito Glaninger, bem como seu ponto de conexão.

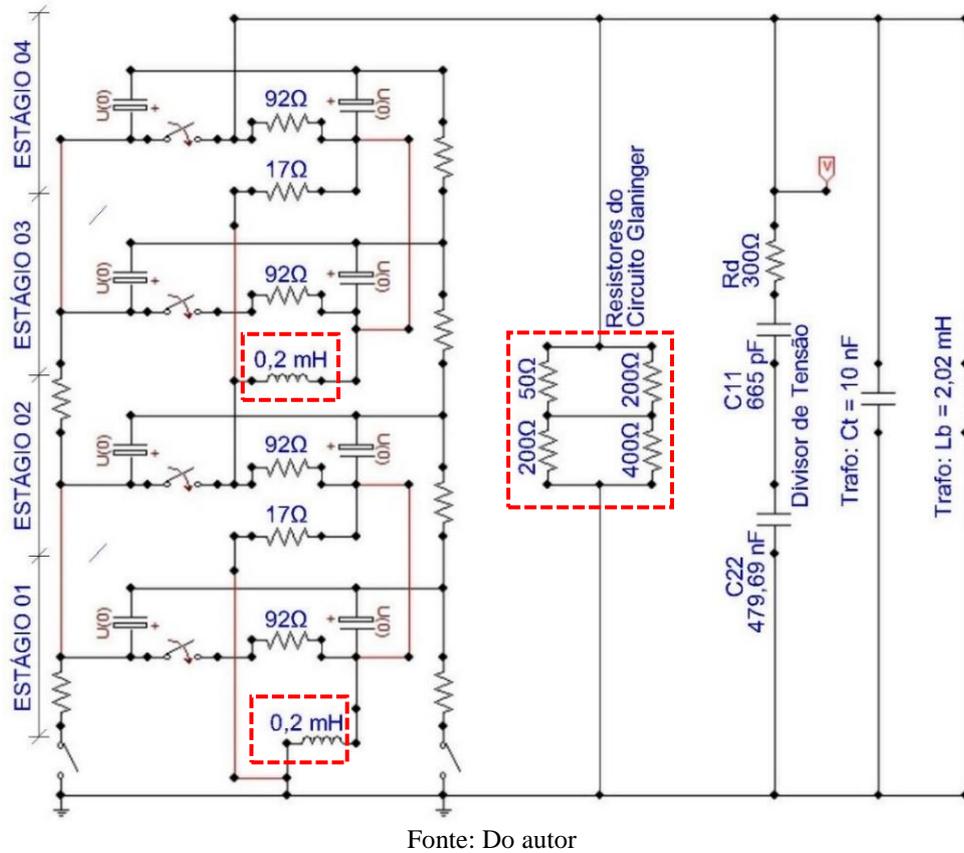
Após o cálculo dos parâmetros do circuito Glaninger, os elementos elétricos que o constituem são inseridos ao circuito de ensaio, conforme mostrado na Figura 67.

Figura 66 – Adaptação do circuito Glaninger na configuração 2s2p do gerador de impulsos do LEAT



Fonte: Adaptado de (GAMLIN e SCHWENK, 2011, p. 47)

Figura 67 – Circuito de ensaio após inserção do circuito Glaninger



A forma de onda simulada após a inserção do circuito Glaninger é mostrada na Figura 68, com o seu *undershoot* mostrado na Figura 69.

Figura 68 – Impulso de tensão simulado, aplicado em um dos terminais do transformador após a inserção do circuito Glaninger

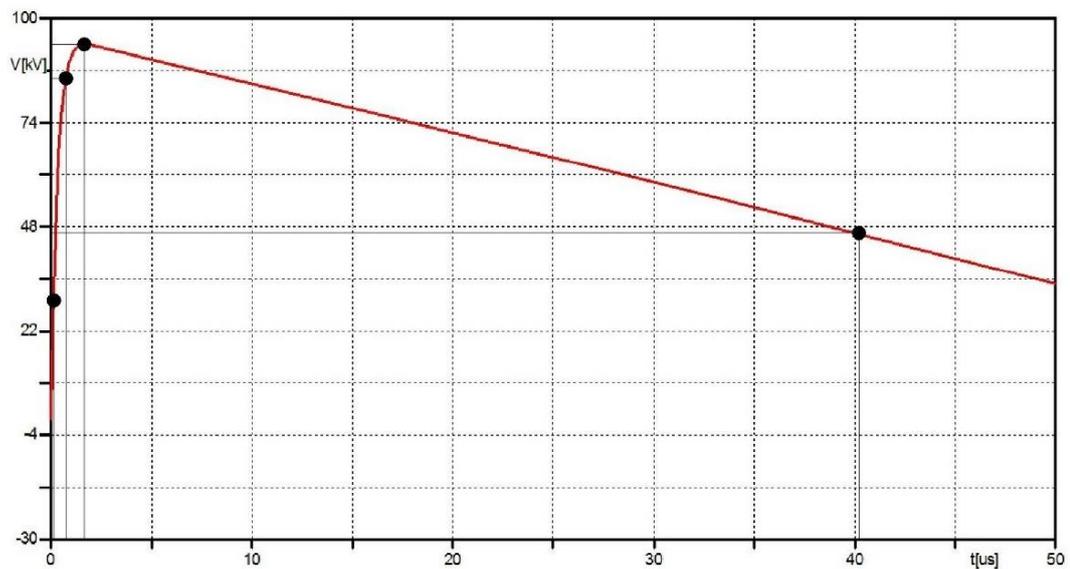
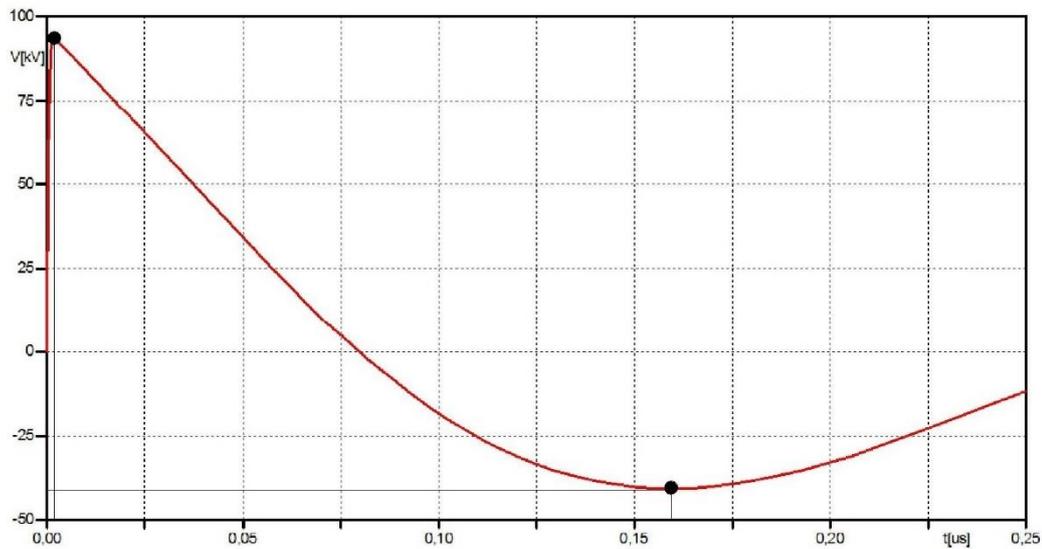


Figura 69 – Impulso de tensão com *undershoot* representado, após a inserção do circuito Glaninger



Fonte: Do autor

A Tabela 13 apresenta os parâmetros do impulso simulado após a inserção do circuito Glaninger.

Tabela 13 – parâmetros do impulso simulado após a inserção do circuito Glaninger.

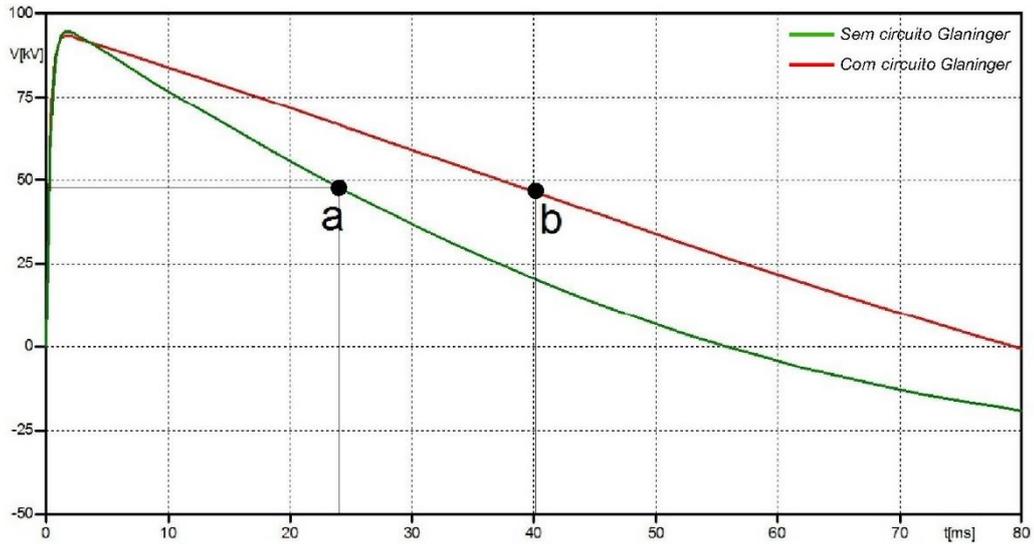
Tensão C.C. de carregamento	49,50 kV
Valor de pico do impulso	93,34 kV
$V_{90\%}$	84 kV
$t_{90\%}$	0,67 μ s
$V_{30\%}$	28 kV
$t_{30\%}$	0,1 μ s
$T_1 = 1,67 \times (t_{90\%} - t_{30\%})$	0,95 μ s
$V_{50\%}$	46,67 kV
T_2	40,12 μ s
Tensão mínima	-40,60 kV
$Undershoot = (Tensão\ mínima /Valor\ de\ pico) \times 100\%$	43,49%

Fonte: Do autor

Com a inserção do circuito Glaninger, notou-se um elevado aumento do tempo de cauda do impulso, sendo este $T_2 = 40,12 \mu$ s com *undershoot* igual a 43,49%. Estes valores atendem as especificações das normas NBR IEC 60060-1 (2013), NBR 5356-3 (2008) e NBR 5356-4 (2008), sendo possível ensaiar o transformador citado, assim como outros com semelhantes características de indutância, apresentando vantagens com relação à metodologia baseada na variação dos valores de R_p no que diz respeito ao tempo de cauda, conforme observado, se comparados com os resultados apresentados nas Figuras 62 e 63. Logo, a inserção do circuito

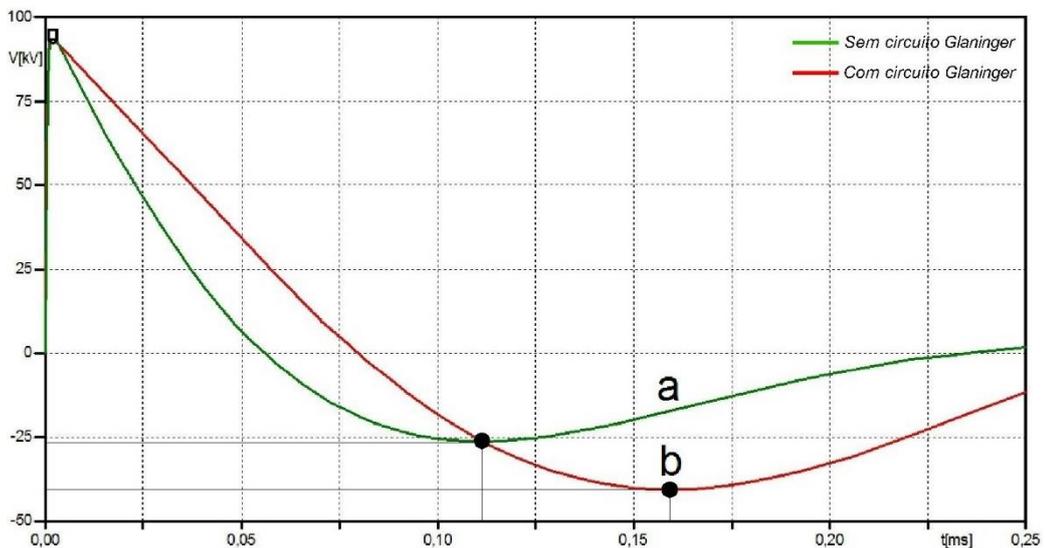
Glaninger viabilizou plenamente a realização dos ensaios de impulso em transformadores de baixa indutância, sendo este acessório de vital importância para laboratórios de alta tensão.

Figura 70 – a) Impulso de tensão sem o circuito Glaninger (referente a Figura 62); b) Impulso de Tensão com o circuito Glaninger (referente a Figura 68).



Fonte: Do autor

Figura 71 – a) Undershoot do Impulso de tensão sem o circuito Glaninger (Figura 63); b) Undershoot do Impulso de Tensão com o circuito Glaninger (Figura 69)



Fonte: Do autor

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo abordou de maneira sistemática um estudo de caso que envolve a metodologia do aumento do tempo de cauda em ensaios de transformadores que apresentam

valores extremamente baixos de indutância. Conforme a validação da simulação realizada através de ensaios no LEAT, o programa ATP mostrou-se bastante eficiente para a realização de simulações de ensaios em alta tensão, apresentando bons resultados quando utilizado também no ensaio de um transformador de baixa indutância.

6 CONCLUSÕES

Através do conteúdo desta dissertação, buscou-se apresentar os efeitos que as baixas indutâncias dos enrolamentos de transformadores causam a um circuito de ensaio de impulso atmosférico e as distorções associadas. Com os resultados das simulações, observou-se que para valores de indutância extremamente baixos, como no caso de transformadores de distribuição com alta potência, o aumento da resistência paralela não surtiu grandes efeitos, além de aumentar demasiadamente o *undershoot*. Nota-se que a adoção de um circuito Glaninger é a melhor proposta para a resolução deste problema, visto que, a sua utilização resolve o problema do baixo tempo de cauda, ocasionado por circuitos com baixa indutância, atendendo assim as exigências estabelecidas pelas normas NBR IEC 60060-1 (2013), NBR 5356-3 (2008) e NBR 5356-4 (2008). Buscou-se ainda sintetizar os passos para obtenção dos resultados com o circuito Glaninger, através de simulações no programa ATP, bem como utilizar dados reais do gerador de impulsos do LEAT, sendo estas análises de grande utilidade em laboratórios de alta tensão como avaliação prévia das condições em que os ensaios serão realizados. Estas ações proporcionam ganho de tempo na atribuição de valores próximos aos parâmetros a serem utilizados nos ensaios, bem como a redução do nível de stress aos equipamentos, possíveis de ocorrerem durante as tentativas de se obter os valores corretos para determinação das curvas dentro dos limites padronizados (BARRADAS, NUNES e TUMA, 2016)

Em relação à validação apresentada no capítulo 5, os resultados obtidos mostraram-se muito próximos destacando assim a consistência dos modelos implementados no ATP. Uma maior aproximação dos resultados obtidos na simulação e no laboratório, mostrados na Tabela 5.5, poderá ser conseguida com a atribuição dos valores reais das resistências fornecidas pelo fabricante. Isto é possível com a utilização de instrumentos tipo pontes de precisão para determinação dos valores exatos, com medições realizadas em todos os resistores do gerador.

Como sugestões para trabalhos futuros os quais poderão ser realizados em parte com o auxílio dos equipamentos disponíveis no LEAT UFPA destaca-se:

- 1- Avaliação de desempenho de simulações de impulsos atmosféricos utilizando a comparação entre o programa ATP e o programa PSpice;
- 2- Análise do efeito das capacitâncias parasitas em impulsos de tensão no Laboratório de Alta Tensão da UFPA;
- 3- Ensaio de impulso atmosférico em isoladores para diferentes arranjos não padronizados;
- 4- Influência de indutâncias parasitas nos ensaios de impulso atmosférico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL P. K.; CHANDAN, P. K.; KISHOR, N. K. Development of Virtual Impulse Laboratory, In: IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2006, Singapore.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 60060-1**: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaios. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 60060-2**: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Parte 2: Sistemas de medição. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5356-3**: Transformadores de Potência – Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5356-4**: Transformadores de Potência – Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6939**: Coordenação do isolamento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

BARRADAS, R. P. S.; NUNES, M. V. A.; TUMA, E. T. Simulação de um circuito Glaninger nos ensaios de impulso de tensão em transformadores de baixa indutância utilizando o programa ATP para o Laboratório de Alta Tensão da UFPA. In: IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 12., 2016, Curitiba.

BEZERRA, R. C. et al. **Avaliação dielétrica de equipamentos de alta tensão**. 2010. 116 f. Material didático do curso ministrado pelo Laboratório de ensaios dielétricos Lacen, Eletronorte, Eletrobrás, Belém, 2010.

CAGIDO, M. C. **Impulso Atmosférico em Laboratório – Aplicação, Medição e Interpretação**. 2014. 133 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

CARLETO, N. A Importância da Simulação Computacional em Projetos de Sistemas na Área de Engenharia Elétrica. In: Congresso Brasileiro De Sistemas, 2., 2006, Ribeirão Preto.

ESMERALDO, P. C. V.; FILHO, J. A.; FRONTIN, S. O. Estudos Básicos para especificação de equipamentos. In: FRONTIN, S. O. **Equipamentos de alta tensão**: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013. cap. 4, p. 168-173.

FESER, K. Circuit Design of Impulse Generators for the lightning impulse voltage testing of transformers. **Test Systems HAEFELY**, Bd. 68, 1977, Basel. 8 p.

GAMLIN, M.; RASTELLO, M. CR Damped capacitive impulse voltage divider. 2004. 36 f. Operating Instructions HAEFELY, Basel, 2004.

GAMLIN, M.; SCHWENK, K. Glan Glaninger Circuit for Testing Low Inductances. 2011. 65 f. Operating Instructions HAEFELY, Basel, 2011.

GAMLIN, M.; SCHWENK, K.; WOLF, J. Multiple Chopping Gap type MAFS. 2004. 27 f. Operating Instructions HAEFELY, Basel, 2004.

GAMLIN, M.; SCHWENK, K.; WOLF, J. Impulse voltage generator type SGV. 2010. 48 f. Operating Instructions HAEFELY, Basel, 2010.

HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. **High-Voltage Test and Measuring Techniques**. Dresden: Springer, 2014. 518 p.

KAMARUDIN, M. et al. Impulse Generator and Lightning Characteristics Simulation using Orcad PSpice Software. In: Engineering Conference on Sustainable Engineering Infrastructures Development & Management, 2., 2008, Kuching and Sarawak.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering Fundamentals**. 2nd ed. Great Britain: Newnes, 2000. 552 p.

NAIDU, N. S.; KAMARAJU, V. **High voltage engineering**. 2nd ed. New Delhi: Tata McGraw Hill, 2009. 392 p.

NAIR, P.; PACHORI, A. Design of impulse generators for different front and tail resistors in impulse voltage testing of power transformers. **International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering**, vol. 2, Issue 12, Dec. 2013.

RAI, V.; PANDEY, K.; WADHWA, K. Designing of Multistage impulse voltage generator using ATP software. In: International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), 2015, Noida.

RICKMANN, J.; WOLF, J. Charging Rectifier. 1998. 12 f. Operating Instructions HAEFELY, Basel, 1998.

ZHOU, J. Y.; BOGGS, S. A. Low Energy Single Stage High Voltage Impulse Generator. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 11, n. 4, Aug. 2004.

ZISCHANK, W. High-Voltage and High-current Testing. In: COORAY, V. **Lightning Protection**. United Kingdom: IET Power and Energy Series 58, 2010. Chapter 22, p. 950-952.