

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Gustavo Paiva Lopes

Avaliação do Comportamento Dielétrico de Isoladores de
Média Tensão Frente à Sobretensões Induzidas de Origem
Atmosférica

Itajubá, Março de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Gustavo Paiva Lopes

Avaliação do Comportamento Dielétrico de Isoladores de Média Tensão Frente à Sobretensões Induzidas de Origem Atmosférica

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia
Elétrica**

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez

Coorientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Itajubá, Março de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Jacqueline Balducci- CRB_6/1672

L864a

Lopes, Gustavo Paiva

Avaliação do comportamento dielétrico de isoladores de
média tensão frente à sobretensões induzidas de origem atmos-
férica / Gustavo Paiva Lopes. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

118 p. il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez.

Coorientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Formas impulsivas não padronizadas. 2. Método dos
acréscimos e decréscimos. 3. Tensão disruptiva crítica. 4. Isola-
dores dos tipos pino e pilar. 5. Sobretensões atmosféricas.

I. Martinez, Manuel Luis Barreira, orient. II. Wanderley Neto,
Estácio Tavares, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá.

IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Gustavo Paiva Lopes

Avaliação do Comportamento Dielétrico de Isoladores de Média Tensão Frente à Sobretensões Induzidas de Origem Atmosférica

**Dissertação aprovada por banca examinadora em 15 de
Março de 2013, conferindo ao autor o título de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Piantini

Prof. Dr. Credson de Salles

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto (Coorientador)

Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez (Orientador)

Itajubá, Março de 2013

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

Agradecimentos

A toda a equipe do LAT-EFEI Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, em especial aos professores Dr. Manuel Luis Barreira Martinez e Dr. Estácio Tavares W. Neto nos momentos de orientação na formação de conceitos, condução dos ensaios e revisão do texto. A todos os colaboradores que passaram centenas de horas operando o gerador de impulsos de tensão na execução dos ensaios em meio ao barulho ensurdecedor das descargas disruptivas nos isoladores, sacrificando momentos de descanso, finais de semana e feriados. Aos amigos, mestrandos e doutorandos que em muitas ocasiões contribuíram na elaboração do texto e participaram de forma essencial na análise dos resultados.

A equipe da AES Sul, responsável por fornecer os insumos materiais e financeiros para a execução do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento que, em parte, resultou neste trabalho.

“Se a ciência é filha da observação e da experiência, estes são, em verdade, os processos pelos quais principalmente ela deve ser ensinada”.

Theodomiro Carneiro Santiago (1882-1936)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a suportabilidade dielétrica de isoladores de porcelana, utilizados em redes aéreas distribuição de 15 e 25 kV, mediante formas impulsivas não padronizadas. Para este propósito, utiliza-se a tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$, como parâmetro de avaliação da suportabilidade mediante impulsos. A tensão $U_{50\%}$ é normalmente obtida para a forma padronizada 1,2 x 50 μ s, que tem como objetivo representar as solicitações impostas por sobretensões atmosféricas, originadas por descargas diretas nos condutores de fase ou nos cabos de blindagem de uma linha aérea. Por outro lado, as sobretensões induzidas devido a descargas atmosféricas indiretas não possuem forma típica, sendo suas características dependentes dos parâmetros da descarga, da topologia da rede, das características construtivas da linha e do solo. Desta forma, a fim de avaliar o efeito dos tempos de frente e cauda na tensão $U_{50\%}$, foram selecionadas 13 formas impulsivas não padronizadas, variando o tempo de frente de 0,5 a 10 μ s e o tempo de cauda de 5 a 50 μ s. Os isoladores foram ensaiados através do método dos acréscimos e decréscimos, nas condições a seco e sob chuva, bem como nas polaridades positiva e negativa. As comparações entre as tensões $U_{50\%}$ para formas não padronizadas e para a forma padrão 1,2 x 50 μ s permitem identificar a influência dos tempos de frente e cauda nos resultados. Os resultados mostram que a forma padrão é representativa de sobretensões com tempos de frente lentos¹ (2,9 a 10 μ s), confirmando sua utilização em ensaios dielétricos e estudos computacionais que envolvem descargas atmosféricas indiretas. Considerando a coordenação de isolamento, na qual a avaliação da suportabilidade dos isoladores nas condições a seco e sob chuva é necessária, os resultados mostram que a tensão $U_{50\%}$ para cada forma avaliada na condição a seco, polaridade positiva, é representativa das demais condições de ensaio. Neste caso, tem-se em geral, o menor nível de suportabilidade para os isoladores. Além disso, observa-se um aumento mais pronunciado da tensão $U_{50\%}$ para os isoladores do tipo pino considerando frentes rápidas e padronizadas, quando comparada com a tensão $U_{50\%}$ para a forma 1,2 x 50 μ s. Este aumento de suportabilidade indica não haver prejuízo para coordenação de isolamento em redes de distribuição que utilizam os isoladores ensaiados.

Palavras-chave: formas impulsivas não padronizadas, método dos acréscimos e decréscimos, tensão disruptiva crítica, isoladores do tipo pino e pilar, sobretensões atmosféricas.

¹ Refere-se à classificação dos tempos de frente adotada neste trabalho.

Abstract

This work aims at evaluating the lightning withstanding capability of 15 and 25 kV porcelain insulators designed for overhead distribution networks submitted to non-standard impulse shapes. For this purpose it is considered the use of the 50 % disruptive-discharge voltage or critical flashover voltage (CFO) as the evaluation parameter for lightning impulses. The CFO is usually determined for the standard impulse shape $1.2 \times 50 \mu\text{s}$, aiming at representing overvoltages originated by direct lightning strokes on line phase conductors or shield wires. On the other hand, induced overvoltages developed by nearby lightning do not have, at the present moment, any typical shape and it may vary according to the lightning discharge parameters, network topology, line construction and ground characteristics. In order to evaluate the effect of front and tail times on CFO, 13 non-standard impulse shapes were selected, varying the front time from 0.5 to 10 μs and tail time from 5 to 50 μs . The samples behavior were determined by the *up-and-down* method on dry and wet conditions, as well as positive and negative polarities. Comparisons among the CFO for non-standard shapes and its standard value $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ allow distinguishing the influence of front and tail times on the withstanding results. The results have shown that the standard lightning impulse shape $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ is representative of overvoltages with slow front times² (2.9 to 10 μs), assuring its application on dielectric tests and induced lightning studies. Considering insulation coordination, in which the evaluation of insulators performance on dry and mainly on wet conditions is necessary, the results show that the CFO under dry condition and positive polarity can be used to represent the other test conditions. For this condition the insulators present the lowest lightning withstanding values of performance. Therefore, just dry tests are necessary to define the lowest withstanding level of the tested insulators. Also, the results for fast and standard front times present a CFO increasing that was mainly observed on pin type insulators. This fact shows there is no loss of lightning performance of distribution networks submitted to these groups of impulse shapes.

Keywords: non-standard impulse shapes, up-and-down method, critical flashover voltage, pin type and post type insulators, lightning overvoltages.

² It refers to the front times classification adopted.

Lista de Figuras

Figura 1 – Processo simplificado de formação de uma descarga atmosférica nuvem-solo negativa até a ocorrência da primeira descarga de retorno. Adaptado de (7).	20
Figura 2 – a) Diagrama esquemático do processo de formação de uma descarga nuvem-solo negativa e tempos típicos envolvidos na ocorrência dos fenômenos. b) Representação da descarga observada através do olho humano. c) Representação da corrente na base do canal. Adaptado de (7,11).	21
Figura 3 – Processo simplificado de formação de uma descarga de retorno descendente positiva. a) Deslocamento da parte superior da nuvem. b) Cargas negativas induzidas nas partes elevadas. c) Descarga entre o centro de carga positivo na nuvem e torre carregada negativamente. Adaptado de (9, 11).	22
Figura 4 – Surtos de tensão e corrente em uma linha monofásica sem cabo de blindagem.	23
Figura 5 – Surtos de tensão e corrente em uma linha sem cabo de blindagem com ocorrência de <i>flashover</i> .	25
Figura 6 – Distorção do surto de tensão causado pelo efeito corona em uma linha de transmissão com 2.222 m. Adaptado de (15).	26
Figura 7 – a) Sobretensão obtida através de simulação em uma linha monofásica devido à descarga direta – medição a 600 m do ponto de incidência e $I_p = 30$ kA. Adaptado de (1). b) Idem ao anterior, porém não há informações sobre I_p . Adaptado de (16).	27
Figura 8 – Surtos de tensão e corrente em uma linha monofásica com cabo de blindagem.	29
Figura 9 – a) Tensão induzida no centro da linha – U_g . b) Tensões induzidas no início e no centro da linha, U_l e U_g , respectivamente (escala de tempo reduzida). $I_p = 23$ kA (descarga subsequente). Adaptado de (35).	33
Figura 10 – a) Tensão induzida no ponto mais próximo ao ponto de incidência da descarga e cálculo através do <i>Modelo de Rusck Extendido</i> para a linha monofásica – $I_p = 36$ kA. b) Idem ao item a), porém considerando linha trifásica com para-raios – $I_p = 54$ kA. Adaptado de (36).	33
Figura 11 – a) Tensão induzida no ponto <i>XI</i> e simulação através do modelo de <i>Agrawal et al.</i> para a linha monofásica – $I_p = 34$ kA. b) Configuração da linha utilizada nos experimentos e cálculos. Adaptado de (37).	34
Figura 12 – a) Tensão induzida no ponto <i>B</i> da linha devido a uma descarga a 3.000 m. b) Tensão induzida no ponto <i>A</i> , com a presença de para-raios, para uma descarga próxima ao centro da linha. Adaptado de (38).	35
Figura 13 – Formas de corrente de retorno descendentes médias registradas na Estação San Salvatore, Suíça. a) Primeira corrente de retorno negativa. b) Corrente de retorno negativa subsequente. c) Corrente de retorno positiva. Adaptado de (51).	37
Figura 14 – Influência dos fatores: a) Amplitude da corrente de descarga. b) Taxa de variação da corrente no tempo. c) Velocidade de propagação do surto de corrente no canal. Resultados obtidos através de simulação computacional utilizando do modelo de acoplamento <i>Agrawal et al.</i> Adaptado de (53).	38
Figura 15 – a) Vista superior da linha utilizada nas simulações. b) Tensões induzidas nas extremidades da linha considerando as alturas de 7, 5, 9 e 10,5 m, para $I_p = 12$ kA. Adaptado de (54).	39
Figura 16 – Tensões induzidas obtidas através de simulação na extremidade de uma linha de 1.000 m com $I_p = 12$ kA (descarga subsequente) a 50 m de seu centro, para $\sigma_g = \infty$ e $\sigma_g = 0,001$ S/m. Adaptado de (55).	40
Figura 17 – Tensões induzidas obtidas através de simulação em uma linha de 1.000 m com $I_p = 12$ kA (descarga subsequente) em 05 pontos ao redor da linha, para $\sigma_g = \infty$, $\sigma_g = 0,01$ S/m e $\sigma_g = 0,001$ S/m. Adaptado de (10).	42
Figura 18 – Configurações para a construção do gerador de impulsos. Adaptado de (59).	46
Figura 19 – Composição da tensão impulsiva através de função com dupla exponencial.	47
Figura 20 – Gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.	48
Figura 21 – Circuito completo do gerador de impulsos considerando a influência de R'_L , R_S e R_{div} .	49

Figura 22 – a) Vista geral do gerador de impulsos. b) Detalhe dos resistores R'_d e R'_e .	54
Figura 23 – a) Desenho representativo para os isoladores do tipo pino. b) Desenho representativo para os isoladores do tipo pilar.	58
Figura 24 – Exemplo de diagrama com o desenvolvimento do método dos níveis múltiplos. Adaptado de (63).	60
Figura 25 – Relação entre a probabilidade de disrupção e a tensão aplicada para diferentes níveis. Método dos Níveis Múltiplos. Adaptado de (63).	60
Figura 26 – Número de aplicações de tensão em função da frequência relativa e dos intervalos de confiança. O coeficiente de confiança é de 95 %. Adaptado de (63).	62
Figura 27 – a) Método das descargas sucessivas com elevação de tensão constante. b) Método das descargas sucessivas com elevação de tensão em passos Δu . Adaptado de (60).	63
Figura 28 – Exemplo de representação do método das descargas sucessivas utilizando tensão impulsiva. Adaptado de (63).	65
Figura 29 – Função de probabilidade acumulada. Método das Descargas Sucessivas. Adaptado de (63).	65
Figura 30 – Erro esperado para o valor médio em função de n_r e v . O coeficiente de confiança é de 95 %. Adaptado de (63).	66
Figura 31 – Probabilidade da primeira descarga disruptiva no método dos acréscimos e decréscimos. Adaptado de (63).	68
Figura 32 – a) Representação gráfica do método dos acréscimos e decréscimos. b) Avaliação do método. Adaptado de (63).	69
Figura 33 – Fator G para correção do desvio padrão amostral. Utilizar a linha cheia quando $\Delta u/\sigma$ for um número inteiro. Interpolair G entre a linha cheia e a linha fina em caso contrário. Adaptado de (65).	70
Figura 34 – Exemplo de aplicação do método dos acréscimos e decréscimos estendido para $M = 7$, que resulta na tensão $U_{10\%}$. Adaptado de (60).	73
Figura 35 – Função probabilidade de descarga disruptiva empírica para o método dos níveis múltiplos. Coeficiente de determinação $R^2 = 0,822$.	77
Figura 36 – Frequência acumulada de descargas disruptivas para o método das descargas sucessivas. Coeficiente de determinação $R^2 = 0,956$.	79
Figura 37 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 15 kV – Gráfico de linhas.	85
Figura 38 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 15 kV – Gráfico de barras.	85
Figura 39 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 25 kV – Gráfico de linhas.	86
Figura 40 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 25 kV – Gráfico de barras.	86
Figura 41 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 15 kV – Gráfico de linhas.	87
Figura 42 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 15 kV – Gráfico de barras.	87
Figura 43 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 25 kV – Gráfico de linhas.	88
Figura 44 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 25 kV – Gráfico de barras.	88
Figura 45 – Gerador de impulsos modelado no ATPDraw para forma padrão 1,2 x 50 μ s.	106
Figura 46 – Diagrama de ensaio para o método dos níveis múltiplos. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	108
Figura 47 – Diagrama de ensaio para o método das descargas sucessivas. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	109

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros principais do gerador de impulsos.	49
Tabela 2 – Formas não padronizadas iniciais e forma padrão.	50
Tabela 3 – Formas impulsivas consideradas. Obtenção dos resistores R_1 e R_2 através de simulação computacional, utilizando o código de programação apresentado no ANEXO A.	51
Tabela 4 – Formas impulsivas. Avaliação dos resistores R'_d e R'_e através de simulação computacional, utilizando o ATPDraw (ANEXO B).	51
Tabela 5 – Elevação de temperatura nos resistores R'_d e R'_e	53
Tabela 6 – Sobre-elevação relativa e tensão efetiva aplicada no isolamento.	54
Tabela 7 – Resumo dos parâmetros de ensaio e resultados – método dos níveis múltiplos. Adaptado de (63).	60
Tabela 8 – Resumo dos principais parâmetros de ensaio – método das descargas sucessivas. Adaptado de (63).	65
Tabela 9 – Desenvolvimento do método dos acréscimos e decréscimos padronizado.	71
Tabela 10 – Resultados do ensaio utilizando o método dos níveis múltiplos. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	77
Tabela 11 – Resultados do ensaio utilizando o método das descargas sucessivas. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	78
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros para o método dos acréscimos e decréscimos original. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	79
Tabela 13 – Resumo dos parâmetros para o método dos acréscimos e decréscimos padronizado. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	80
Tabela 14 – Resultados da avaliação através do método dos acréscimos e decréscimos utilizando a Distribuição de Weibull. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.	81
Tabela 15 – Resumo dos resultados e comparação dos métodos.	81
Tabela 16 – Condições de precipitação padronizadas (60).	84
Tabela 17 – Tensão $U_{50\%}$ média para as formas 1,2 x 50 μ s a 10 x 50 μ s. Isolador tipo pino classe 15 kV.	90
Tabela 18 – Tensão $U_{50\%}$ média para as formas 1,2 x 50 μ s a 10 x 50 μ s. Isolador tipo pino classe 25 kV.	91
Tabela 19 – Tensão $U_{50\%}$ média para o Isolador tipo pilar classe 15 kV.	92
Tabela 20 – Tensão $U_{50\%}$ média para o Isolador tipo pilar classe 25 kV.	93
Tabela 21 – Resultados das Simulações x Ensaio para a Determinação das Formas Impulsivas.	107
Tabela 22 – Diagrama de ensaio para o método dos acréscimos e decréscimos. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Ensaio realizado a seco na polaridade positiva.	110
Tabela 23 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pino Classe 15 kV.	111
Tabela 24 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pino Classe 25 kV.	112
Tabela 25 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pilar Classe 15 kV.	113
Tabela 26 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pilar Classe 25 kV.	114

Lista de Abreviaturas e Siglas

LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.
EMTP	Electromagnetic Transients Program.
LRC	Lightning Research Center – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas.
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais.
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais.
RC	Circuito elétrico de primeira ordem formado por capacitores e resistores.
t_{fdes}	Variável que contém o tempo de frente desejado.
t_{cdes}	Variável que contém o tempo de cauda desejado.
t_{ol}	Tolerância admitida no cálculo dos tempos de frente e cauda.
R_{1min}	Valor mínimo admitido para o cálculo da resistência de frente.
R_{1max}	Valor máximo admitido para o cálculo da resistência de frente.
R_{2min}	Valor mínimo admitido para o cálculo da resistência de cauda.
R_{2max}	Valor máximo admitido para o cálculo da resistência de cauda.
ATPDraw	Alternative Transients Program.
LIOV-EMTP	Lightning Induced Overvoltage Code.
TSI	Tensão suportável de impulso atmosférico.
NBI	Nível Básico de Isolamento.
CFO	Critical Flashover Voltage.
IAE	Impulso Atmosférico Escalonado.

Lista de Símbolos

$U_{50\%}$	Tensão disruptiva crítica.
U_d	Valor de pico do surto de tensão originado através de descarga direta.
I_p	Valor de pico da corrente de retorno.
Z_s	Impedância de surto da linha.
L	Indutância por unidade de comprimento.
C	Capacitância por unidade de comprimento.
Z_{estr}	Impedância de surto da estrutura – poste ou torre.
Z_{aterr}	Impedância de aterramento.
U_{d1}	Valor de pico do surto de tensão refletido no topo da estrutura.
U_{d2}	Valor de pico do surto de tensão refratado em direção à próxima estrutura.
U_e	Valor de pico do surto de tensão refratado em direção à base da estrutura.
Z_{blind}	Impedância de surto do cabo de blindagem.
τ	Tempo de trânsito do surto de tensão na estrutura – poste ou torre.
$t_{f50\%}$	Valor mediano do tempo de frente.
$t_{c50\%}$	Valor mediano do tempo de cauda.
t_f	Tempo de frente.
t_c	Tempo de cauda.
σ_g	Condutividade do solo.
C_1	Capacitor de carga do gerador de impulsos de tensão.
C_2	Capacitor de descarga (surto) do gerador de impulsos de tensão.
R_1	Resistor de frente do gerador de impulsos de tensão.
R_2	Resistor de cauda do gerador de impulsos de tensão.
S_G	Centelhador do gerador de impulsos de tensão.
U_0	Tensão contínua de carga do gerador de impulsos de tensão.
$U(t)$	Tensão impulsiva em função do tempo.
A_1	Constante de tempo responsável pela cauda do impulso.
A_2	Constante de tempo responsável pela frente do impulso.
t	Tempo.
$t_{máx}$	Instante de tempo correspondente ao valor de pico da forma impulsiva.
$U_{máx}$	Valor de pico da forma impulsiva.
R'_{L1} a R'_{L6}	Resistores de carga – gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.
R'_{d1} a R'_{d6}	Resistores de frente internos – gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.

R'_{e1} a R'_{e6}	Resistores de cauda – gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.
R_S	Resistor de frente externo – gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.
R_{div}	Resistência total do divisor de tensão.
C'_{s1} a C'_{s6}	Capacitores de carga – gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.
C_b	Capacitor de descarga (surto) – gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.
U_T	Tensão de carga total considerando o número de estágios.
Q	Energia dissipada nos resistores do gerador de impulsos de tensão.
m	Massa total do fio de Níquel-Cromo.
c	Calor específico da liga Níquel-Cromo.
ΔT	Elevação de Temperatura.
n_m	Número de aplicações de tensão em um determinado nível i para o método dos níveis múltiplos.
u_i	Valor de crista da tensão impulsiva no nível i .
m	Número de níveis de tensão no método dos níveis múltiplos.
Δu	Passo de tensão utilizado nos ensaios para determinação da suportabilidade dielétrica.
k_i	Número de descargas disruptivas no nível i .
f_i	Probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva no nível i .
z	Número total de aplicações de tensão no método dos níveis múltiplos.
Δt	Intervalo de tempo entre aplicações de tensão consecutivas.
$u_{máx}$	Nível de tensão máximo a ser aplicado no isolamento.
$u_{mín}$	Nível de tensão mínimo a ser aplicado no isolamento.
Δu_R	Diferença entre os limites de tensão $u_{máx}$ e $u_{mín}$.
Δu_P	Passo de tensão ajustado no gerador de impulsos de tensão.
m_T	Número máximo e níveis de tensão.
Δp	Erro na probabilidade de descarga disruptiva.
n_r	Número de aplicações de tensão em para o método das descargas sucessivas.
Δt_s	Intervalo de tempo no qual a tensão é mantida constante no isolamento.
Δt_p	Intervalo de tempo entre as aplicações de tensão no método das descargas sucessivas.
v_u	Taxa de crescimento da tensão contínua ou alternada no ensaio das descargas sucessivas.
u_0	Tensão inicial de ensaio no método das descargas sucessivas.
h_k	Frequência relativa para o método das descargas sucessivas.
$h_{\Sigma k}$	Frequência acumulada para o método das descargas sucessivas.

h_{mk}	Frequência absoluta para o método das descargas sucessivas.
k	Número de descargas disruptivas no método das descargas sucessivas.
v	Coefficiente de variação – relação entre o desvio padrão e o valor médio.
σ	Desvio padrão.
u_n	Tensão na qual ocorre a descarga disruptiva – métodos das descargas sucessivas.
$U_{10\%}, U_{90\%}$	Tensão na qual há 10 % e 90 % de probabilidade de ocorrer uma descarga disruptiva, respectivamente.
u_{00}	Tensão inicial de ensaio para o método dos acréscimos e decréscimos.
u_{d1}	Nível de tensão no qual ocorre a primeira descarga disruptiva.
$u_{d50}^{(*)}$	Estimativa da tensão $U_{50\%}$ para o método dos acréscimos e decréscimos original.
$s^{(*)}$	Estimativa do desvio padrão σ para o método dos acréscimos e decréscimos original.
n_u	Número total de aplicações de tensão no método dos acréscimos e decréscimos.
k_u	Número de ocorrências do evento mais raro no método dos acréscimos e decréscimos original.
q_u	Número complementar de k_u em relação a n_u .
r	Número de níveis, excluindo o nível com índice $i = 0$.
k_{ui}	Número de ocorrências do evento mais raro no nível i .
s_m	Desvio padrão amostral.
G	Fator de correção do desvio padrão amostral.
s_{mc}	Desvio padrão amostral corrigido.
$u_{d50,min,máx}$	Intervalo de confiança da tensão $u_{d50\%}^{(*)}$.
N	Número total de níveis de tensão no método dos acréscimos e decréscimos.
M	Número de aplicações consecutivas em um mesmo nível de tensão.
$P(U)$	Probabilidade de ocorrência da descarga disruptiva no isolamento em função da tensão.
$P(X)$	Função distribuição de Weibull na sua forma original.
X	Variável aleatória qualquer.
δ	Parâmetro de posição da Distribuição de Weibull.
α	Parâmetro de escala da Distribuição de Weibull.
β	Parâmetro de forma da Distribuição de Weibull.
n_d	Número de desvios padrão utilizado para truncar a função $P(U)$.
L_v	Função de verossimilhança.
R^2	Coefficiente de determinação.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Visão Geral	13
1.2	Relevância do Tema.....	15
1.3	Objetivo	15
1.4	Estrutura.....	16
2	Sobretensões de Origem Atmosférica.....	17
2.1	Definições	17
2.2	Descrição do Fenômeno.....	19
2.3	Descargas Atmosféricas Diretas	22
2.3.1	Ruptura de Isolamento através de “Flashover”	24
2.3.2	Ruptura de Isolamento através de “Back-Flashover”	27
2.4	Descargas Atmosféricas Indiretas.....	30
2.4.1	Influência dos Parâmetros da Descarga	36
2.4.2	Influência das Características Construtivas da Linha e do Solo	38
2.4.3	Influência do Ponto de Incidência da Descarga	41
2.5	Considerações Finais	42
3	Formas de Tensão Não Padronizadas	44
3.1	Definições	45
3.2	Geração de Tensões Impulsivas Não Padronizadas.....	45
3.3	Fabricação dos Resistores e Ensaios.....	52
3.4	Considerações Finais	54
4	Avaliação da Suportabilidade Dielétrica	56
4.1	Definições	57
4.2	Amostras Ensaçadas	57
4.3	Método dos Níveis Múltiplos (Multiple Level Test)	58
4.4	Método das Descargas Sucessivas (Rising-Voltage Test).....	63
4.5	Método dos Acréscimos e Decréscimos (Up-and-Down Test).....	67
4.5.1	Procedimento de Avaliação Original	68
4.5.2	Procedimento de Avaliação Padronizado.....	71

4.5.3	Procedimento de Avaliação Através da Distribuição de Weibull.....	73
4.6	Comparação dos Métodos.....	76
4.7	Garantindo Independência nos Ensaios	82
5	Resultados dos Ensaios e Análises	84
5.1	Resultados - Isolador do Tipo Pino Classe 15 kV	85
5.2	Resultados - Isolador do Tipo Pino Classe 25 kV	86
5.3	Resultados - Isolador do Tipo Pilar Classe 15 kV	87
5.4	Resultados - Isolador do Tipo Pilar Classe 25 kV	88
5.5	Análises.....	89
5.5.1	Isolador Tipo Pino Classe 15 kV	89
5.5.2	Isolador Tipo Pino Classe 25 kV	90
5.5.3	Isolador Tipo Pilar Classe 15 kV	91
5.5.4	Isolador Tipo Pilar Classe 25 kV	92
5.6	Considerações Finais	93
6	Conclusões.....	95
6.1	Publicações na Área e Correlatas.....	96
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	98
7	Referências.....	99
	ANEXO A – Código do Programa para a Estimativa das Resistências R_1 e R_2.	104
	ANEXO B – Gerador de Impulsos Modelado no ATPDraw.....	106
	ANEXO C – Determinação das Formas Impulsivas – Simulações x Ensaios.....	107
	ANEXO D – Diagrama de Ensaio para o Método dos Níveis Múltiplos.	108
	ANEXO E – Diagrama de Ensaio para o Método das Descargas Sucessivas.	109
	ANEXO F – Diagrama de Ensaio para o Método dos Acréscimos e Decréscimos.....	110
	ANEXO G – Resultados dos Ensaios para Determinação da Tensão $U_{50\%}$.....	111
	ANEXO H – Oscilogramas de Tensão – Cauda e Frente.....	115

1 Introdução

1.1 Visão Geral

Os sistemas elétricos são constantemente submetidos aos efeitos de transitórios eletromagnéticos, sendo mais comuns os transitórios de origem atmosférica e de manobra (1). As solicitações transitórias de tensão são classificadas de acordo com sua forma, tempo de frente e frequência de oscilação, resultando em três categorias: transitórios com frente lenta, rápida e muito rápida (2). As sobretensões de origem atmosférica enquadram-se nos transitórios de frente rápida, com tempo de frente típicos entre 0,1 e 20 μs ³. Os transitórios de frente rápida são determinantes no dimensionamento dos sistemas com tensão de operação até 230 kV, englobando os níveis de distribuição e o início da transmissão. Este fato se deve basicamente às distâncias de isolamento utilizadas nesta faixa de tensão. Por outro lado, os sistemas de transmissão a partir de 230 kV envolvem linhas de comprimento elevado e perdas por efeito Joule reduzidas nos condutores, tornando as solicitações de frente lenta (sobretensões de manobra) predominantes no dimensionamento do isolamento (3).

De forma geral as linhas de distribuição ou transmissão constituem no elemento do sistema mais susceptível à incidência de descargas atmosféricas (diretas ou indiretas) devido às grandes extensões envolvidas e sua disposição em relação ao solo – altura dos condutores e estruturas. As descargas diretas são caracterizadas pela incidência nas linhas ou subestações, através dos condutores de fase, cabos de blindagem ou topo das estruturas. Já as descargas indiretas incidem nas proximidades do sistema elétrico, conduzindo a corrente de retorno através de estruturas elevadas, como torres de comunicação, edifícios, árvores ou montanhas. Considerando os efeitos que estas descargas podem causar no sistema elétrico, tem-se que as descargas diretas apresentam menor probabilidade de ocorrência e níveis mais elevados de sobretensões, frequentemente acompanhados de danos aos equipamentos conectados no sistema e disrupções no isolamento das linhas. As descargas indiretas ocorrem com maior frequência, induzindo tensões com amplitudes reduzidas quando comparadas com as descargas diretas.

No final da década de 1920, pesquisadores iniciaram medições em linhas de transmissão nos Estados Unidos, registrando a amplitude e a forma dos surtos de tensão

³ Os tempos de frente típicos referem-se à classificação adotada na norma internacional IEC 60071-1 (2), não devendo ser confundida com a classificação dos tempos de frente para as formas impulsivas utilizadas neste trabalho.

quando da ocorrência de descargas diretas (4). Com o desenvolvimento das pesquisas nesta área, surgiu a necessidade de realizar ensaios com o objetivo de reproduzir as solicitações dielétricas impostas pelas descargas atmosféricas, avaliando desta forma a suportabilidade dos equipamentos. Desde então, os diversos equipamentos e elementos que compõem os sistemas elétricos são submetidos ao *Ensaio de Tensão Suportável Nominal a Impulso Atmosférico*, com forma padrão 1,2 μ s de tempo de frente e 50 μ s de tempo de cauda. Porém, esta forma impulsiva dificilmente é observada quando da incidência de descargas atmosféricas indiretas. Este tipo de descarga resulta em sobretensões induzidas com forma bastante diferenciada do padrão, afetadas principalmente pelas características da corrente de retorno, características construtivas da linha, local de incidência da descarga e características do solo.

A suportabilidade dielétrica a impulsos atmosféricos de cada componente do sistema é função da amplitude e forma de tensão à qual este é submetido. Por este motivo são utilizados nos ensaios de tensão suportável de impulso atmosférico, níveis de tensão e forma padronizados. Cada tipo de isolamento pode apresentar um comportamento diferente quando submetido ao ensaio de impulso com formas diferentes da padronizada, traduzido em um aumento ou redução de sua suportabilidade. Neste aspecto, a avaliação da suportabilidade utilizando formas de tensão não padronizadas é válida, pois fornece parâmetros para a avaliação dos equipamentos quando estes estiverem operando e sendo solicitados por tensões induzidas (5).

Os parâmetros utilizados na avaliação dos isolamentos auto-recuperantes, tal como os isoladores, consistem na *tensão disruptiva crítica* – $U_{50\%}$ e na característica *tensão x tempo de disrupção* – *Curva $V \times t$* . Com base nestes parâmetros é possível avaliar como a suportabilidade de um isolamento é afetada pela alteração dos tempos de frente e cauda para uma dada forma de tensão impulsiva. A alteração da característica $V \times t$ de um isolador, por exemplo, pode influenciar diretamente na margem de segurança da coordenação de isolamento, adotada no projeto de uma linha de distribuição. Já a tensão $U_{50\%}$ é utilizada na determinação do risco de falha de um sistema mediante a incidência de descargas atmosféricas. Estes parâmetros ainda permitem elaborar o modelo matemático, denominado *modelo do efeito disruptivo*, que descreve o comportamento de um isolamento auto-recuperante para qualquer forma impulsiva, avaliando o tempo de disrupção para um valor de tensão impulsiva aplicada.

1.2 Relevância do Tema

As sobretensões induzidas em linhas aéreas de distribuição podem causar danos aos equipamentos e componentes que operam em média tensão⁴, tais como transformadores de potência, transformadores de medição, chaves seccionadoras, chaves fusíveis, isoladores, etc. Adicionalmente, as redes de comunicações e de baixa tensão, onde se encontram os usuários residenciais, também estão submetidas aos efeitos das sobretensões induzidas. Apesar dos níveis de sobretensão induzida serem reduzidos, a probabilidade de ocorrência das descargas indiretas é superior quando comparada às descargas diretas, contribuindo de forma significativa na taxa de desligamentos e afundamentos de tensão, reduzindo desta forma a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

O aumento da confiabilidade dos sistemas de distribuição e da qualidade no fornecimento de energia elétrica constituem nos principais fatores que despertam o interesse no desenvolvimento de modelos computacionais cada vez mais elaborados, a fim de estimar os níveis de sobretensão induzida com maior precisão. A evolução constante destes modelos, desperta a necessidade de avaliar a suportabilidade dielétrica dos isolamentos auto-recuperantes presentes nas redes de distribuição, quando submetidos às solicitações dielétricas impostas pelas sobretensões induzidas.

Por fim, o conhecimento do comportamento dielétrico destes elementos permite elaborar modelos matemáticos que o representem de forma mais real possível, ampliando o conhecimento acumulado até o presente momento e servindo de base para a concepção e projeto de novas redes de distribuição sob o ponto de vista da coordenação de isolamento.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a suportabilidade dielétrica de isoladores de distribuição dos tipos pino e pilar de porcelana para as classes de tensão de 15 e 25 kV, quando submetidos a impulsos de tensão com forma não padronizada. A avaliação da suportabilidade é realizada através da determinação da *tensão disruptiva crítica* – $U_{50\%}$ para as polaridades positiva e negativa, nas condições a seco e sob chuva. São consideradas 13 formas impulsivas não padronizadas, além da forma padrão 1,2 x 50 μ s.

⁴ Compreende nas tensões de operação de 1,0 a 36,2 kV.

1.4 Estrutura

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O *Capítulo 1 – Introdução* consiste na apresentação do tema, objetivos e etapas seguidas. O *Capítulo 2 – Sobreensões de Origem Atmosférica* apresenta de forma resumida o fenômeno das descargas atmosféricas, classificando os tipos existentes e relacionando os impactos no sistema elétrico. São apresentados os fatores que influenciam na amplitude e forma dos surtos de tensão quando da ocorrência de descargas atmosféricas diretas e indiretas. No *Capítulo 3 – Formas de Tensão Não Padronizadas* é proposto um conjunto de formas não padronizadas para a avaliação dos isoladores de distribuição. As formas possíveis de serem reproduzidas no gerador de impulsos do Laboratório de Alta Tensão LAT-EFEI são então identificadas. Este capítulo também apresenta os procedimentos utilizados na construção e ensaio dos resistores de alta tensão, necessários à composição das formas desejadas. O *Capítulo 4 – Avaliação da Suportabilidade Dielétrica* apresenta os métodos normalmente utilizados na avaliação da suportabilidade dielétrica frente a impulsos. O método dos acréscimos e decréscimos (*up-and-down*) é escolhido devido a sua simplicidade e confiabilidade na determinação do parâmetro de interesse. O *Capítulo 5 – Resultados dos Ensaio e Análises* apresenta os resultados dos ensaios para a determinação da tensão $U_{50\%}$, desvio padrão e seus respectivos intervalos de confiança, considerando os 04 (quatro) tipos de isoladores ensaiados e as 13 formas não padronizadas, além da forma padrão 1,2 x 50 μ s. Adicionalmente, são apresentadas as avaliações do comportamento dielétrico de cada isolador. O *Capítulo 6 – Conclusões* traz um resumo qualitativo dos resultados obtidos e apresenta as contribuições do trabalho para os estudos de tensões induzidas em redes de distribuição, bem como as propostas de trabalhos futuros.

2 Sobretensões de Origem Atmosférica

A descarga atmosférica consiste em um fenômeno aleatório composto por uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera, caracterizada por um fluxo de corrente impulsivo de alta intensidade e curta duração. De acordo com sua incidência nos sistemas elétricos, as descargas atmosféricas são divididas em dois tipos: diretas ou indiretas. Define-se como descarga atmosférica direta aquela que incide sobre os componentes do sistema elétrico (linhas ou subestações), originando sobretensões de elevada intensidade. Esta pode causar danos severos aos equipamentos e, para os sistemas de média tensão, é um fenômeno com menor probabilidade de ocorrência. Por outro lado, as descargas atmosféricas indiretas (ou próximas) são mais frequentes, ocorrendo nas proximidades do sistema e induzindo sobretensões através do acoplamento eletromagnético. Estas por sua vez originam sobretensões de menor intensidade quando comparadas com as sobretensões originadas por descargas diretas, perdendo importância em sistemas de alta e extra-alta tensão.

O estudo das sobretensões de origem atmosférica nos sistemas de distribuição em média tensão é de grande importância, dado que estes são mais vulneráveis os efeitos das descargas atmosféricas (diretas ou indiretas) devido ao nível de isolamento reduzido, quando comparado aos sistemas de transmissão. Adicionalmente, estas sobretensões podem gerar solicitações intensas nos sistemas de baixa tensão, onde se encontram os consumidores residenciais.

Neste capítulo são apresentadas, de forma resumida, as características e os parâmetros principais das descargas atmosféricas diretas e indiretas, relacionando os fatores que influenciam na intensidade e na forma das sobretensões. O objetivo deste capítulo não consiste em discutir os detalhes inerentes a cada tipo de descarga, e sim identificar os fatores que influenciam na forma impulsiva das sobretensões. As formas impulsivas representativas de sobretensões induzidas são reproduzidas em laboratório através do gerador de impulsos de tensão (Gerador de Marx) a fim de avaliar o comportamento dielétrico de isoladores de distribuição.

2.1 Definições

A seguir são definidos os termos considerados importantes no entendimento deste capítulo.

- *Descarga atmosférica*: fenômeno aleatório composto por uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera, caracterizada por um fluxo de corrente impulsivo de alta intensidade e curta duração.
- *Descarga atmosférica direta*: consiste na descarga atmosférica que incide sobre os condutores ou estruturas das linhas de transmissão e distribuição, bem como sobre as subestações.
- *Descarga atmosférica indireta*: consiste na descarga atmosférica que incide nas proximidades dos sistemas elétricos – linhas de transmissão e distribuição ou subestações.
- *Média tensão*: compreende nas tensões de operação de 1,0 a 36,2 kV (6).
- *Sobretensões*: termo utilizado para designar tensões cujo valor de crista excede a tensão máxima de um sistema ou equipamento, seja esta fase-fase ou fase-terra.
- *Sobretensões atmosféricas*: sobretensões originadas nos sistemas elétricos devido a descargas atmosféricas diretas ou indiretas.
- *Isolamento*: conjunto de propriedades adquiridas por um equipamento ou material condutor, decorrentes de sua isolação. O isolamento está geralmente associado a um nível de suportabilidade dielétrica.
- *Descarga disruptiva*: falha no isolamento devido à sollicitação dielétrica, conectando um terminal energizado a um ponto de aterramento.
- *Ensaio de tensão suportável nominal a impulso atmosférico*: ensaio destinado a comprovar a suportabilidade dielétrica do objeto sob ensaio, no qual não deve ocorrer descarga disruptiva.
- *Tensão disruptiva crítica*: valor de tensão que resulta em 50 % de probabilidade de produzir uma descarga disruptiva no isolamento ensaiado.
- *Flashover*: descarga disruptiva que ocorre sobre a superfície de um dielétrico em um meio gasoso ou líquido. Neste trabalho o termo *flashover* é utilizado para descrever o mecanismo de ruptura do isolamento de uma linha de transmissão ou distribuição devido à incidência de uma descarga atmosférica.
- *Back-flashover*: mecanismo de ruptura do isolamento de uma linha de transmissão ou distribuição devido à descarga atmosférica direta no cabo de blindagem ou na estrutura.

- *Coordenação de isolamento*: consiste na seleção do isolamento de um sistema elétrico levando em consideração os níveis de sobretensões esperados, a fim de obter um risco aceitável de falha.
- *Origem virtual*: ponto de intersecção no eixo das abscissas correspondente a reta que une os pontos relativos a 30 % e 90 % da amplitude do impulso.
- *Tempo de frente*: parâmetro virtual correspondente a 1,67 vezes o intervalo de tempo entre os instantes nos quais a amplitude do impulso assume 30 % e 90 % do valor de crista.
- *Tempo de cauda*: parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a amplitude do impulso é reduzida para 50 % do valor de crista.

2.2 Descrição do Fenômeno

As descargas atmosféricas são classificadas de acordo com o trajeto que percorrem, desenvolvendo-se no interior de uma nuvem, entre nuvens, entre uma nuvem e o solo e entre uma nuvem para algum ponto na atmosfera. Neste item são apresentados de forma simplificada os mecanismos para o estabelecimento das descargas atmosféricas nuvem-solo, dado que este tipo de descarga é capaz de danificar e interferir diretamente na operação dos sistemas elétricos e seus equipamentos. As descargas atmosféricas nuvem-solo podem originar-se em ambos os meios, para as polaridades positiva e negativa. Primeiramente é considerado o mecanismo para a ocorrência de descargas atmosféricas descendentes negativas. Estas descargas transferem cargas negativas da nuvem para o solo, constituindo em 90 % do total de descargas nuvem-solo (7, 8). Considere a Figura 1 para a análise deste tipo de descarga.

Através de processos de eletrificação e separação de cargas elétricas, uma região intermediária próxima à base da nuvem fica fortemente carregada com cargas elétricas negativas, induzindo no solo uma distribuição de cargas elétricas positivas de mesma intensidade. As distribuições de cargas na nuvem e no solo originam campos elétricos intensos, principalmente nas regiões próximas ao solo e na base nuvem. Na medida em a rigidez dielétrica do meio isolante próximo à base da nuvem é superada, ocorrem processos físicos associados à liberação de elétrons das camadas externas dos átomos que compõem o meio, originando uma descarga elétrica que se inicia no interior da nuvem e se prolonga para

fora desta (formação do canal precursor de descarga – *stepped leader*). Neste instante ocorre a formação de um canal ionizado, que possui características condutoras e armazena uma grande quantidade de cargas negativas, provenientes da nuvem. Este acúmulo de cargas promove um aumento do campo elétrico na extremidade do canal, gerando descargas consecutivas que avançam em direção ao solo em passos discretos, semelhantes à descarga inicial. O canal ionizado possui ramificações, sendo alimentado com cargas negativas provenientes de outras regiões internas à nuvem. Na medida em que o canal descendente se aproxima do solo, ocorre um aumento da densidade de cargas positivas neste, principalmente em estruturas elevadas ou pontiagudas, como torres, linhas de transmissão, árvores ou edifícios. Quando o canal descendente alcança distâncias de algumas centenas de metros da superfície do solo, a intensidade do campo elétrico origina um ou mais canais ascendentes que avançam na direção do canal descendente. Para valores de comprimento menores que a distância crítica entre os canais ascendente e descendente, ocorre a conexão destes através de uma descarga final. Neste instante é estabelecido um fluxo de corrente de alta intensidade, denominado corrente de retorno, que se propaga ao longo do canal, neutralizando as cargas acumuladas, em outras palavras, transportando as cargas negativas acumuladas no canal para o solo (9, 10).

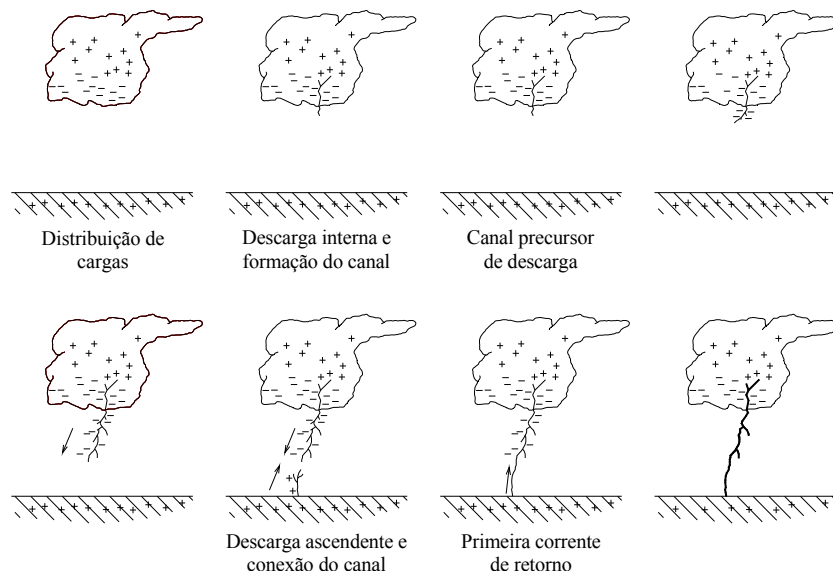


Figura 1 – Processo simplificado de formação de uma descarga atmosférica nuvem-solo negativa até a ocorrência da primeira descarga de retorno. Adaptado de (7).

Em torno de 80 % (8, 9) das descargas atmosféricas nuvem-solo negativas apresentam a formação de descargas subsequentes no canal ionizado após a extinção da corrente de retorno. Estas descargas são alimentadas por outros centros de carga negativa presentes na nuvem, próximos ao local onde o canal foi originado. Estes centros de carga passam a suprir

cargas negativas para o canal previamente ionizado através de uma corrente de intensidade reduzida denominada *dart leader*. A descarga subsequente ocorre após o novo carregamento do canal, transferindo a carga negativa deste para o solo. Este processo pode se repetir sucessivamente, sendo mais comum a ocorrência de três descargas subsequentes (9). Geralmente as descargas subsequentes apresentam amplitudes inferiores e tempos de frente mais rápidos quando comparados com a primeira descarga de retorno. Quando o canal é percorrido pela descarga subsequente, esta o encontra pré-ionizado, contribuindo para a redução de sua impedância e afetando o tempo de frente do surto de corrente (9).

As correntes impulsivas subsequentes são geralmente acompanhadas por uma componente de corrente contínua que possui amplitudes da ordem de algumas dezenas a centenas de ampères e duração máxima de centenas de milissegundos (7). A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático que descreve a ocorrência de uma descarga atmosférica descendente com uma corrente de retorno principal e duas correntes subsequentes. São apresentados também os tempos típicos para o processo de formação destas correntes.

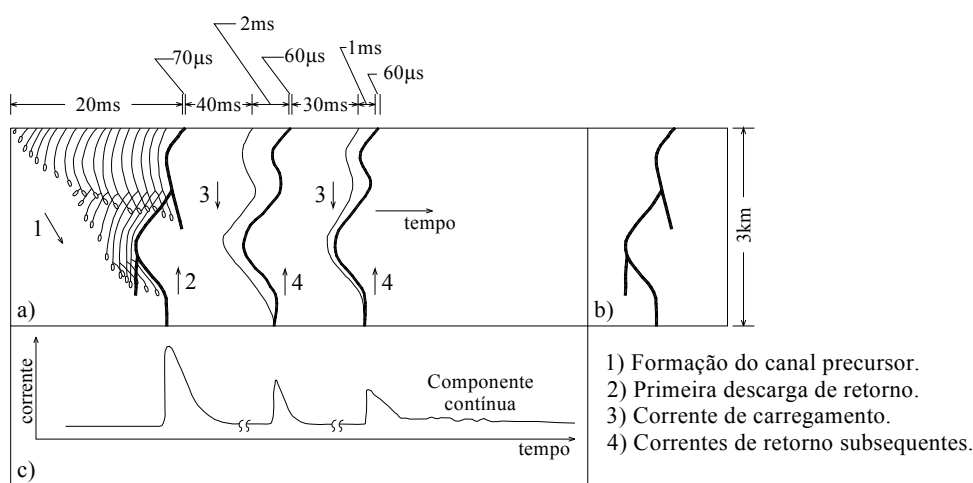


Figura 2 – a) Diagrama esquemático do processo de formação de uma descarga nuvem-solo negativa e tempos típicos envolvidos na ocorrência dos fenômenos. b) Representação da descarga observada através do olho humano. c) Representação da corrente na base do canal. Adaptado de (7, 11).

Analogamente às descargas nuvem-solo negativas, as descargas nuvem-solo positivas descendentes tem origem no centro de carga positivo localizado na parte superior da nuvem. Este tipo de descarga constitui algo em torno de 10 % das descargas nuvem-solo (7). A região superior da nuvem na qual se concentra o centro de carga positiva possui comportamento dinâmico, influenciada pelos ventos que deslocam a nuvem. Em alguns casos ocorre o deslocamento da parte superior, removendo a blindagem que as cargas negativas promovem nas cargas positivas em relação ao solo (8). Quando da existência de estruturas elevadas no

solo, como edifícios, torres ou montanhas, podem ocorrer descargas com a “transferência” de cargas positivas para a terra. O processo de formação de uma descarga descendente positiva, apresentado na Figura 3, ocorre de forma semelhante ao processo apresentado para a descarga negativa, porém este tipo raramente apresenta descargas subsequentes (7). As características necessárias para a ocorrência deste tipo de descarga a tornam mais rara do que as descargas negativas, apresentando maiores amplitudes de corrente e de carga transferida ao solo, bem como tempos de frente e cauda mais elevados. Considerando as descargas positivas, cabe ressaltar que as cargas positivas que se deslocam em direção ao solo, na realidade constituem no deslocamento de elétrons para a nuvem.

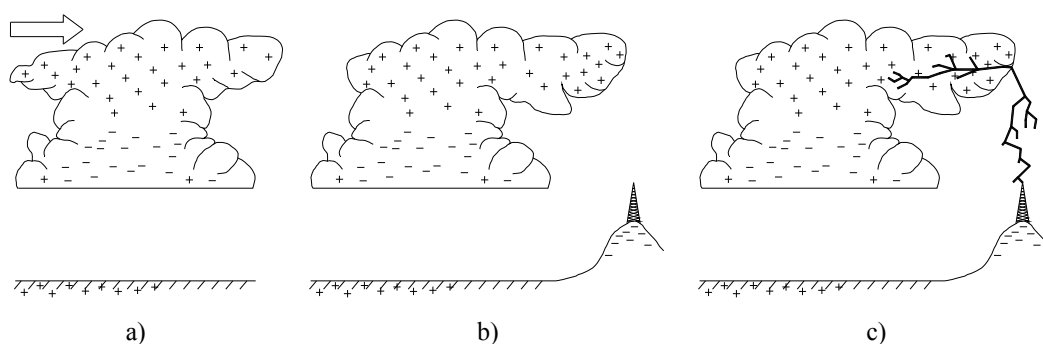


Figura 3 – Processo simplificado de formação de uma descarga de retorno descendente positiva. a) Deslocamento da parte superior da nuvem. b) Cargas negativas induzidas nas partes elevadas. c) Descarga entre o centro de carga positivo na nuvem e torre carregada negativamente. Adaptado de (9, 11).

Para um grau de detalhamento maior com relação aos processos de eletrificação das nuvens e com relação aos mecanismos de ocorrência das descargas atmosféricas, são recomendadas as referências (7, 10, 11).

2.3 Descargas Atmosféricas Diretas

As descargas atmosféricas diretas caracterizam-se pela sua incidência sobre os condutores ou estruturas das linhas e subestações. Deste ponto em diante, o termo “linhas” é utilizado em referência às linhas de distribuição, que constitui o foco deste trabalho. As descargas atmosféricas diretas recebem maior atenção em regiões com baixa densidade urbana ou em zonas rurais, onde as linhas estão mais expostas à incidência direta. Por outro lado em regiões densamente povoadas a descarga direta é geralmente interceptada por estruturas elevadas, como torres de comunicação, edifícios, hastes de proteção contra descargas, árvores, etc. Apesar de apresentar baixa probabilidade de ocorrência, quando

comparada com o total de descargas que afetam os sistemas elétricos, este tipo de descarga apresenta consequências mais drásticas para os sistemas de distribuição, uma vez que as sobretensões desenvolvidas podem causar falhas dielétricas ao longo da rede, danificando equipamentos nela conectados ou conectados através dos transformadores nas redes de baixa tensão.

Quando da ocorrência de descargas diretas nos condutores de uma linha, as sobretensões originadas U_d são proporcionais ao valor de pico da corrente de retorno I_p . A corrente injetada se divide aproximadamente em duas partes iguais a partir do ponto de impacto, passando a percorrer o condutor juntamente com um surto de tensão que depende da corrente e da impedância de surto da linha Z_s , como mostra a Figura 4. O valor de pico da sobretensão no condutor de uma linha monofásica próximo ao ponto de incidência da descarga é determinado pela equação (1).

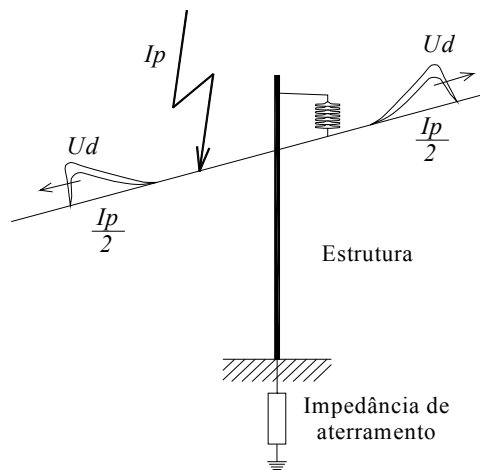


Figura 4 – Surtos de tensão e corrente em uma linha monofásica sem cabo de blindagem.

$$U_d = \frac{I_p}{2} \cdot Z_s \quad (1)$$

Onde:

U_d – valor de pico do surto de tensão originado através de descarga direta;

I_p – valor de pico da corrente de retorno;

Z_s – impedância de surto da linha.

A suportabilidade dielétrica de uma linha frente às sobretensões é determinada com base em ensaios realizados em laboratório, levando em conta a amplitude, forma da tensão

aplicada e as condições ambientes nas quais o isolamento está submetido durante sua operação. Para o caso das linhas de distribuição o ensaio de tensão suportável ao impulso atmosférico é determinante no dimensionamento da suportabilidade, enquanto que para linhas de transmissão o ensaio de tensão suportável ao impulso de manobra torna-se mais relevante.

A tensão suportável ao impulso atmosférico de uma linha depende de alguns fatores tais como: as características do isolamento utilizado, as condições atmosféricas e as condições de aterramento das estruturas. Para o caso do isolamento composto por cadeias de isoladores, o formato e o número de discos, bem como a disposição destas na estrutura são fatores a serem considerados na determinação da tensão suportável resultante. Considerando as linhas de distribuição, o isolamento formado por isoladores dos tipos pino ou pilar e os materiais que compõem a estrutura também são fatores importantes. Este trabalho possui enfoque no comportamento dielétrico apenas dos isoladores de distribuição dos tipos pino e pilar mediante os impulsos atmosféricos, avaliando a suportabilidade de forma isolada, ou seja, desconsiderando os fatores relacionados à estrutura.

Frequentemente as sobretensões de origem atmosférica ultrapassam os valores de tensão suportável dos isoladores, causando falhas dielétricas com o estabelecimento de arco elétrico e em alguns casos causando-lhes danos permanentes. A falha dielétrica possui caráter estatístico e pode ocorrer devido à incidência direta das descargas nos condutores de fase (*flashover*) ou devido à incidência da descarga no condutor de blindagem da linha (*back-flashover*), também conhecido como cabo-guarda.

2.3.1 Ruptura de Isolamento através de “Flashover”

O mecanismo de ruptura do isolamento em uma linha sem cabo de blindagem devido à descarga direta é designado como descarga disruptiva no isolamento (*flashover*) (9). Para a descrição deste mecanismo considere a Figura 5, onde é representada uma descarga impulsiva direta no condutor de fase de uma linha monofásica com intensidade da corrente de retorno I_p .

Primeiramente a corrente I_p se divide em duas parcelas com valores aproximadamente iguais a partir do ponto de impacto. Para a propagação de ondas impulsivas rápidas ou de alta frequência em linhas aéreas, a impedância de surto da linha é dada por Z_s , conforme aproximação apresentada na equação (2), onde L e C correspondem aos parâmetros indutância e capacitância por unidade de comprimento, respectivamente. De acordo com a referência

(12), estes parâmetros devem ser calculados para a frequência típica dos transitórios envolvendo descargas atmosféricas.

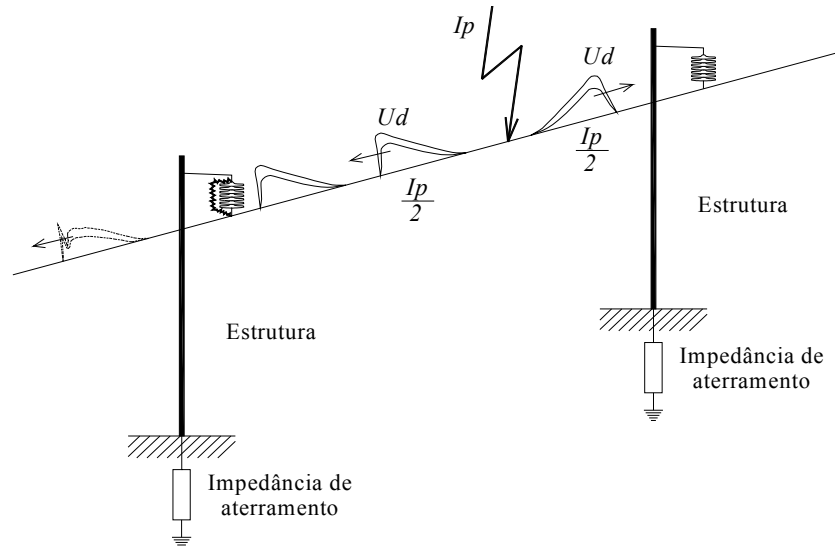


Figura 5 – Surtos de tensão e corrente em uma linha sem cabo de blindagem com ocorrência de *flashover*.

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Onde:

- Z_s – impedância de surto da linha;
- L – indutância por unidade de comprimento;
- C – capacitância por unidade de comprimento.

Associado a cada surto de corrente que se propaga ao longo da linha, tem-se também um surto de tensão, conforme a equação (1). Ao atingir a primeira estrutura, e conseqüentemente o primeiro isolador da linha, este fica submetido à solitação dielétrica imposta pelo surto de tensão. Geralmente para descargas diretas este surto de tensão apresenta valores elevados, consideravelmente superiores à tensão $U_{50\%}$ do isolador, aumentando a probabilidade de ocorrência de falha dielétrica (arco elétrico conectando o condutor à estrutura) (7, 9).

Ao percorrer o condutor, a forma da sobretensão pode sofrer distorções devido ao acoplamento eletromagnético entre os condutores de fase ou entre os condutores de fase e o cabo de blindagem, devido ao efeito corona e à resistividade do solo (13, 14). Os componentes conectados na linha, bem como sua configuração, também influenciam na forma

da sobretensão resultante, como é o caso de alterações na impedância de surto dos condutores (presença de cabos isolados), dispositivos de proteção (para-raios e centelhadores), transformadores e a terminação da linha (terminal aberto na extremidade). Portanto a forma da sobretensão resultante depende de cada caso analisado, levando em conta os fatores citados.

O efeito corona consiste na ionização do ar ao redor de um condutor, submetido a um campo elétrico superior ao campo elétrico crítico. A região ionizada ao redor do condutor traduz-se no efeito de um aumento fictício do raio deste condutor e conseqüentemente um aumento da capacitância para o solo, reduzindo a impedância de surto e a velocidade de propagação. Estes efeitos causam a redução da inclinação e da amplitude do surto de tensão (13, 14, 15). A Figura 6 apresenta um exemplo da aplicação de surtos com polaridade positiva e negativa na fase *A* de uma linha de transmissão com 2.222 m de extensão e condutor de 2,35 cm de diâmetro do tipo ACSR. O efeito corona é observado logo no primeiro ponto de medição, a 622 m do início da linha. A distorção do tempo de frente e a redução da amplitude são maiores na medida em que o surto percorre a linha em direção ao terminal oposto, que possui casamento de impedância para evitar reflexões.

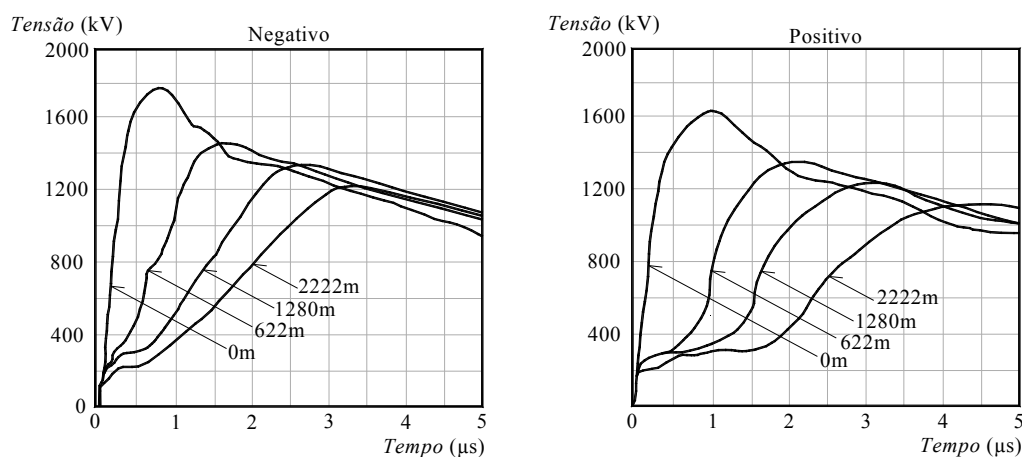


Figura 6 – Distorção do surto de tensão causado pelo efeito corona em uma linha de transmissão com 2.222 m. Adaptado de (15).

A Figura 7 apresenta formas típicas de sobretensão, obtidas através de simulação, para descargas diretas no condutor de fase de uma linha monofásica sem a presença de cabo de blindagem. A forma de tensão da Figura 7 – a) foi obtida utilizando o software Electromagnetic Transients Program (EMTP), calculada a 600 m do ponto de incidência da descarga. A linha em estudo é composta por oito vãos de 200 m cada, com impedância de surto $Z_s = 440 \Omega$. Cada poste foi simulado considerando impedância de surto de $Z_{estr.} = 300 \Omega$,

com impedância de aterramento $Z_{aterr.} = 30 \Omega$. A tensão para ocorrência de *flashover* no isolador é constante, fixada em 150 kV. A propagação dos surtos de tensão e corrente ao longo da linha é afetada devido à ocorrência de *flashover*, que geralmente se estabelece nos isoladores (ponto mais fraco do ponto de vista do isolamento). A ocorrência de *flashover* reduz a amplitude do surto de tensão que se propaga após a estrutura, sendo que esta pode se elevar novamente e causar novas interrupções nos próximos isoladores. Na Figura 7 – a), os primeiros picos na forma da sobretensão são originados pelas descargas disruptivas nos isoladores próximos ao ponto de descarga (1). Na Figura 7 – b) é apresentado um exemplo semelhante ao da Figura 7 – a), porém considerando que a tensão para ocorrência de *flashover* no isolador é de 250 kV. É possível visualizar os picos de tensão originados por descargas disruptivas nos isoladores próximos ao ponto de incidência da descarga. Observa-se na Figura 7 – b) que a amplitude dos picos de tensão pode ultrapassar o nível de isolamento da linha devido ao comportamento dos isoladores frente a surtos de tensão com frente rápida. Isto se deve ao processo físico de deslocamento de cargas, que tem limites em termos de aceleração e velocidades.

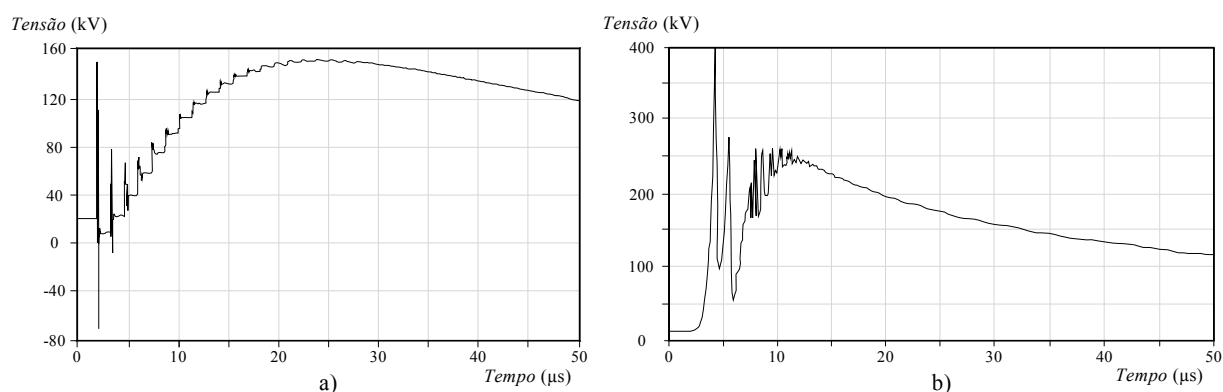


Figura 7 – a) Sobretensão obtida através de simulação em uma linha monofásica devido à descarga direta – medição a 600 m do ponto de incidência e $I_p = 30$ kA. Adaptado de (1). b) Idem ao anterior, porém não há informações sobre I_p . Adaptado de (16).

2.3.2 Ruptura de Isolamento através de “Back-Flashover”

A fim de evitar descargas diretas nos condutores de fase, adota-se a utilização de cabos de blindagem posicionados acima dos cabos de fase, de forma a interceptar eventuais descargas. Adicionalmente, os cabos de blindagem exercem o controle sobre o campo eletromagnético incidente, que é responsável pela indução de tensão entre o condutor de fase e o potencial aterrado (1). Os cabos de blindagem são conectados eletricamente às estruturas

metálicas ou aterrados ao solo através dos cabos de descida e hastes de aterramento. Por razões econômicas torna-se, em geral, inviável a utilização deste tipo de proteção para tensões de operação inferiores a 36 kV, tornando-se requisito importante na medida em que se exige níveis maiores de confiabilidade. O projeto que determina a disposição do cabo de blindagem em relação aos condutores de fase é concebido para uma determinada taxa de falha (número de descargas por unidade de comprimento por ano) estabelecida com base no risco de desligamentos assumidos por cada concessionária de energia elétrica.

Os materiais utilizados na construção das redes de distribuição também exercem influência na composição do isolamento final. Em termos de isolação primária, os isoladores são fabricados com porcelana ou material polimérico. A isolação secundária consiste nas estruturas (postes) e cruzetas. Os postes geralmente são fabricados em madeira ou concreto, enquanto as cruzetas são confeccionadas com madeira, metal e mais recentemente com fibra de vidro. Desta forma o nível de isolamento da linha consiste na composição das isolações primária e secundária, levando em conta a influência de cada material (1). Os níveis de isolamento também variam consideravelmente com as condições atmosféricas na qual a linha se encontra no momento da solicitação dielétrica (densidade do ar, umidade e precipitação). Para o caso da madeira utilizada na composição do poste ou da cruzeta, tem-se uma variação das condições isolantes com base na umidade interna ou superficial, o que torna conservativo todos os cálculos de coordenação de isolamentos desprezando-se esta influência.

Para a análise da descarga direta incidente no cabo de blindagem, considere a linha monofásica apresentada na Figura 8. A corrente I_p , representativa da corrente de retorno, se divide em duas parcelas aproximadamente iguais que iniciam o trajeto até as estruturas próximas, juntamente com um surto de tensão. Ao atingir a estrutura, que possui o cabo de blindagem aterrado, o surto de tensão se divide, originando o surto refletido U_{d1} , e os surtos refratados U_{d2} e U_e . Este processo depende das impedâncias de surto do cabo de blindagem Z_{blind} e da estrutura Z_{estr} . Parte do surto de tensão continua seu trajeto até a próxima estrutura (U_{d2}) e a outra parte percorre o condutor de aterramento em direção ao solo (U_e). Nos pontos de descontinuidade (topo da estrutura e solo) ocorrem reflexões dos surtos de corrente e tensão, alterando a forma e a amplitude dos surtos resultantes. Caso o surto de tensão refletido na base da estrutura possua polaridade oposta à do surto incidente, a tensão resultante no topo desta é reduzida. Por outro lado, se o surto de tensão refletido possuir a mesma polaridade, ocorre um aumento da tensão resultante no topo da estrutura. No último caso o processo se repete sucessivas vezes até que a tensão resultante no topo da estrutura seja suficiente para causar uma falha dielétrica entre o cabo de blindagem e o condutor de fase. Este mecanismo

de falha do isolamento mediante descarga no cabo de blindagem é designado como descarga disruptiva de retorno (*back-flashover*) (9).

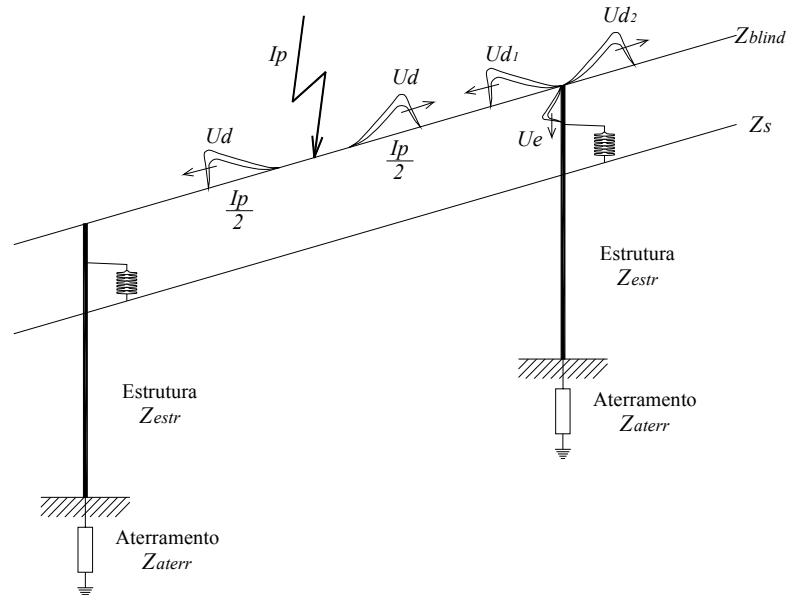


Figura 8 – Surtos de tensão e corrente em uma linha monofásica com cabo de blindagem.

De forma geral, os fatores que influenciam diretamente na amplitude da tensão resultante no topo da estrutura consistem na intensidade e na taxa de variação da corrente de descarga, bem como nas impedâncias de surto dos condutores envolvidos, da estrutura e do aterramento. Conforme comentado, as reflexões na base da estrutura dependem diretamente da impedância de aterramento e, portanto, não ocorrerão reflexões para os surtos de tensão e corrente neste ponto, caso a impedância de aterramento seja igual à impedância de surto da estrutura ($Z_{estr} = Z_{aterr}$, coeficiente de reflexão nulo). Porém este fato raramente ocorre e a resistência de aterramento pode ser maior ou menor do que a impedância de surto da estrutura.

Para $Z_{aterr} < Z_{estr}$, ocorre a reflexão negativa do surto de tensão na base da estrutura (ponto de descontinuidade), reduzindo a amplitude da tensão resultante no topo. A reflexão positiva consiste no pior caso e ocorre quando $Z_{aterr} > Z_{estr}$. O surto de tensão resultante no topo da estrutura é composto dos surtos incidente e refletido, que alteram a amplitude e a forma do surto incidente. O tempo de trânsito τ é gasto pelo surto de tensão ao percorrer toda a extensão da estrutura, determinando o instante em que o surto refletido inicia sua atuação sobre o surto incidente. Geralmente o tempo τ é inferior ao tempo de frente dos surtos de tensão gerados por descargas reais, alterando a forma do surto incidente antes de seu valor de pico (9). Para o cálculo das impedâncias de surto de diversas estruturas e do aterramento,

recomendam-se as referências (1, 14). Uma abordagem mais completa e detalhada do mecanismo de *back-flashover*, incluindo análises de sensibilidade dos parâmetros de influência, pode ser encontrada nas referências (13, 17, 18).

2.4 *Descargas Atmosféricas Indiretas*

As descargas atmosféricas indiretas caracterizam-se pela incidência nas proximidades dos sistemas elétricos. Durante o estabelecimento da corrente de retorno em uma descarga atmosférica, ocorre o fenômeno da indução de tensões em pontos próximos ao ponto de incidência. As sobretensões induzidas consistem na principal fonte de avarias nas redes de distribuição de energia elétrica em média e baixa tensão. Nos sistemas de distribuição em média tensão, as sobretensões induzidas podem causar a falha dielétrica em transformadores e danos em elementos com isolamento auto-recuperante, como isoladores, chaves seccionadoras e chaves fusíveis. Assim como no item 2.2 *Descargas Atmosféricas Diretas*, constitui o objetivo deste tópico, relacionar os fatores que influenciam na forma impulsiva da tensão induzida, a fim de reproduzir estas formas em laboratório e avaliar os efeitos na suportabilidade dielétrica dos isoladores utilizados em linhas de distribuição de média tensão.

O estabelecimento da tensão induzida em uma linha é sintetizado de forma simplificada no presente parágrafo. A partir da conexão dos canais ascendente e descendente, inicia-se a circulação da corrente de retorno, de elevada intensidade, através do canal. A corrente de retorno possui distribuição temporal ao longo do canal, dependendo de vários aspectos dinâmicos e de características do meio antes de sua formação. Durante a propagação do surto de corrente, um campo eletromagnético que incide sobre a linha é gerado. Inicialmente, os segmentos do canal próximos ao ponto de incidência contribuem para a formação do campo eletromagnético, passando a sofrer a influência de segmentos mais distantes na medida em que a corrente se propaga ao longo do canal. Os campos gerados por todos os segmentos incidem na linha a cada instante, induzindo em cada ponto, surtos de tensão e corrente que se propagam ao longo da linha. A tensão resultante induzida em um determinado ponto da linha consiste na composição das tensões originadas pelo campo eletromagnético incidente e pelas tensões que se propagam na linha, originadas em instantes anteriores pela corrente no canal (9). O processo de indução de tensões em linhas devido a descargas indiretas é complexo e depende de vários fatores, tais como: os parâmetros da descarga, configuração da linha, topologia da rede, resistividade do solo, distância e

geometria entre a linha e o canal de formação da descarga. A distribuição da corrente ao longo do canal e sua evolução ao longo do tempo são fatores determinantes na amplitude e na forma da tensão induzida.

A avaliação das tensões induzidas em uma linha parte primeiramente do cálculo do campo eletromagnético gerado pela corrente de retorno, determinado através dos *modelos de corrente de retorno*, que especificam a forma da corrente em função da altura do canal e do tempo. Com base nos valores de campos eletromagnéticos calculados em cada ponto ao longo da linha, as tensões induzidas são determinadas através dos *modelos de acoplamento*, que descrevem a interação entre os campos gerados e os condutores (19).

Os modelos de corrente de retorno para o cálculo do campo eletromagnético podem ser classificados em três grupos principais: *modelos físicos*, *modelos de linhas de transmissão* e *modelos de engenharia* (10). A referência (10) apresenta uma descrição detalhada dos grupos e seus modelos mais relevantes. Os *modelos de engenharia* mais conhecidos são: modelo *Bruce-Golde (BG)* (20), modelo *Transmission Line (TL)* (21), modelo *Master, Uman, Lin and Standler (MULS)* (22, 23), modelo *Traveling Current Source (TCS)* (24), modelo *Modified Transmission Line (MTL)* (25). Os *modelos de engenharia* destacam-se pela simplicidade na formulação matemática, assumindo algumas condições, tais como velocidade de propagação do surto de corrente no canal constante. Modelos mais elaborados, que buscam a representação da movimentação de cargas do envelope de corona para o centro do canal de forma distribuída, foram propostos pelos pesquisadores Diendorfer e Uman (26) e Cooray (27). A referência (19) apresenta discussões e comparações entre os *modelos de engenharia* relacionados acima.

A partir da determinação do campo eletromagnético, as tensões e correntes induzidas em uma linha podem ser determinadas através da resolução das equações de Maxwell. No entanto a utilização desta formulação matemática implica em elevados tempos de simulação, devido aos comprimentos das linhas envolvidas nos estudos. A teoria de linhas de transmissão é levada em consideração para resolver este problema, onde cada segmento elementar é submetido ao efeito do campo eletromagnético induzido pela corrente de retorno. Desta forma, os efeitos da propagação longitudinal dos surtos de tensão e corrente são levados em conta (28). Os modelos de acoplamento baseados na aproximação da teoria de linhas de transmissão de maior importância são: modelo *Rusck* (29), modelo *Chowdhuri* (30) e modelo *Agrawal, Price and Gurbaxani* (31). Semelhante ao modelo *Agrawal et al.*, tem-se os modelos *Taylor, Satterwhite and Harrison* (32) e *Rachidi et al.* (33). Uma extensão do modelo *Rusck* foi apresentada por Piantini e Janiszewski, denominado *Modelo de Rusck*

Extendido (34). Entre os modelos citados acima, o modelo *Agrawal et al.* consiste no mais adequado para o cálculo das tensões induzidas, considerando a condutividade do solo e linhas com multicondutores. A referência (28) apresenta uma discussão e comparações entre os modelos *Rusck, Chowduri e Agrawal et al.*

São apresentados a seguir exemplos de formas de tensão induzidas, obtidas através de medição em linhas experimentais e através de simulação computacional. Os exemplos fornecem uma primeira dimensão das variações observadas nos tempos de frente e cauda para as formas de tensão em diferentes condições. A Figura 9 apresenta formas de tensão induzidas obtidas através de medição em uma linha experimental desenergizada, originadas a partir de uma descarga subsequente com amplitude aproximada de 23 kA. A linha possui 682 m de comprimento com dois condutores separados em 1,82 m na posição vertical. As estruturas de suporte consistem em 15 postes de madeira, separados de 49 m entre si. As medições de tensão estão localizadas no início da linha, no centro e no final desta. O condutor inferior é aterrado nos pontos de medição de tensão e o condutor superior é utilizado como condutor de fase, com casamento de impedância de 455 Ω nas extremidades da linha. A altura média do condutor superior é de 7,5 m e a tensão $U_{50\%}$ dos isoladores foi escolhida a fim de evitar descargas disruptivas durante os experimentos. A linha em questão não possui os equipamentos comumente encontrados nas redes de distribuição, tais como transformadores, para-raios, chaves, etc. A descarga atmosférica é obtida através do lançamento de foguetes conectados a um fio metálico em direção à nuvem, na estação de lançamento localizada há 145 m do centro linha (35). A Figura 9 – a) apresenta a forma típica para a tensão induzida observada no centro da linha, ponto mais próximo ao ponto de incidência da descarga (35). Em comparações realizadas com a forma padrão (1,2 x 50 μ s), foi observado que o tempo de frente possui a mesma ordem grandeza ($t_{f\ 50\%} = 1,59\ \mu$ s), com tempo de cauda bastante reduzido ($t_{c\ 50\%} = 4,1\ \mu$ s). A Figura 9 – b) apresenta uma comparação entre a tensão induzida medida no início (U_I) e no centro da linha (U_G). Neste caso a tensão U_G corresponde àquela observada na Figura 9 – a), porém com escala reduzida. Neste exemplo é possível observar uma característica típica das tensões induzidas, que constitui no tempo de cauda reduzido, quando comparado com o tempo de cauda padrão (50 μ s) (35).

A Figura 10 apresenta formas de tensões induzidas, obtidas a partir de medição em uma linha experimental de tamanho reduzido. Considerando as grandezas em tamanho real, a linha possui 1.400 m de comprimento. Para a configuração monofásica da linha, o condutor de fase está posicionado a 10 m do solo, com o condutor de blindagem a 1 m abaixo deste, aterrados a cada 450 m. Na configuração trifásica, os condutores de fase estão a 10 m do solo,

com casamento de impedância de 455Ω nas extremidades da linha. A medição de tensão está localizada no centro da linha, local mais próximo do ponto de incidência da descarga. A linha monofásica não possui equipamentos instalados e configuração trifásica está protegida através de para-raios. A descarga atmosférica é simulada através do descarregamento de um cabo isolado de 280 m, carregado com corrente contínua e descarregado no condutor que simula o canal de descarga através de uma chave. O canal de descarga está posicionado a 70 m da linha, equidistante de suas extremidades (36). A Figura 10 – a) apresenta as formas de tensão induzida, obtidas no ponto de medição mais próximo ao ponto de incidência da descarga e calculada utilizando o *Modelo de Rusck Extendido* para a linha monofásica. Neste caso tem-se uma descarga com amplitude de 36 kA e tempo de frente de $3,1 \mu\text{s}$ (36). Idem para a Figura 10 – b), porém considerando a linha trifásica protegida com para-raios e descarga com amplitude de 54 kA (tempo de frente de $3,2 \mu\text{s}$) (36).

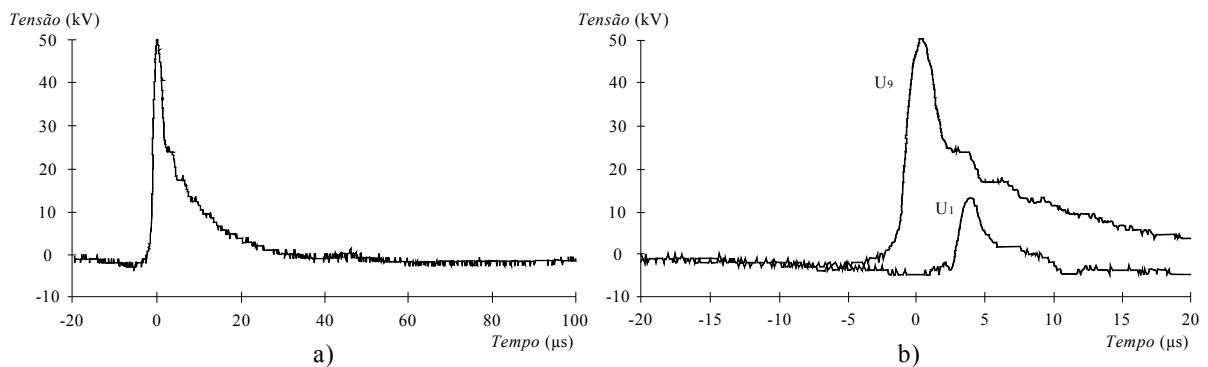


Figura 9 – a) Tensão induzida no centro da linha – U_0 . b) Tensões induzidas no início e no centro da linha, U_1 e U_0 , respectivamente (escala de tempo reduzida). $I_p = 23 \text{ kA}$ (descarga subsequente). Adaptado de (35).

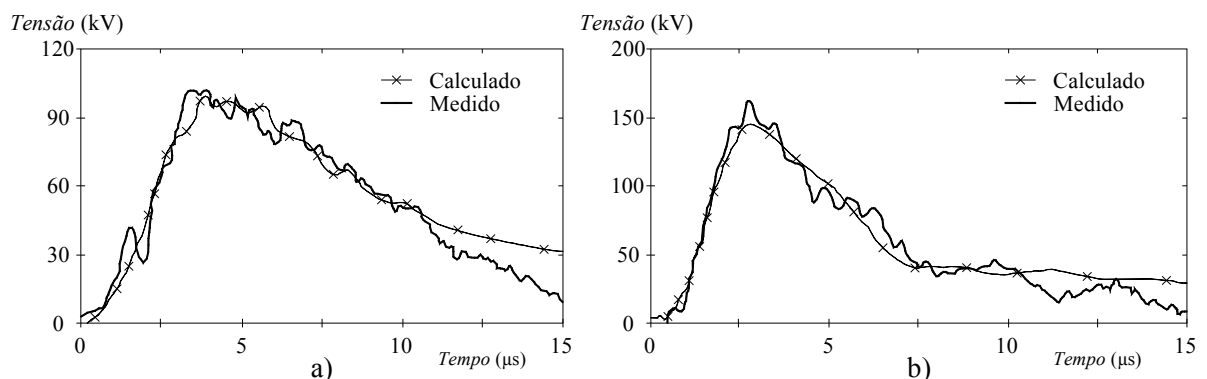


Figura 10 – a) Tensão induzida no ponto mais próximo ao ponto de incidência da descarga e cálculo através do *Modelo de Rusck Extendido* para a linha monofásica – $I_p = 36 \text{ kA}$. b) Idem ao item a), porém considerando linha trifásica com para-raios – $I_p = 54 \text{ kA}$. Adaptado de (36).

Na Figura 11 – a), a tensão induzida é obtida através de medição no ponto *XI* e comparada com a tensão induzida calculada utilizando o modelo de acoplamento de *Agrawal*

et al. A linha utilizada para os experimentos e simulações é apresentada na Figura 11 – b). Observa-se uma concordância satisfatória entre os resultados de medição e simulação para a configuração simples estudada. Outras configurações mais complexas são apresentadas na referência (37).

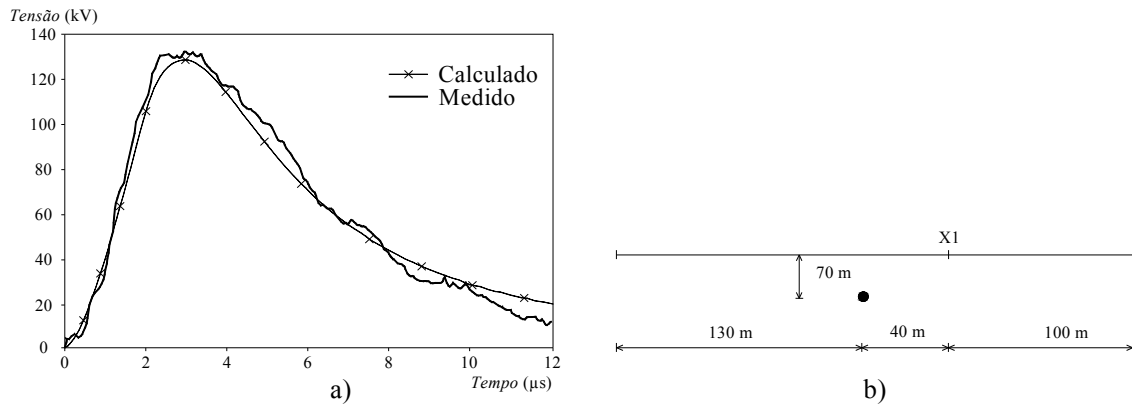


Figura 11 – a) Tensão induzida no ponto *X1* e simulação através do modelo de *Agrawal et al.* para a linha monofásica – $I_p = 34$ kA. b) Configuração da linha utilizada nos experimentos e cálculos. Adaptado de (37).

A Figura 12 apresenta formas de tensão induzidas obtidas a partir de medição em uma linha experimental trifásica projetada para tensão nominal de 13 kV. As tensões são induzidas a partir de descargas atmosféricas reais, incidentes nas proximidades da linha, que possui 2.800 m de comprimento com três condutores dispostos na horizontal a uma altura de 10 m do solo. São utilizados isoladores do tipo pino e condutores de fase bitola 3/0 ACSR. As medições de tensão estão localizadas nas extremidades da linha (pontos *A* e *B*) (38). A Figura 12 – a) apresenta a tensão induzida registrada no terminal *B*, para uma descarga atmosférica localizada a 3.000 m. (38). Na Figura 12 – b) a tensão induzida foi registrada no terminal *A* da linha, que conta com a presença de para-raios de tensão nominal 10 kV com centelhadores. Neste caso é possível observar os picos de tensão na região de frente do surto induzido, semelhante aos resultados observados na Figura 7, quando da ocorrência de descargas disruptivas nos isoladores. Devido à proximidade da descarga em relação à linha, possivelmente descargas disruptivas ocorreram também nos centelhadores do para-raios.

Com base nas Figuras 9 a 12 é possível identificar algumas características das tensões induzidas citadas anteriormente. Com relação às amplitudes, observa-se que nos exemplos apresentados a tensão induzida máxima não ultrapassa 150 kV. Outros resultados mostram que as amplitudes podem atingir algumas centenas de quilovolts. Com relação à forma das tensões induzidas, observa-se que o tempo de frente varia entre o valor padronizado para ensaios ($t_f = 1,2 \mu s$) e valores da ordem de $3,5 \mu s$. Para os tempos de cauda observam-se

valores bastante inferiores ao valor padronizado para ensaios ($t_c = 50 \mu s$), variando tipicamente entre 4 e 10 μs . É importante ressaltar que os exemplos apresentados são válidos apenas para as configurações de linha estudadas e para as características das descargas envolvidas (descargas em torres, através do lançamento de foguetes ou através de modelos computacionais), podendo ocorrer variações caso os parâmetros envolvidos sejam alterados.

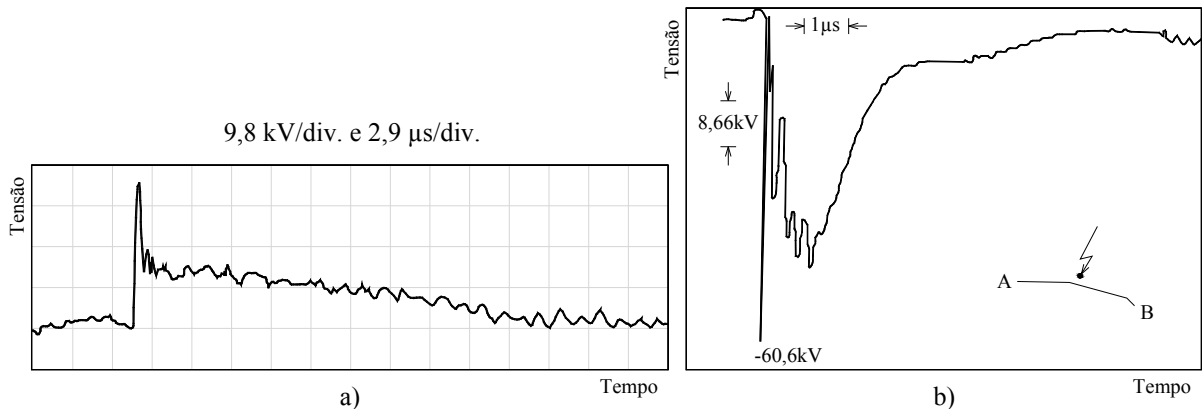


Figura 12 – a) Tensão induzida no ponto *B* da linha devido a uma descarga a 3.000 m. b) Tensão induzida no ponto *A*, com a presença de para-raios, para uma descarga próxima ao centro da linha. Adaptado de (38).

Os tempos de frente da tensão induzida e das correntes de retorno estão diretamente relacionados. Neste período, a taxa de variação da corrente possui valores elevados e contribui para o crescimento rápido do surto de tensão induzida. Ao atingir o valor máximo de corrente, a taxa de variação é anulada, cancelando o efeito do campo induzido na linha e fazendo com que a tensão induzida também alcance seu valor máximo. Após este instante a taxa de variação da corrente torna-se bastante reduzida (região de cauda do surto de corrente), resultando em um decrescimento rápido do surto de tensão induzida, dado que a parcela de campo eletromagnético induzido depende da taxa de variação da corrente e possui efeito predominante na indução de tensões. Este decrescimento não é instantâneo uma vez que o surto de tensão induzida é o resultado da contribuição de todos os elementos de corrente do canal, onde a contribuição dos elementos mais distantes da linha é percebida em um intervalo de tempo maior. Além disso, existe um tempo de propagação dos surtos de tensão induzidos na linha até o ponto de observação (9).

Além dos exemplos apresentados acima, diversos outros experimentos utilizando medições de tensão em linhas de tamanho real ou em escala reduzida foram realizados. Dentre as medições de tensão induzida realizadas em linhas de tamanho real, destacam-se os experimentos realizados por *Eriksson et al.* (39), *Yokoyama et al.* (40, 41, 42), *Master et al.*

(43), Cooray e De La Rosa (44), Rubinstein et al. (45), Michishita et al. (46) e Piantini et al. (47). Considerando as medições de tensão induzida em linhas de tamanho reduzido, destacam-se os experimentos realizados por Yokoyama (48), Piantini e Janiszewski (49) e Ishii et al. (50).

2.4.1 Influência dos Parâmetros da Descarga

Conforme apresentado anteriormente os parâmetros da corrente de retorno exercem influência significativa nas características das tensões induzidas, alterando o tempo de frente e a amplitude através do valor de pico e da taxa de variação da corrente no tempo. Apesar de apresentarem amplitudes reduzidas quando comparadas com a primeira descarga de retorno, as descargas subsequentes também são importantes na determinação da tensão induzida, dado que estas possuem tempo de frente bastante reduzido, ou seja, possuem elevadas taxas de variação da corrente. A apresentação de formas típicas de correntes de retorno é geralmente realizada através de curvas médias, obtidas em estações de medição a partir de registros de várias ocorrências de descargas em torres devidamente instrumentadas para o registro dos parâmetros envolvidos em descargas atmosféricas. A Figura 13 apresenta formas médias normalizadas para as descargas descendentes com base nas medições realizadas em uma torre instrumentada localizada na Estação San Salvatore, Suíça (51). A Figura 13 – a) mostra a forma de corrente média para a primeira descarga de retorno negativa descendente, obtida a partir do registro de 88 descargas. A Figura 13 – b) foi obtida a partir do registro de 76 descargas e mostra a curva média para as correntes de retorno negativas subsequentes. Conforme comentado, as descargas descendentes positivas possuem probabilidade de ocorrência reduzida e neste caso os 21 registros não foram suficientes para a determinação de apenas uma curva média típica. Para este tipo de descarga as formas médias foram divididas em 04 grupos conforme apresentado na Figura 13 – c).

Observa-se na Figura 13 – c) que a forma da corrente para a descarga positiva apresenta tempo de frente elevado, quando comparada com as demais descargas negativas. Este formato característico das descargas positivas reflete uma carga maior acumulada no canal e conseqüentemente maiores amplitudes de corrente de descarga. A referência (51) apresenta uma compilação dos principais parâmetros das descargas atmosféricas descendentes, organizadas em forma de distribuições de probabilidade acumulada.

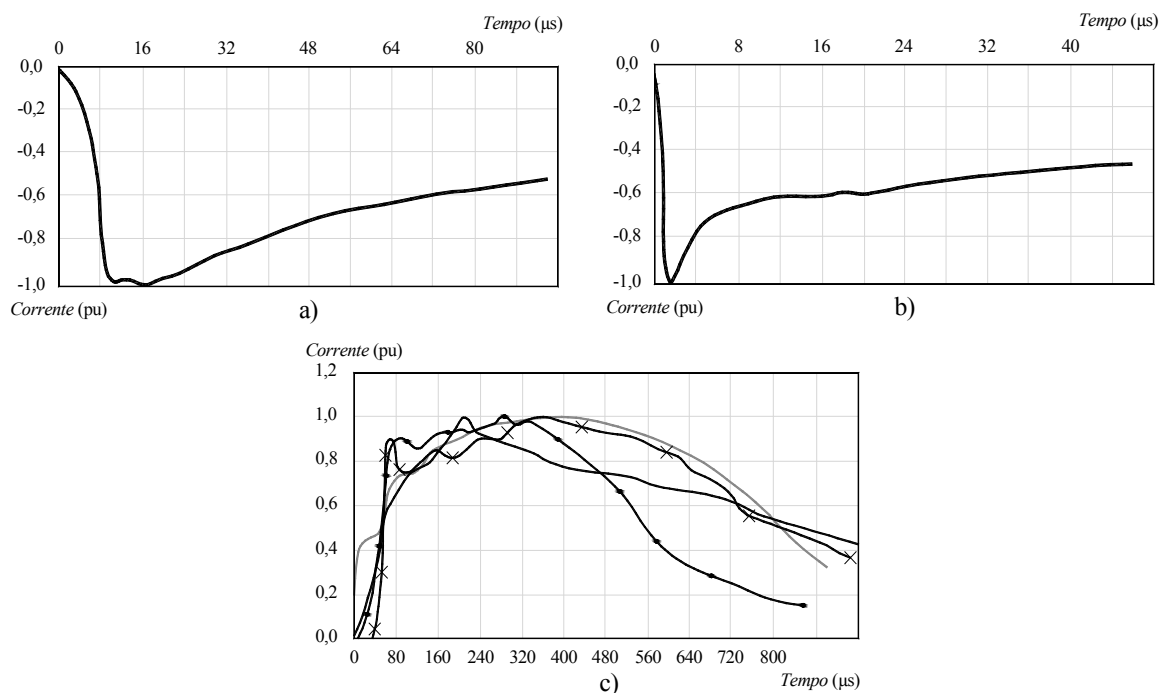


Figura 13 – Formas de corrente de retorno descendentes médias registradas na Estação San Salvatore, Suíça. a) Primeira corrente de retorno negativa. b) Corrente de retorno negativa subsequente. c) Corrente de retorno positiva. Adaptado de (51).

No Brasil, destacam-se as medições de corrente realizadas na Estação do Morro do Cachimbo (MG), coordenadas pelo *LRC – Lightning Research Center UFMG/CEMIG*. Neste caso foram observadas similaridades entre as medições realizadas na Estação San Salvatore e as medições realizadas pelo *LRC*, no que diz respeito às formas médias para as primeiras descargas de retorno e descargas de retorno subsequentes (52).

Além dos parâmetros da descarga, predominantes na determinação das tensões induzidas, têm-se outros fatores que também exercem influência, porém de modo não tão significativo. São eles: altura do ponto de conexão entre a descarga ascendente e descendente, atenuação da amplitude de corrente que se propaga ao longo do canal, velocidade de propagação da corrente e tortuosidades do canal (9). A Figura 14 apresenta os resultados obtidos através de simulação (modelo de acoplamento *Agrawal et al.*), comparando de forma separada a influência dos fatores: amplitude da corrente de descarga, taxa de variação da corrente no tempo e velocidade de propagação do surto de corrente no canal de descarga. Considerando a Figura 14 – a), tem-se que a taxa de variação da corrente permaneceu constante em $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$, variando-se apenas o valor de pico da corrente de retorno. Nota-se a relação proporcional entre a amplitude da corrente e a tensão induzida. Na Figura 14 – b) tem-se que o valor de pico da corrente de descarga permaneceu constante em 12 kA , alterando-se apenas a taxa de variação da corrente. Observa-se que taxas de variação maiores induzem

níveis mais elevados de tensão. Os resultados apresentados na Figura 14 – c) consideram três velocidades de propagação do surto de corrente no canal, mantendo-se constante a intensidade. Para a configuração de linha retilínea apresentada na referência (53), o aumento da velocidade do surto de corrente de retorno leva a um pequeno aumento na taxa de variação da tensão induzida, resultando em pouco impacto na amplitude desta (53). Porém, outras configurações de linha podem levar a resultados contrários aos apresentados neste exemplo.

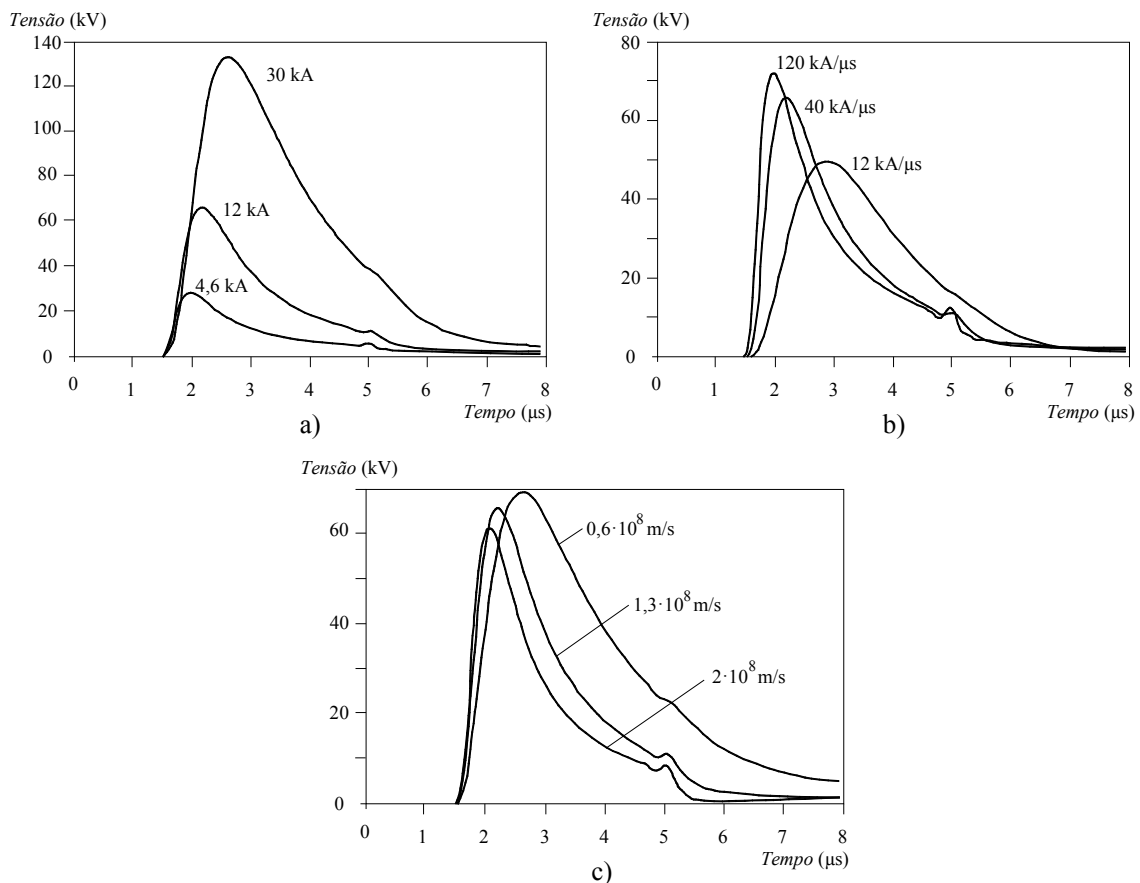


Figura 14 – Influência dos fatores: a) Amplitude da corrente de descarga. b) Taxa de variação da corrente no tempo. c) Velocidade de propagação do surto de corrente no canal. Resultados obtidos através de simulação computacional utilizando do modelo de acoplamento *Agrawal et al.* Adaptado de (53).

2.4.2 Influência das Características Construtivas da Linha e do Solo

Com relação às características construtivas da linha que influenciam nas tensões induzidas, os parâmetros relevantes são: altura dos condutores, número de condutores e comprimento da linha. Considerando o solo, tem-se que a condutividade afeta as tensões induzidas através do campo eletromagnético incidente e através dos parâmetros da linha. Para o caso do solo como um condutor perfeito, a amplitude da tensão induzida é aproximadamente proporcional à altura dos condutores. Para o caso do solo real, com

condutividade finita, a relação entre a tensão induzida e a altura dos condutores é não linear e depende da condutividade, da distância de incidência da descarga com relação à linha e do ponto de medição da tensão ao longo da linha (10).

A Figura 15 apresenta os resultados de simulação para as tensões induzidas em uma linha retilínea monofásica, sem cabo de blindagem, com comprimento de 1.000 m e descarga típica subsequente de 12 kA, incidindo a 50 m de seu centro. O ponto de observação das tensões induzidas está localizado nas extremidades da linha, onde foram consideradas três alturas diferentes para os condutores (54). Com base nos *modelos de acoplamento* apresentados nas referências (29, 30, 31) é possível notar que a amplitude das tensões induzidas depende principalmente da parcela vertical do campo elétrico que incide sobre a linha durante uma descarga. Com o aumento da altura do condutor em relação ao solo, aumenta-se também a participação desta parcela de campo elétrico na composição da tensão induzida. Neste caso, a condutividade do solo, o ponto de incidência da descarga e o ponto de observação da tensão induzida influenciam os resultados (54).

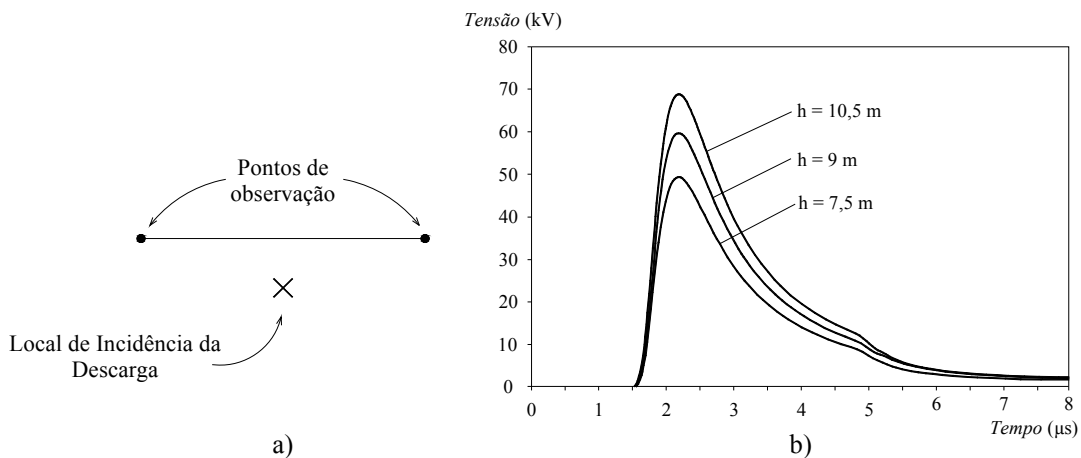


Figura 15 – a) Vista superior da linha utilizada nas simulações. b) Tensões induzidas nas extremidades da linha considerando as alturas de 7, 5, 9 e 10,5 m, para $I_p = 12$ kA. Adaptado de (54).

Com relação ao número de condutores, observa-se uma redução na tensão induzida para linhas trifásicas quando comparadas com linhas monofásicas, considerando o condutor em análise na mesma posição. A presença de cabos de blindagem ou condutores de neutro aterrados implica em uma redução na tensão induzida de 20 % a 40 %, dependendo da configuração da linha (10). Conforme discutido, a distância entre o condutor de fase e o solo, ou neste caso, entre o condutor de fase e o condutor de blindagem aterrado, influencia diretamente na determinação das tensões induzidas. Este fato é observado também

comparando as amplitudes das tensões induzidas em linhas convencionais e compactas, onde o condutor de blindagem está a uma distância de 15 cm a 30 cm dos condutores de fase.

A referência (10) apresenta uma comparação das tensões induzidas para diferentes comprimentos, onde são alterados os parâmetros de condutividade do solo e forma da corrente de descarga, considerando a linha retilínea estudada neste item. A descarga incide a 50 m do centro da linha, conforme apresentado na Figura 15. Neste caso, a tensão induzida atinge o seu valor máximo próximo ao ponto de incidência da descarga e permanece constante para distâncias superiores a 2.000 m, independente da forma da corrente de descarga. A partir desta distância o efeito do campo eletromagnético na indução de tensões torna-se desprezível. Porém, para incidência de descargas próximas às extremidades da linha, o valor máximo da tensão induzida pode ocorrer para distâncias superiores a 2.000 m.

Com relação às características do solo em que a linha se encontra, tem-se que o parâmetro mais importante é a resistividade (ou condutividade), fator este que influencia na amplitude e na forma da tensão induzida. A Figura 16 apresenta as tensões induzidas na extremidade da linha em análise neste item. Observa-se que a inclusão da condutividade do solo reduz a amplitude e modifica a forma da tensão induzida, onde o pior caso é obtido quando o solo é considerado perfeitamente condutor (55).

O local de instalação da linha também exerce influência na amplitude da tensão induzida através do relevo, que interfere na incidência do campo eletromagnético gerado pela descarga. Uma elevação entre a linha e o ponto de incidência altera a distribuição do campo eletromagnético, podendo reduzir a amplitude da tensão induzida. Analogamente, as edificações nos centros urbanos, posicionadas entre o ponto de incidência e a linha, ou próximo desta, possuem o efeito de blindagem, alterando a distribuição do campo eletromagnético (9).

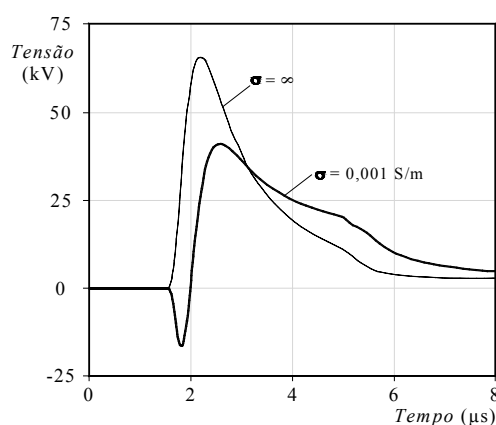


Figura 16 – Tensões induzidas obtidas através de simulação na extremidade de uma linha de 1.000 m com $I_p = 12 \text{ kA}$ (descarga subsequente) a 50 m de seu centro, para $\sigma_g = \infty$ e $\sigma_g = 0,001 \text{ S/m}$. Adaptado de (55).

2.4.3 *Influência do Ponto de Incidência da Descarga*

Para o caso de uma linha sobre um solo perfeitamente condutor, as amplitudes máximas de tensão induzida são observadas no ponto mais próximo entre a linha e o ponto de incidência da descarga. Porém, considerando o solo real com condutividade finita, a amplitude máxima da tensão induzida pode ser observada em pontos diferentes do ponto mais próximo. A Figura 17 apresenta os resultados de simulações computacionais envolvendo a ocorrência de uma descarga subsequente típica de 12 kA em 05 pontos ao redor de uma linha monofásica de 1.000 m, com o objetivo de investigar a influência da distância e da posição relativa entre o ponto de incidência da descarga e as extremidades da linha. As simulações ainda consideram a influência da condutividade do solo e do ponto de observação (10).

Para os casos 1 e 2 é possível notar a influência da distância entre o ponto de incidência e a linha. Nota-se a partir destes dois casos que a amplitude da tensão induzida é inversamente proporcional à distância e que a condutividade finita do solo reduz a amplitude destas. Dado que o ponto de incidência é equidistante das extremidades (pontos de observação *A* e *B*), não existem diferenças entre os resultados obtidos para as duas extremidades. O caso 3 apresenta amplitudes maiores de tensão induzida para a polaridade positiva, quando comparado com o caso 4, devido à sua proximidade com a extremidade *A* da linha. Nestes casos a distância do ponto de incidência da descarga com relação à extremidade oposta (ponto de medição *B*) exerce o efeito de aumentar a amplitude e inverter a polaridade da tensão induzida. Observa-se também que as amplitudes das tensões induzidas com polaridades positivas são maiores quando se considera o solo real (condutividade finita). O caso 5 apresenta resultados semelhantes ao caso 4 para o ponto de medição *A*, porém, com amplitudes de tensão induzida com polaridade negativa maiores para o ponto de medição *B*.

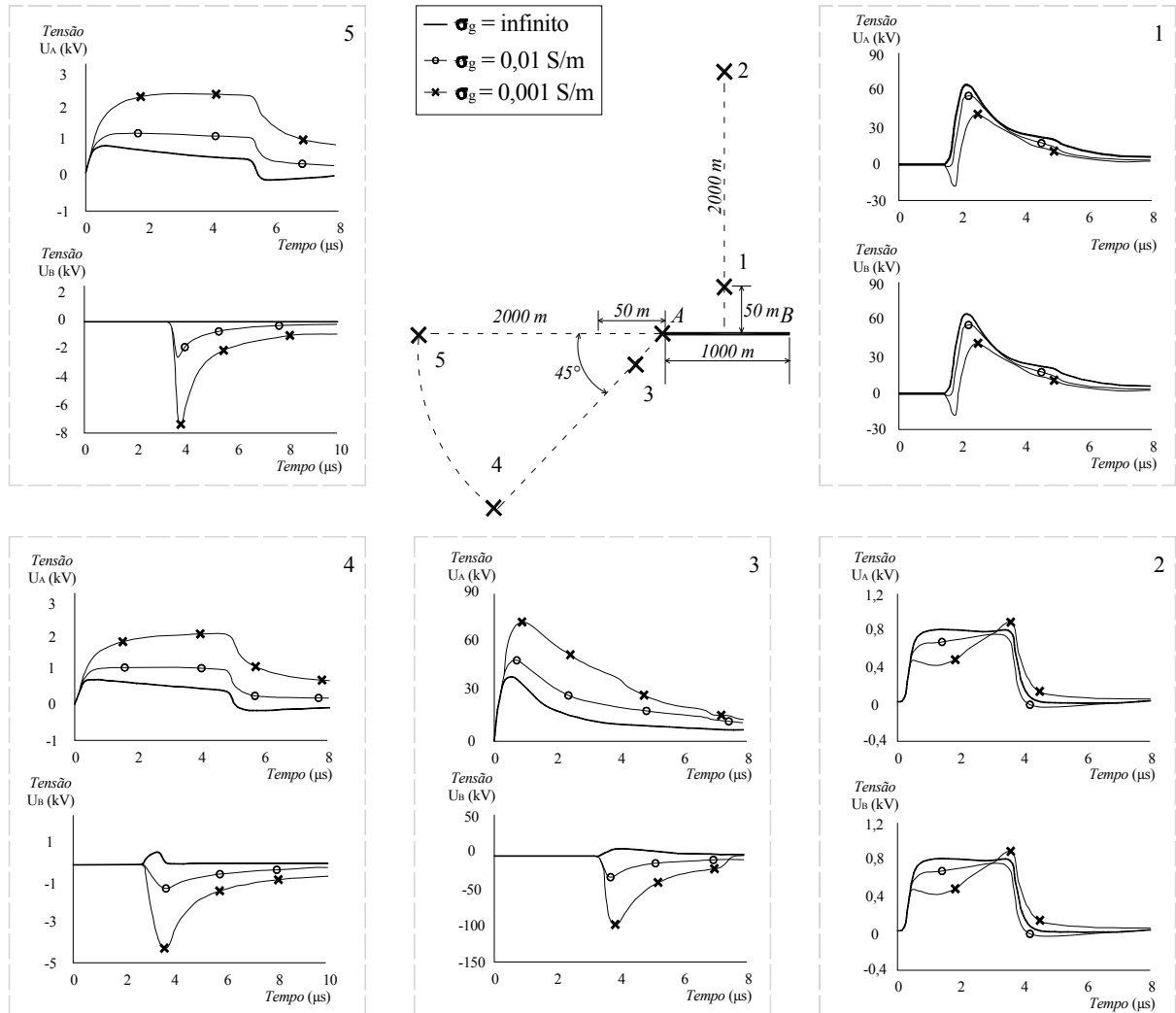


Figura 17 – Tensões induzidas obtidas através de simulação em uma linha de 1.000 m com $I_p = 12$ kA (descarga subsequente) em 05 pontos ao redor da linha, para $\sigma_g = \infty$, $\sigma_g = 0,01$ S/m e $\sigma_g = 0,001$ S/m. Adaptado de (10).

2.5 Considerações Finais

Com o objetivo de distinguir os fatores que afetam a forma e a amplitude das sobretensões atmosféricas, as descargas atmosféricas são divididas em *diretas* e *indiretas*. As descargas diretas possuem menor probabilidade de ocorrência, porém originam surtos de tensão com maior amplitude nos sistemas elétricos. De forma geral, os principais fatores que influenciam na amplitude e na forma do surto de tensão para este tipo de descarga são: as características da linha, do aterramento, dos equipamentos de proteção e do isolamento. A solicitação dielétrica no isolamento de uma linha devido a uma descarga direta nos condutores de fase pode resultar em descarga disruptiva, fenômeno conhecido como *flashover*. Por outro lado, o isolamento é frequentemente solicitado quando da ocorrência de descargas diretas nos condutores de blindagem ou no topo das estruturas, que aliadas às condições desfavoráveis do

aterramento, resultam também em descargas disruptivas através do fenômeno de *backflashover*.

As descargas indiretas possuem maior probabilidade de ocorrência, com incidência nas proximidades das linhas ou subestações, originando sobretensões de menor amplitude quando comparadas com as sobretensões decorrentes de descarga direta. Neste tipo de descarga as tensões induzidas são afetadas por uma grande quantidade de fatores. Os fatores relacionados às características físicas do fenômeno de descarga – amplitude e taxa de variação das correntes de retorno – influenciam diretamente na composição do campo eletromagnético incidente na linha. As características construtivas da linha e condições do solo também afetam a composição das tensões induzidas, contribuindo para a alteração da forma e amplitude. Por fim, o local de incidência da descarga e sua posição relativa à linha alteram a maneira como as parcelas do campo elétrico incidem na linha, sendo estas responsáveis na composição das tensões induzidas.

Com base nos fatores apresentados neste capítulo tem-se que não é possível determinar uma única forma de impulso que seja representativa de tensões induzidas, sendo que cada caso estudado tem suas particularidades. Observa-se também que as sobretensões originadas por descargas diretas podem diferir em relação à forma impulsiva padrão, porém com maior concordância entre as medições em linhas reais e as práticas normalizadas para ensaios de tensão suportável ao impulso atmosférico. Este fato não é observado para descargas indiretas, que a princípio, podem ser melhor avaliadas em laboratório.

3 Formas de Tensão Não Padronizadas

O Capítulo 2 apresentou os fatores que afetam a forma e a amplitude das sobretensões devido às descargas atmosféricas diretas e indiretas em linhas de distribuição. Os ensaios de tensão suportável ao impulso atmosférico utilizam a forma impulsiva padrão, com tempo de frente de 1,2 μs e tempo de cauda de 50 μs . Este ensaio tem como objetivo representar a solitação dielétrica do surto de tensão devido a uma descarga atmosférica. Os tempos de frente e cauda padronizados têm origem nas medições realizadas ao longo de muitos anos em linhas de transmissão e buscam representar um surto com frente rápida e decaimento relativamente lento (56).

Considerando as descargas indiretas, não existe um procedimento padronizado para representar as tensões induzidas nas linhas durante os ensaios de tensão suportável ao impulso atmosférico, dado a grande quantidade de fatores que influenciam em sua determinação. A avaliação da suportabilidade do isolamento submetido a solitações impulsivas não padronizadas tem sido investigada desde 1950, quando Witzke e Bliss (57, 58) propuseram a aplicação de um modelo matemático para a avaliação da suportabilidade dielétrica de transformadores submetidos a este tipo de solitação.

A reprodução exata das formas de tensão induzidas apresentadas no Capítulo 2 é praticamente impossível em laboratórios de alta tensão, devido à característica não constante da taxa de variação na região de frente do surto e devido ao decaimento na cauda possuir comportamento diferente quando reproduzido através de geradores de impulsos. Porém, a utilização deste tipo de gerador apresenta certa flexibilidade, principalmente com relação aos seus parâmetros resistivos, permitindo a concepção de certas formas de tensão com tempos de frente e cauda próximos dos valores desejados. Neste aspecto, este capítulo apresenta uma faixa de valores para os tempos de frente e cauda possíveis de serem reproduzidos no gerador de impulsos do Laboratório de Alta Tensão – LAT-EFEI. Com base nos valores de resistências possíveis de serem utilizados, foram escolhidas 13 formas de tensão não padronizadas, além da forma padrão. As formas de tensão selecionadas são utilizadas na determinação da tensão $U_{50\%}$ em isoladores dos tipos pino e pilar de porcelana, comumente utilizados em linhas de distribuição.

3.1 Definições

A seguir são definidos os termos considerados importantes no entendimento deste capítulo.

- *Forma de tensão impulsiva padronizada*: consiste no impulso de tensão com tempo de frente $1,2 \mu\text{s}$ e tempo de cauda $50 \mu\text{s}$.
- *Formas não padronizadas*: consistem nos impulsos de tensão cujos tempos de frente ou cauda são diferentes dos tempos utilizados na forma padronizada.
- *Gerador de Marx*: gerador de impulsos de tensão no qual os tempos de frente e cauda resultam da descarga de capacitores através de um conjunto de resistores.
- *Indutâncias e capacitâncias parasitas*: consistem em indutâncias e capacitâncias de valor reduzido, inerentes à estrutura do gerador de impulsos. Estes elementos são geralmente encontrados nas conexões entre os resistores e os capacitores do gerador de impulsos, e entre o gerador de impulsos e a amostra ensaiada.
- *Tempo de frente*: parâmetro virtual correspondente a 1,67 vezes o intervalo de tempo entre os instantes nos quais a amplitude do impulso assume 30 % e 90 % do valor de crista.
- *Tempo de cauda*: parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a amplitude do impulso é reduzida para 50 % do valor de crista.

3.2 Geração de Tensões Impulsivas Não Padronizadas

As formas impulsivas utilizadas nos ensaios dielétricos em laboratórios de alta tensão são obtidas através gerador de impulsos de tensão, ou gerador de Marx, onde os tempos de frente e de cauda resultam da descarga de capacitores sobre um conjunto de resistores, constituindo um circuito predominantemente RC . Existem basicamente duas configurações para a construção dos geradores de impulsos, conforme apresentado na Figura 18. Em ambas, o capacitor C_1 é carregado a partir de uma fonte de corrente contínua com tensão U_0 . A descarga deste capacitor sobre os resistores R_1 e R_2 e sobre o capacitor C_2 é realizada através do centelhador S_G , composto na maioria dos casos por esferas. A atuação de S_G pode ser feita de forma manual, com a aproximação das esferas quando C_1 está carregado com a tensão

desejada U_0 , ou através de um disparo automático gerado pelo circuito de comando do gerador. O tempo gasto durante o estabelecimento do arco elétrico entre as esferas é pequeno e não influencia na composição do tempo de frente da forma a ser gerada (59). Para formas impulsivas próximas da forma padrão, o resistor R_1 possui a função de controlar a descarga do capacitor C_1 , afetando o tempo de frente, enquanto o resistor R_2 atua basicamente na composição do tempo de cauda. Existem indutâncias parasitas inerentes à construção do gerador, que em geral não são levadas em conta na modelagem simplificada, porém em alguns casos estas podem originar oscilações no início e na região de pico da forma impulsiva.

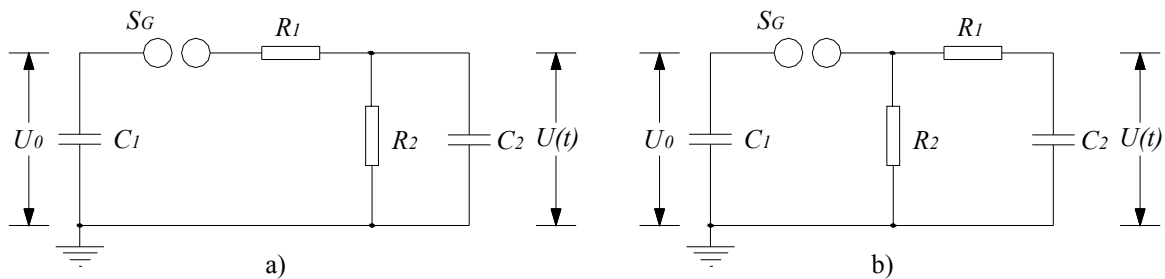


Figura 18 – Configurações para a construção do gerador de impulsos. Adaptado de (59).

A tensão $U(t)$ é obtida a partir do equacionamento do circuito apresentado na Figura 18 – b), resultando na equação (3). Este circuito base é representativo do gerador de impulsos de Marx.

$$U(t) = \frac{U_0}{R_1 C_2 (A_2 - A_1)} \left(e^{-A_1 t} - e^{-A_2 t} \right) \quad (3)$$

Onde:

A_1 – constante de tempo responsável pela cauda do impulso em $(\mu\text{s})^{-1}$;

A_2 – constante de tempo responsável pela frente do impulso em $(\mu\text{s})^{-1}$;

t – tempo em (μs) .

A equação (3) é composta por dois termos exponenciais que somados resultam na tensão impulsiva representada pela linha cheia da Figura 19. As constantes de tempo A_1 e A_2 relacionam-se com os parâmetros do gerador de impulsos através das equações (4) e (5). Conhecendo-se as constantes de tempo para cada forma impulsiva é possível determinar o instante de tempo em que a tensão $U(t)$ atinge seu valor máximo através da equação (6) (59).

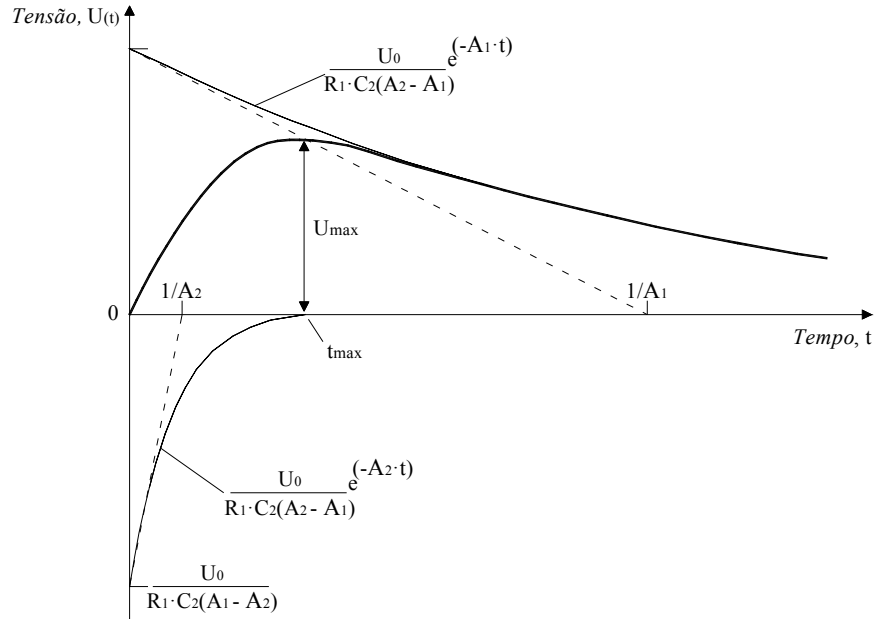


Figura 19 – Composição da tensão impulsiva através de função com dupla exponencial.

$$A_1 A_2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4)$$

$$A_1 + A_2 = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \quad (5)$$

$$t_{m\acute{a}x} = \frac{\ln(A_2/A_1)}{A_2 - A_1} \quad (6)$$

As equações (3) a (6) relacionam todos os parâmetros apresentados na Figura 18 – b) e são utilizadas na determinação dos valores das resistências a serem fabricadas, necessárias para a reprodução das formas não padronizadas.

O gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI é composto por 06 estágios, com energia total de 1,25 kJ e 450 kV de tensão máxima. Cada estágio é formado por um capacitor de carga C'_s , que é carregado com uma tensão U_0 máxima de 75 kV através dos resistores de carga R'_{L1} a R'_{L6} . O disparo dos centelhadores S_G ocorre de forma automática quando a tensão de carga atinge o valor desejado, transferindo a energia armazenada nos capacitores C'_{S1} a C'_{S6} para o capacitor de descarga (ou capacitor de surto) C_b através dos resistores de frente internos R'_{d1} a R'_{d6} e do resistor de frente externo R_S . Para a forma padronizada $1,2 \times 50 \mu s$, tem-se que os resistores de cauda $R'_e \gg R'_d$, fazendo com que a constante de tempo de descarga do capacitor C_b dependa principalmente dos resistores R'_{e1} a R'_{e6} . A resistência total R_{div} representa o divisor resistivo utilizado para o registro da forma impulsiva e medição do

valor de pico. A Figura 20 apresenta o circuito completo com os componentes citados, onde as indutâncias e capacitâncias parasitas foram desprezadas.

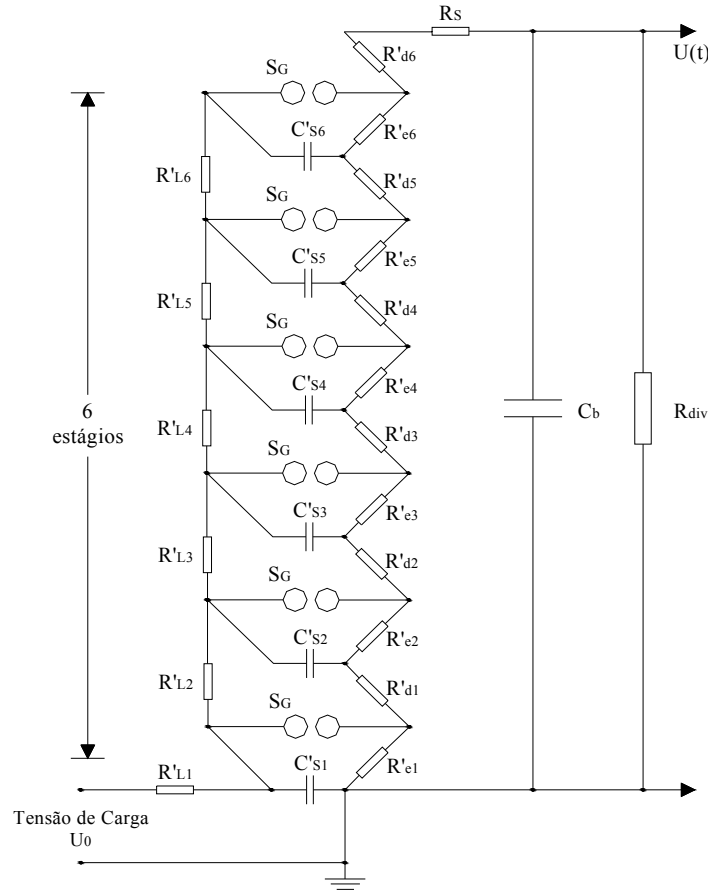


Figura 20 – Gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI.

De acordo com a Figura 20, tem-se:

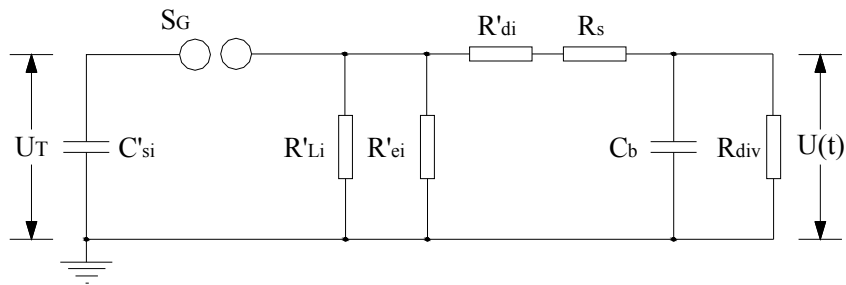
- R'_{L1} a R'_{L6} – resistores de carga;
- R'_{d1} a R'_{d6} – resistores de frente internos;
- R'_{e1} a R'_{e6} – resistores de cauda;
- R_s – resistor de frente externo;
- R_{div} – resistência total do divisor de tensão;
- C'_{s1} a C'_{s6} – capacitores de carga;
- C_b – capacitor de descarga ou de surto.

Para o equacionamento e determinação das formas possíveis de serem construídas no gerador, foram realizadas medições dos valores de resistências e capacitâncias, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros principais do gerador de impulsos.

	R'_L (k Ω)	R'_d (Ω)	R'_e (Ω)			R_S (Ω)	R_{div} (k Ω)	C'_S (nF)	C_b (nF)	
1	12,05	9,98	99,4	250,0	1224,0	2250,0	70	31,45	73,6	1,05
2	5,00	10,00	97,3	249,5	1012,0	2230,0	140	-	74,8	-
3	4,60	13,23	101,7	257,4	1021,0	2240,0	210	-	71,7	-
4	4,70	10,04	102,1	252,2	989,0	2240,0	280	-	72,9	-
5	4,90	9,94	99,4	242,2	1019,0	-	350	-	72,4	-
6	4,90	9,90	99,5	246,2	1023,0	-	-	-	73,4	-

Na modelagem do gerador de impulsos foi considerada também a influência dos resistores de carga (R'_L), resistor de frente externo (R_S), resistência total do divisor de tensão (R_{div}) e número de estágios $n = 6$, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Circuito completo do gerador de impulsos considerando a influência de R'_L , R_S e R_{div} .

De acordo com a Figura 21 e avaliando a influência de cada elemento na formação da forma impulsiva, tem-se:

$$U_T = 6U_0, \text{ tensão de carga total;} \quad (7)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^6 R'_{di} + R_S, \text{ resist\^encia total de frente;} \quad (8)$$

$$R_2 = \left(\frac{1}{\sum_{i=2}^6 R'_{Li}} + \frac{1}{\sum_{i=1}^6 R'_{ei}} + \frac{1}{R_{div}} \right)^{-1}, \text{ representa\~ao do efeito da resist\^encia total de cauda;} \quad (9)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{C'_{Si}} \right)^{-1}, \text{ capacit\~ancia total de carga;} \quad (10)$$

$$C_2 = C_b, \text{ capacit\~ancia de descarga ou de surto.} \quad (11)$$

Com base nas equações (7) a (11) e utilizando dos parâmetros apresentados na Tabela 1, foi desenvolvido o código de programação em Matlab[®] apresentado no ANEXO A, com o objetivo de fornecer a primeira estimativa dos valores de resistências R_1 e R_2 para a composição das formas não padronizadas. Devido à impossibilidade de modificação dos parâmetros capacitivos do gerador, apenas os parâmetros resistivos R_1 e R_2 foram alterados durante os cálculos. Inicialmente, foram selecionadas 16 formas não padronizadas, listadas Tabela 2, combinando diversos tempos de frente e de cauda, além da forma padrão. Os tempos de frente e cauda relacionados na Tabela 2 constituem nos parâmetros de entrada t_{fdes} e t_{cdes} em (μs) para o programa de cálculo da faixa de resistores apresentado no ANEXO A. É necessário informar também a tolerância admitida em (%) nos cálculos, através do parâmetro t_{o1} . As faixas iniciais dos valores de resistências R_1 e R_2 , nas quais o programa identifica a possibilidade de se obter a forma impulsiva desejada é informada através dos parâmetros R_{1min} , R_{1max} , R_{2min} e R_{2max} , em ohm.

Tabela 2 – Formas não padronizadas iniciais e forma padrão.

<i>Frentes Rápidas</i>		<i>Frentes Padrão</i>		<i>Frentes Lentas</i>			
$t_f (\mu s)$	$t_c (\mu s)$	$t_f (\mu s)$	$t_c (\mu s)$	$t_f (\mu s)$	$t_c (\mu s)$	$t_f (\mu s)$	$t_c (\mu s)$
0,5	5	1,2	5	3	10	5	50
0,5	10	1,2	10	2,9	16,1	10	20
0,5	20	1,2	20	4,5	16,1	10	50
0,5	50	1,2	50	5	10	30	50
-	-	-	-	5	20	-	-

A estimativa final do programa considera a faixa de tolerância para os tempos de frente e cauda de $\pm 10\%$, ou seja, apenas as resistências R_1 e R_2 que possibilitam a construção das formas com o erro desejado foram registradas. Estes resultados mostraram que os parâmetros capacitivos do gerador não permitem a construção das formas $5 \times 10 \mu s$, $10 \times 20 \mu s$ e $30 \times 50 \mu s$. Este resultado deve-se à característica peculiar destas formas, que se aproximam de um comportamento “triangular”. A Tabela 3 apresenta os resultados para o cálculo da faixa de resistências R_1 e R_2 , bem como a faixa de valores para os tempos de frente e cauda com os respectivos erros, apenas para as formas impulsivas possíveis de serem obtidas no gerador de impulsos do LAT-EFEI.

O gerador de impulsos foi modelado no software ATPDraw[®] a fim de comprovar os tempos de frente e cauda obtidos através de cálculo e determinar os valores de resistências para a fabricação dos resistores. A modelagem do gerador de impulsos apresentada no ANEXO B faz uso do diagrama representativo da Figura 20 e dos valores de resistências e

capacitâncias apresentados na Tabela 1. Com o objetivo reduzir o número de resistores fabricados, foram utilizadas combinações das resistências calculadas no maior número de formas impulsivas, incluindo nestas os resistores R_S existentes. A Tabela 4 apresenta os resultados das simulações utilizando o ATPDraw[®], indicando os conjuntos de resistores R'_d e R'_e a serem fabricados, bem como os valores encontrados para os tempos de frente e cauda.

Tabela 3 – Formas impulsivas consideradas. Obtenção dos resistores R_1 e R_2 através de simulação computacional, utilizando o código de programação apresentado no ANEXO A.

Valores de Projeto		Valores Calculados					
t_f (μ s)	t_c (μ s)	t_f (μ s)	Erro (%)	t_c (μ s)	Erro (%)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)
0,5	5	0,48 a 0,52	-4,8 a 3,0	4,77 a 5,25	-4,6 a 5,0	200 a 220	420 a 470
0,5	10	0,48 a 0,51	-4,2 a 1,5	9,51 a 10,50	-4,9 a 5,0	180 a 190	930 a 1040
0,5	20	0,49 a 0,51	-2,9 a 2,9	19,40 a 20,80	-3,2 a 4,0	170 a 180	2000 a 2150
0,5	50	0,48 a 0,51	-4,1 a 2,1	47,50 a 52,50	-4,9 a 5,0	160 a 170	5060 a 5600
1,2	5	1,15 a 1,26	-4,1 a 4,9	4,76 a 5,23	-4,9 a 4,6	720 a 1640	120 a 320
1,2	10	1,14 a 1,26	-5,0 a 4,9	9,52 a 10,50	-4,8 a 5,0	500 a 580	790 a 910
1,2	20	1,16 a 1,30	-3,7 a 8,1	18,00 a 21,80	-10,0 a 8,9	450 a 500	1700 a 2100
1,2	50	1,15 a 1,26	-4,5 a 5,0	47,50 a 52,50	-5,0 a 5,0	400 a 440	4900 a 5450
3	10	2,72 a 2,94	-9,4 a -2,0	10,10 a 11,00	1,2 a 9,8	2000 a 4000	250 a 550
2,9	16,1	2,76 a 3,03	-5,0 a 4,5	15,30 a 16,80	-5,0 a 4,2	1450 a 1700	1050 a 1250
4,5	16,1	4,28 a 4,54	-5,0 a 0,8	16,00 a 16,90	-0,9 a 4,9	3300 a 4500	550 a 800
5	20	4,75 a 5,11	-4,9 a 2,2	19,00 a 21,00	-4,8 a 4,8	3100 a 3600	950 a 1200
5	50	5,06 a 5,25	1,1 a 4,9	47,50 a 52,00	-4,9 a 4,1	2200 a 2300	4150 a 4600
10	50	9,52 a 10,50	-4,8 a 4,8	47,60 a 52,30	-4,8 a 4,7	5200 a 6400	3000 a 3700

Tabela 4 – Formas impulsivas. Avaliação dos resistores R'_d e R'_e através de simulação computacional, utilizando o ATPDraw (ANEXO B).

Valores de Projeto		Valores Calculados						
t_f (μ s)	t_c (μ s)	t_f (μ s)	Erro (%)	t_c (μ s)	Erro (%)	R'_d (Ω)	R'_e (Ω)	R_S (Ω)
0,5	5	0,5	0,0	4,7	-5,6	6 x 25	3 x 50, 3 x 100	70
0,5	10	0,5	4,0	9,4	-6,0	6 x 10	3 x 100, 3 x 275	140
0,5	20	0,6	12,0	18,2	-8,8	6 x 10	6 x 350	140
0,5	50	0,5	4,0	52,5	4,9	3 x 10, 3 x 25	6 x 1400	70
1,2	5	1,2	0,8	5,1	2,4	6 x 100	6 x 50	210
1,2	10	1,3	7,5	10,2	2,2	6 x 50	6 x 150	350
1,2	20	1,2	-3,3	19,3	-3,5	3 x 25, 3 x 50	6 x 350	210
1,2	50	1,2	0,0	50,4	0,7	6 x 10	6 x 1265	350
3	10	2,7	-8,7	10,9	8,6	6 x 350	6 x 100	70
2,9	16,1	2,7	-7,6	16,9	5,1	3 x 100, 3 x 350	3 x 150, 3 x 350	140
4,5	16,1	4,1	-9,6	16,1	-0,2	3 x 350, 3 x 650	6 x 150	350
5	20	4,8	-3,2	20,3	1,6	6 x 650	3 x 150, 3 x 275	70
5	50	5,1	2,0	52,2	4,3	6 x 350	6 x 1000	350
10	50	9,7	-3,0	49,4	-1,1	6 x 1300	3 x 350, 3 x 1000	350

3.3 Fabricação dos Resistores e Ensaio

Para a fabricação dos resistores R'_d e R'_e relacionados na Tabela 4 foram utilizados fios de Níquel-Cromo (NiCr), que apresentam alta resistividade e boa resistência frente à oxidação, suportando temperaturas de até 1.200 °C. As estruturas dos resistores foram fabricadas com as mesmas dimensões e características das estruturas originais. As extremidades, utilizadas para a conexão dos resistores na estrutura do gerador, foram fabricadas utilizando liga de cobre e zinco (latão) e o corpo principal foi constituído em nylon. Os resistores são encapsulados com filme de policarbonato, a fim de evitar o acúmulo de impurezas na superfície e evitar danos no suporte de nylon.

Conhecendo-se o comprimento disponível na estrutura de nylon para enrolar o fio de Níquel-Cromo é possível calcular a bitola ideal para cada conjunto de resistores, admitindo-se a elevação máxima de temperatura de 5 °C para 01 impulso de tensão. A energia máxima dissipada foi obtida com base nas simulações realizadas no ATPDraw[®] para cada conjunto de resistores e para cada forma impulsiva na qual estes são utilizados. A elevação de temperatura nos resistores é calculada através da equação (12), considerando que no instante do impulso não há troca de calor entre o fio e o meio externo.

$$Q = m c \Delta T \quad (12)$$

Onde:

Q – energia dissipada no resistor para 01 impulso em (J);

m – massa total do fio NiCr utilizado em (g);

c – calor específico da liga de NiCr, 0,46 (J·g⁻¹·K⁻¹);

ΔT – elevação de temperatura em (°C).

A Tabela 5 apresenta os valores de elevação de temperatura correspondente à máxima energia observada durante as simulações. Após a validação dos valores das resistências R'_d e R'_e através de simulação e após a confirmação da elevação de temperatura admissível para a aplicação de 01 impulso, foram fabricadas 36 unidades do tipo R'_d e 30 unidades do tipo R'_e .

Em seguida, os grupos de resistores foram instalados no gerador e ensaiados com a aplicação de 03 impulsos de polaridade positiva. Cada aplicação foi realizada em um nível de tensão superior ao nível anterior, com o objetivo de verificar a funcionalidade dos resistores

para tensões reduzidas e elevadas. Foram registrados os tempos de frente e cauda, bem como a eficiência do gerador para cada forma impulsiva. O gerador foi mantido sem carga (operando em vazio) ao longo dos ensaios, uma vez que os isoladores a serem ensaiados apresentam capacitâncias reduzidas, exercendo influência desprezível na composição da forma impulsiva. A Figura 22 apresenta o aspecto final dos resistores instalados no gerador, bem como a indicação dos componentes que estão visíveis. Para algumas formas impulsivas foram necessários ajustes adicionais nos valores de resistência, a fim de manter os tempos de frente e cauda desejados dentro dos limites de $\pm 10\%$ estabelecidos. Estas alterações são apresentadas na Tabela 21 do ANEXO C, que mostra a comparação entre os valores obtidos através de simulação computacional utilizando o código de programação e os valores de ensaio, bem como a eficiência do gerador para cada forma impulsiva. No ANEXO H são apresentados os oscilogramas de tensão referentes à 3ª aplicação.

Tabela 5 – Elevação de temperatura nos resistores R'_d e R'_e .

		Resistência (Ω/m)	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Massa (g/m)	Energia (J)	Elevação de Temperatura ($^{\circ}C$)
R'_d (Ω)	25	4,45	0,644	5,62	2,704	0,286	0,04
	50	4,45	0,644	11,24	2,704	0,22	0,02
	100	27,2	0,226	3,68	0,333	0,308	0,55
	350	27,2	0,226	12,87	0,333	0,396	0,20
	650	87,7	0,127	7,41	0,105	0,275	0,77
	1300	87,7	0,127	14,82	0,105	0,44	0,61
R'_e (Ω)	50	4,45	0,644	11,24	2,704	3,762	0,27
	150	27,2	0,226	5,51	0,333	3,762	4,45
	350	27,2	0,226	12,87	0,333	3,597	1,83
	1265	87,7	0,127	14,42	0,105	3,08	4,41
	1400	87,7	0,127	15,96	0,105	2,992	3,88

A eficiência do gerador para as formas que possuem frente rápida é influenciada pelas indutâncias parasitas inerentes à sua construção, resultando em valores acima do esperado ou maiores que 100 %, portanto, sem significado físico. Nos oscilogramas das formas $0,5 \times 5 \mu s$ a $0,5 \times 50 \mu s$, apresentados no ANEXO H, é possível observar o efeito das indutâncias parasitas, que modificam a forma impulsiva e adicionam sobre-elevações (*overshoot*) na região de crista. Este efeito é compensado através de métodos digitais ou manuais que reduzem o valor de crista do impulso, a fim de calcular a tensão efetiva na qual o isolamento é submetido (60). Os resultados apresentados neste trabalho para as formas com frente rápida ($0,5 \mu s$) levam em consideração a correção digital recomendada na referência (60). A Tabela 6 apresenta a sobre-elevação relativa e a tensão efetiva aplicada.

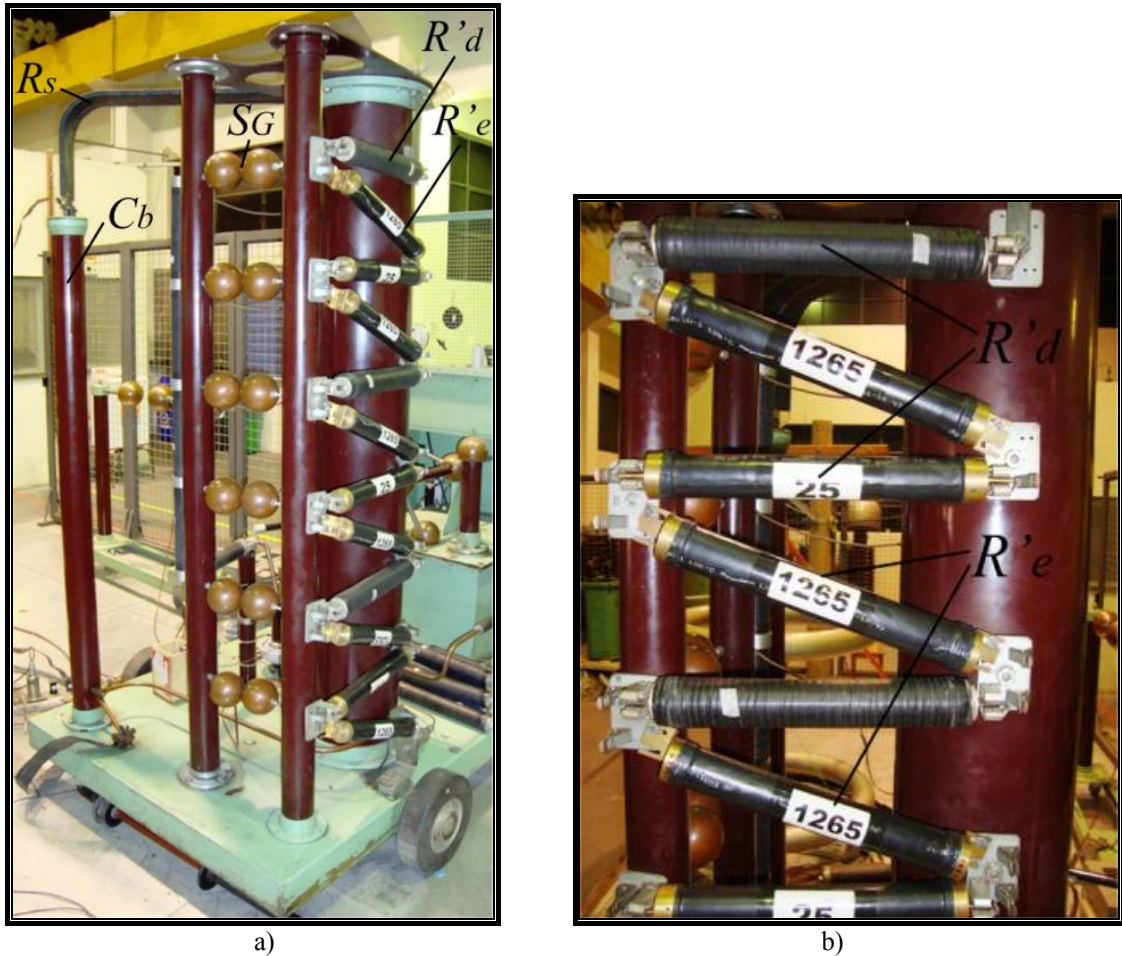


Figura 22 – a) Vista geral do gerador de impulsos. b) Detalhe dos resistores R'_d e R'_e .

Tabela 6 – Sobre-elevação relativa e tensão efetiva aplicada no isolamento.

<i>Formas (μs)</i>	<i>Sobre-elevação (%)</i>	<i>Valor de tensão real aplicado no isolamento (%)</i>
0,5 x 5	8,9	91,1
0,5 x 10	7,2	92,8
0,5 x 20	5,6	94,4
0,5 x 50	11,8	88,2

3.4 Considerações Finais

Foram necessários ajustes nos valores das resistências e alterações em algumas combinações de resistores R'_d e R'_e para a obtenção dos tempos de frente e cauda desejados, como mostra a Tabela 21 do ANEXO C. As diferenças encontradas entre os valores de projeto e os valores reais, após os ensaios, deve-se à simplificação do modelo do gerador de impulsos utilizado durante os cálculos e simulações. Neste caso não foram consideradas as indutâncias e capacitâncias parasitas inerentes do gerador. Apesar das alterações necessárias,

citadas acima, os resultados dos cálculos e simulações são bastante satisfatórios, dado que a maior variação observada foi de 33 % no resistor R'_e para a forma impulsiva $0,5 \times 5 \mu\text{s}$. Todas as alterações nas combinações dos resistores R'_d e R'_e foram realizadas utilizando os próprios resistores fabricados, com exceção dos resistores R'_e de 350Ω e 1.400Ω , que foram remanufaturados para apresentar resistências de 400Ω e 1.500Ω , respectivamente.

Durante a aplicação dos 03 níveis de tensão impulsiva para a obtenção final das formas, todos os valores para os tempos de frente e cauda apresentaram variações inferiores a $\pm 10 \%$ em relação aos valores de projeto, com exceção da forma $3 \times 10 \mu\text{s}$. Neste caso o erro médio foi de $-12,6 \%$ para o tempo de frente. Conforme comentado, a dificuldade em se obter resistências que proporcionem erros inferiores a 10% deve-se ao formato deste impulso. A combinação dos valores de capacitância C'_s e C_b do gerador em questão não favorece a obtenção de formas com tempos de frente e cauda lentos.

As formas impulsivas com tempo de frente de $0,5 \mu\text{s}$ são afetadas pelas indutâncias parasitas do gerador, apresentando tendência de sobre-elevação (*overshoot*) na crista, como pode ser observado no ANEXO H. Por este motivo todos os resultados apresentados, que envolvem a aplicação de formas com tempo de frente de $0,5 \mu\text{s}$, foram corrigidos de acordo com as recomendações internacionais através do método de correção digital (60).

O interesse na avaliação dielétrica dos isoladores mediante as formas impulsivas $2,9 \times 16,1 \mu\text{s}$ e $4,5 \times 16,1 \mu\text{s}$ deve-se ao fato de que estas foram obtidas através de simulação computacional, utilizando o código LIOV-EMTP (*Lightning Induced Overvoltage Code*) em configuração retilínea de uma linha de distribuição real, classe 25 kV. Os detalhes das simulações podem ser obtidos na referência (61).

4 Avaliação da Suportabilidade Dielétrica

A suportabilidade dielétrica de qualquer tipo de isolamento deve ser avaliada sob o ponto de vista da probabilidade de falha, utilizando abordagens estatísticas para o correto dimensionamento dos isolamentos. Em isolamentos auto-recuperantes, o parâmetro mais utilizado para a medição da suportabilidade consiste na *tensão disruptiva crítica* – $U_{50\%}$. O mesmo ocorre em isolamentos não auto-recuperantes, onde o parâmetro de suportabilidade é descrito pela Tensão Suportável de Impulso Atmosférico – TSI ou Nível Básico de Isolamento – NBI. A seleção dos parâmetros de suportabilidade de acordo com os níveis de sobretensão esperados em um sistema elétrico consiste na coordenação de isolamento (13). De maneira simplificada, a coordenação de isolamento pode ser realizada aplicando-se fatores de segurança entre os níveis de suportabilidade e as solicitações dielétricas de um sistema. Esta técnica consiste na avaliação determinística, que em muitos casos sobredimensiona o isolamento, elevando os custos envolvidos. Por outro lado, a avaliação da coordenação de isolamento do ponto de vista estatístico leva em consideração a ocorrência aleatória das solicitações e da suportabilidade do isolamento em questão. Quando empregados na coordenação de isolamento, os métodos estatísticos permitem a avaliação do risco de falha apresentado pelo isolamento para uma dada solicitação dielétrica, possibilitando o uso econômico dos materiais que o compõem.

Uma vez que os isoladores de porcelana ensaiados enquadram-se no grupo dos isolamentos auto-recuperantes, tem-se a necessidade da utilização de métodos de ensaio que determinam a distribuição de probabilidade, representativa do comportamento dielétrico mediante as solicitações de tensão de impulsiva. Os isoladores são submetidos a 13 formas impulsivas não padronizadas, além da forma padrão, apresentadas no Capítulo 3.

Este capítulo aborda os métodos de ensaio disponíveis e já consolidados para a avaliação da suportabilidade dielétrica em isolamentos auto-recuperantes quando submetidos a tensões contínuas, alternadas e impulsivas, sendo esta última o objetivo deste. Neste trabalho foi utilizado o método dos acréscimos e decréscimos, também conhecido com *up-and-down*, para a determinação da tensão $U_{50\%}$. Dentre os métodos apresentados para a determinação da tensão $U_{50\%}$, o método dos acréscimos e decréscimos é o mais utilizado, devido a sua praticidade, tempo de execução reduzido e confiabilidade no resultado obtido. Os isoladores ensaiados são submetidos ao ensaio dos acréscimos e decréscimos nas polaridades positiva e negativa, bem como nas condições a seco e sob chuva.

4.1 Definições

A seguir são definidos os termos considerados importantes no entendimento deste capítulo.

- *Isolador do tipo pino*: consiste em um isolador rígido no qual o componente isolante é montado em uma estrutura suporte por meio de um pino fixado ao interior do isolador.
- *Isolador do tipo pilar*: consiste em um isolador rígido de uma ou mais peças na qual o componente isolante é permanentemente montado em uma base metálica.
- *Média tensão*: compreende nas tensões de operação de 1,0 a 36,2 kV (6).
- *Tensão Disruptiva Crítica (Critical Flashover Voltage, CFO ou $U_{50\%}$)*: valor de tensão que resulta em 50 % de probabilidade de produzir uma descarga disruptiva no isolamento ensaiado.
- *Distância de escoamento*: consiste na menor distância ao longo do contorno da superfície externa do isolador entre as partes submetidas à tensão de operação do sistema.
- *Isolamento auto-recuperante*: o isolamento auto-recuperante ou auto-regenerativo recupera completamente suas propriedades dielétricas após a ocorrência de uma descarga disruptiva. O isolamento auto-recuperante é geralmente do tipo externo.
- *Isolamento não auto-recuperante*: o isolamento não auto-recuperante perde suas propriedades dielétricas ou não às recupera totalmente após a ocorrência de uma descarga disruptiva. O isolamento não auto-recuperante é geralmente do tipo interno.
- *Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico (NBI ou TSI)*: valor normalizado de tensão aplicado em um ensaio de tensão suportável, a fim de garantir que o isolamento está de acordo com a tensão suportável especificada.

4.2 Amostras Ensaçadas

Os isoladores ensaiados neste trabalho são dos tipos pino e pilar, fabricados em porcelana. Os isoladores do tipo pino pertencem às classes de tensão de 15 e 25 kV. Este tipo é amplamente utilizado nas concessionárias de distribuição de energia elétrica em todo o

Brasil, sendo a alternativa mais econômica quando comparado com os isoladores do tipo pilar. Por outro lado, o isolador do tipo pilar representa uma parcela pequena do número total de isoladores instalados nas redes de distribuição de média tensão. Este tipo de isolador geralmente apresenta maior distância de escoamento e maior nível de tensão disruptiva crítica. Além disso, não apresenta possibilidade de perfuração devido à concentração de campo elétrico entre o condutor energizado e a sua base metálica. Isto ocorre pelo fato deste não possuir o pino de fixação instalado internamente. Porém, o custo deste tipo de isolador é aproximadamente 04 (quatro) vezes maior do que o custo do isolador do tipo pino, impactando diretamente na construção de novas redes de média tensão. Assim como os isoladores do tipo pino, neste trabalho foram avaliados isoladores do tipo pilar para as classes 15 e 25 kV.

A Figura 23 mostra uma representação geral dos isoladores ensaiados, onde a diferença entre as classes de 15 e 25 kV para os tipos pino e pilar, ocorre apenas nas dimensões, preservando o formato e as características principais. As dimensões, bem como fotografias dos isoladores, foram omitidas a fim de preservar a identidade do fabricante.

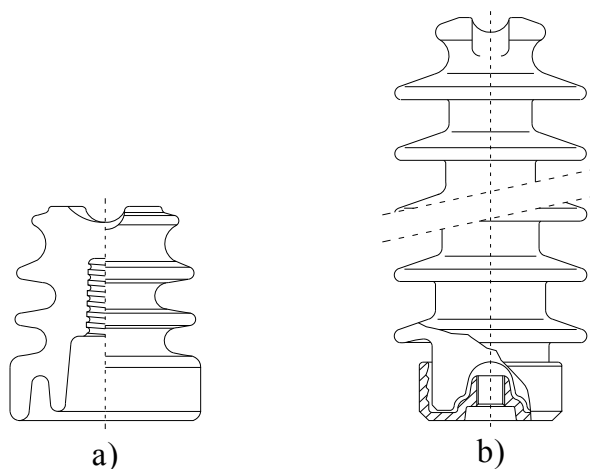


Figura 23 – a) Desenho representativo para os isoladores do tipo pino. b) Desenho representativo para os isoladores do tipo pilar.

4.3 Método dos Níveis Múltiplos (*Multiple Level Test*)

O método dos níveis múltiplos pode ser aplicado utilizando tensões alternadas, contínuas e impulsivas. Com relação à utilização de tensões alternadas e contínuas, para a avaliação da suportabilidade dielétrica de um determinado isolamento, os ensaios de tensão suportável nominal e tensão de descarga disruptiva são os mais utilizados. Os parâmetros

monitorados durante a execução do ensaio de tensão suportável nominal consistem na tensão aplicada e na duração do ensaio. Para o ensaio de tensão de descarga disruptiva observa-se a amplitude da tensão, duração até a ocorrência da descarga e número de descargas (60, 62).

Para tensões impulsivas o método em questão é normalmente utilizado na determinação da tensão suportável nominal em isolamentos auto-recuperantes. Neste caso o procedimento consiste na aplicação de n impulsos com valor de crista u_i para cada nível de tensão m , onde $i = 1, \dots, m$. Os valores de crista u_i são acrescidos de Δu ao final de n_m aplicações em um determinado nível. As grandezas de interesse neste método consistem no número de aplicações de tensão n_m e no número correspondente de descargas k_i , onde $k_i \leq n_m$ (60). Com base nestes parâmetros, a probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva f_i em cada nível de tensão m é obtida através da equação (13).

$$f_i = \frac{k_i}{n_m} \quad (13)$$

Onde:

- f_i – probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva no nível i ;
- k_i – número de descargas disruptivas no nível i ;
- n_m – número de aplicações de tensão para cada nível.

A Figura 24 mostra um exemplo, onde é apresentado diagrama com o desenvolvimento do método durante o ensaio (63). Na sequência, a Figura 25 apresenta a distribuição de probabilidades empírica, obtida através dos resultados de ensaio relacionados na Tabela 7. O item 4.6 – *Comparação dos Métodos* apresenta um exemplo de aplicação deste método utilizando o isolador do tipo pino, classe 15 kV.

Para que o método seja empregado de forma eficaz é necessário garantir que o isolamento ensaiado não sofra influência das aplicações de tensão anteriores, ou seja, deve-se garantir a independência dos resultados (disrupção ou não disrupção) a cada aplicação de tensão. Os fatores que podem influenciar nos resultados devem ser corretamente registrados, sendo estes: forma da tensão impulsiva, condições ambientes (pressão, umidade e temperatura) e características dos equipamentos de medição (63).

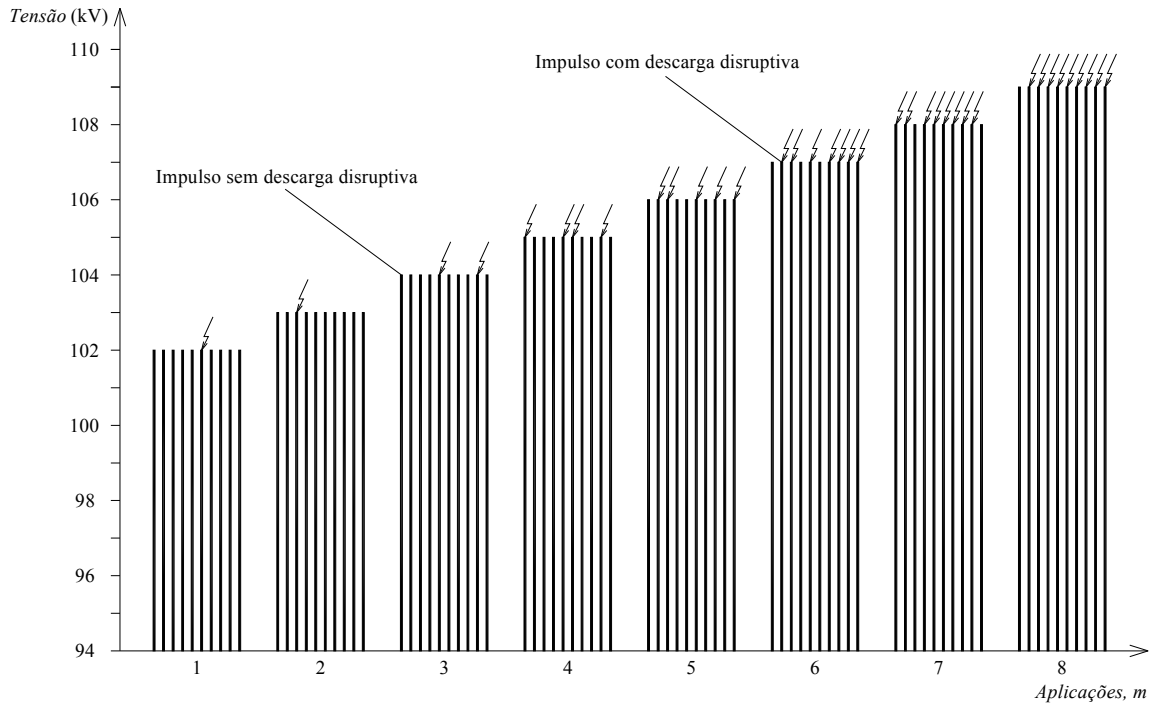


Figura 24 – Exemplo de diagrama com o desenvolvimento do método dos níveis múltiplos. Adaptado de (63).

Tabela 7 – Resumo dos parâmetros de ensaio e resultados – método dos níveis múltiplos. Adaptado de (63).

<i>Número de Níveis - m</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Tensão Ajustada (kV)</i>	102	103	104	105	106	107	108	109
<i>Número de aplicações - n_{mi}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>Número de descargas - k_i</i>	1	1	2	4	5	7	8	9
<i>Frequência de ruptura - f_i</i>	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9

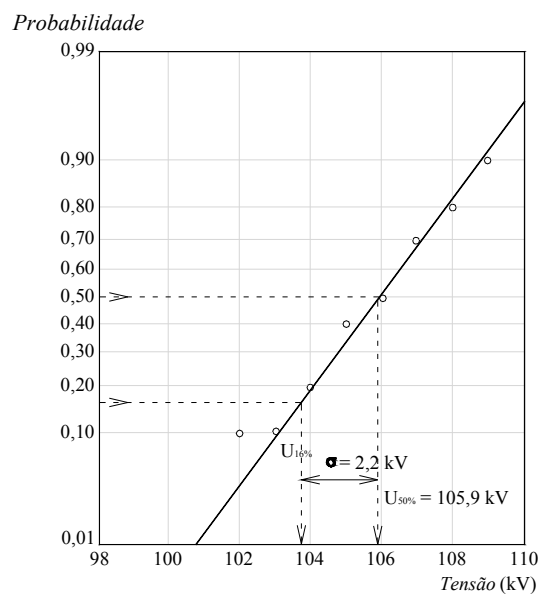


Figura 25 – Relação entre a probabilidade de ruptura e a tensão aplicada para diferentes níveis. Método dos Níveis Múltiplos. Adaptado de (63).

O número total de aplicações de tensão z , definido conforme a equação (14), é influenciado pela dispersão no processo aleatório da descarga disruptiva e pela precisão desejada no resultado. Para ensaios que envolvem isolamentos não auto-recuperantes, deve-se substituir a amostra ensaiada a cada aplicação de tensão a fim de garantir a independência dos resultados individuais (k_i). Neste caso, o intervalo Δt entre sucessivas aplicações de tensão, consiste no tempo gasto para substituir a amostra e carregar o gerador de impulsos com a tensão necessária. Considerando, isolamentos auto-recuperantes com o meio isolante composto pelo ar, a capacidade de isolamento é completamente restabelecida após a ocorrência de uma descarga, onde o intervalo entre sucessivas aplicações de tensão é caracterizado por um tempo Δt reduzido, geralmente limitado ao tempo de carregamento do gerador de impulsos. Apesar de não haver a obrigatoriedade de substituição da amostra a cada aplicação de tensão, deve-se monitorar os isolamentos que apresentam possibilidade de perfuração ao longo do ensaio.

$$z = m \cdot n_m \quad (14)$$

Onde:

- z – número total de aplicações de tensão;
- m – número de níveis utilizados;
- n_m – número de aplicações de tensão para cada nível.

O número total de níveis de tensão m e o passo de tensão Δu utilizado durante o ensaio são variáveis dependentes. Para a determinação de m , deve-se ter uma idéia dos níveis de tensão limites a serem aplicados ($u_{m\acute{a}x}$ e $u_{m\acute{i}n}$), para os quais as probabilidades de ocorrência de uma descarga disruptiva sejam maiores que zero e inferiores a unidade. A diferença entre estes limites é denominada Δu_R . Levando-se em conta um passo adequado para o ajuste de tensão no gerador de impulsos (Δu_P), o número máximo de níveis de tensão a ser utilizado no ensaio é dado pela equação (15).

$$m_T = \frac{\Delta u_R}{\Delta u_P} \quad (15)$$

Onde:

m_T – número máximo de níveis de tensão;

Δu_R – diferença entre os limites máximo e mínimo de tensão;

Δu_P – passo utilizado durante a elevação de tensão entre níveis.

Portanto $m \leq m_T$ e quando possível deve ser maior 10 (dez), para que a distribuição de probabilidade seja corretamente determinada (63). O número de aplicações n_m para cada nível m tem um efeito considerável na precisão do resultado, onde n_m pode ser determinado com base em um limite de confiança pré-estabelecido. A Figura 26 apresenta o número de aplicações necessárias com base nos intervalos de confiança superior e inferior para uma dada frequência relativa. O gráfico apresentado na Figura 26 é derivado da distribuição binomial e pode ser utilizado em qualquer ensaio dielétrico onde os parâmetros de interesse consistem na ocorrência ou não de descargas disruptivas. De acordo com a Figura 26 e considerando um ensaio que visa determinar a tensão $U_{50\%}$, são necessárias aproximadamente 100 aplicações de tensão em cada nível m para que o erro na probabilidade de descarga disruptiva Δ_P seja menor que 0,1 (63).

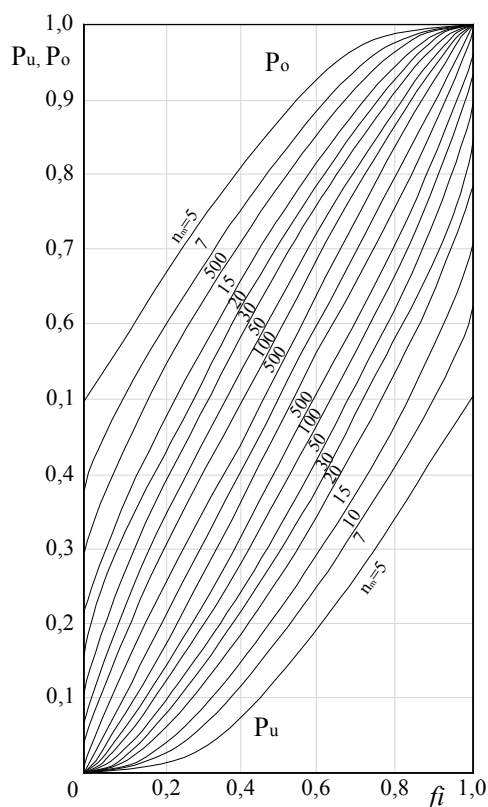


Figura 26 – Número de aplicações de tensão em função da frequência relativa e dos intervalos de confiança. O coeficiente de confiança é de 95 %. Adaptado de (63).

Para a obtenção de resultados com boa exatidão é necessária uma quantidade elevada de aplicações de tensão n_m para cada nível m , tornando o tempo total de execução do ensaio elevado e, portanto inviável, uma vez que se deseja determinar o comportamento dielétrico para diferentes tipos de isoladores e formas.

4.4 Método das Descargas Sucessivas (Rising-Voltage Test)

Assim como no método dos níveis múltiplos, o método das descargas sucessivas pode ser realizado utilizando tensões contínuas, alternadas ou impulsivas. O procedimento de ensaio leva em consideração a ocorrência de descarga disruptiva no isolamento a cada aplicação de tensão (elevação constante do valor aplicado) ou a cada conjunto de aplicações quando há a elevação do valor aplicado através de um passo previamente definido. A Figura 27 – a) mostra uma representação do método utilizando tensões alternadas e contínuas. É possível notar que a amplitude da tensão aplicada é elevada de forma constante até a ocorrência da descarga disruptiva. Neste caso o procedimento é repetido n_r vezes. Por outro lado, a Figura 27 – b) apresenta uma variação deste método, onde a elevação de tensão é realizada em passos Δu fixos. Neste caso o nível de tensão é mantido constante durante o intervalo Δt_s . O intervalo Δt_s é escolhido com base no tipo de isolamento a ser ensaiado e no resultado esperado do ensaio, podendo variar de dezenas de segundos até centenas de horas. Para ensaios de curta duração, o intervalo $\Delta t_s = 60$ s é padronizado, dado que este tempo é suficiente para avaliar a suportabilidade nominal em um isolamento.

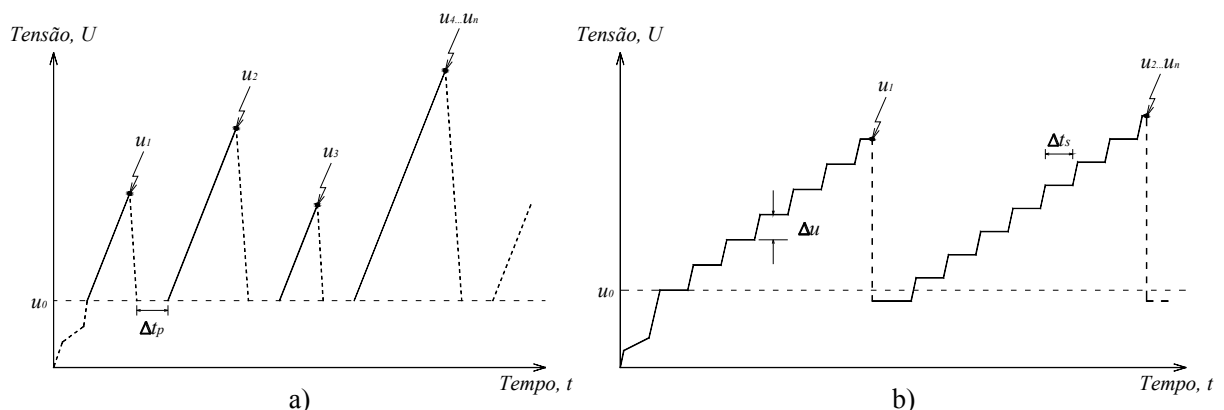


Figura 27 – a) Método das descargas sucessivas com elevação de tensão constante. b) Método das descargas sucessivas com elevação de tensão em passos Δu . Adaptado de (60).

Durante os ensaios que consideram a elevação de tensão de forma constante, os parâmetros importantes para a definição do comportamento estatístico do resultado consistem na taxa de crescimento v_u , no número de aplicações de tensão n_r , no intervalo entre as aplicações de tensão Δt_p e na tensão inicial de ensaio u_0 .

Considerando tensões impulsivas o método das descargas sucessivas é realizado elevando-se o valor de crista da tensão em passos fixos Δu , com valor inicial u_0 e intervalo de tempo Δt_p . Um exemplo de representação gráfica do método utilizando tensões impulsivas é apresentado na Figura 28 (63). A Figura 29 apresenta a distribuição de probabilidades obtida através dos resultados de ensaio relacionados na Tabela 8.

A Tabela 8 é construída com base na organização dos resultados em ordem crescente de tensão disruptiva. Primeiramente, a frequência relativa h_k é calculada através da equação 16. Em seguida, a frequência relativa acumulada $h_{\Sigma k}$ é obtida através da soma das frequências relativas a cada aplicação de tensão, conforme equação 17. A equação 16 utiliza em seu denominador $n_r + 1$, ao invés de n_r . Este fato é justificado devido ao tamanho da amostra, permitindo que todas as frequências calculadas possam ser representadas na função empírica de probabilidades. Para ensaios realizados com $n_r > 50$, o denominador $n_r + 1$ converge para n_r , bastando nestes casos utilizar apenas o tamanho da amostra n_r (63).

$$h_k = \frac{h_{mk}}{n_r + 1} \quad (16)$$

$$h_{\Sigma k} = \sum_{j=1}^k h_j \quad (17)$$

Onde:

h_k – frequência relativa;

h_{mk} – frequência absoluta;

$h_{\Sigma k}$ – frequência relativa acumulada;

k – número de descargas disruptivas no ensaio (equivale ao número de conjuntos de tensão).

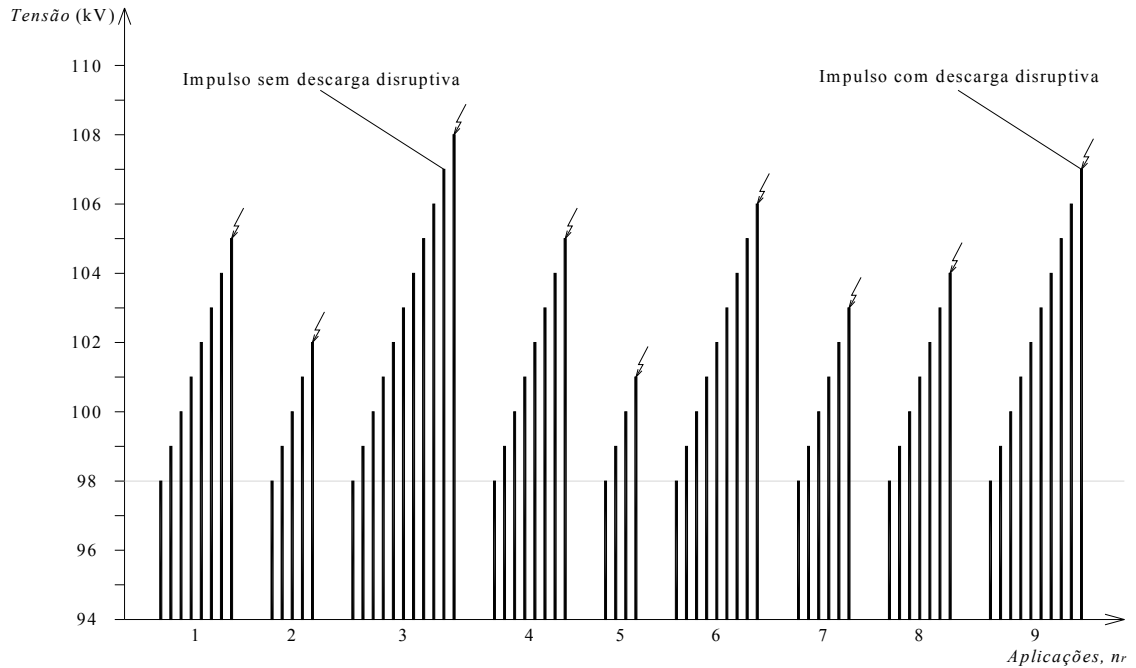


Figura 28 – Exemplo de representação do método das descargas sucessivas utilizando tensão impulsiva. Adaptado de (63).

Tabela 8 – Resumo dos principais parâmetros de ensaio – método das descargas sucessivas. Adaptado de (63).

<i>Tensão disruptiva (kV)</i>	<i>Frequência absoluta - h_{mk}</i>	<i>Frequência relativa - h_k</i>	<i>Frequência acumulada - $h_{\Sigma k}$</i>
101	1	0,100	0,100
102	1	0,100	0,200
103	1	0,100	0,300
104	1	0,100	0,400
105	2	0,200	0,600
106	1	0,100	0,700
107	1	0,100	0,800
108	1	0,100	0,900

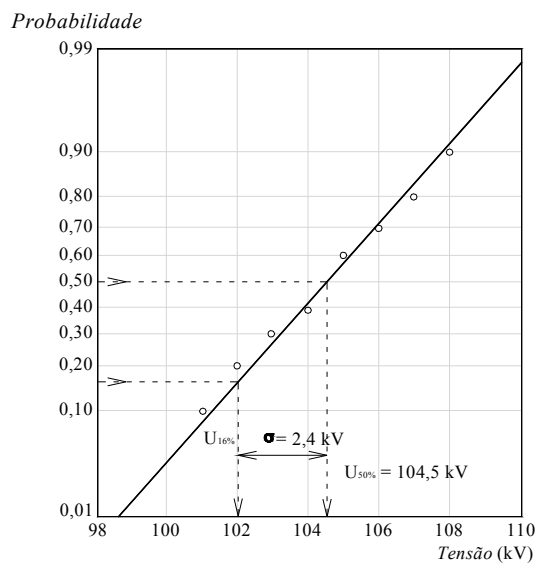


Figura 29 – Função de probabilidade acumulada. Método das Descargas Sucessivas. Adaptado de (63).

O número de aplicações n_r é determinado com base na precisão desejada no resultado, sendo estimado através do erro Δ_P esperado para o valor médio $U_{50\%}$ e do coeficiente de variação v . A Figura 30 apresenta o gráfico utilizado para a determinação de n_r , considerando um coeficiente de confiança de 95 %.

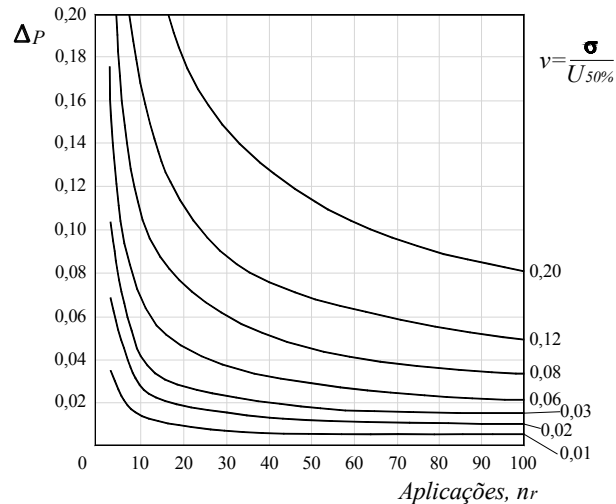


Figura 30 – Erro esperado para o valor médio em função de n_r e v . O coeficiente de confiança é de 95 %. Adaptado de (63).

Considerando a Figura 30 tem-se:

Δ_P – erro esperado para o valor médio;

v – coeficiente de variação;

σ – desvio padrão;

$U_{50\%}$ – tensão disruptiva crítica.

Observa-se na Figura 30 que para valores de $n_r > 20$ e coeficientes de variação $v < 0,08$, ocorre uma redução considerável do erro Δ_P .

Assim com no método dos níveis múltiplos, o objetivo da realização do método das descargas sucessivas é obter a relação entre a solicitação e a probabilidade de falha de um dado isolamento. Uma vez que a descarga no isolamento sempre ocorre, a variável aleatória do ensaio durante a aplicação do método consiste na amplitude da tensão em que ocorreu a descarga, com pode ser observado na Figura 28. Os valores de tensão que causam a disrupção u_1, \dots, u_n são avaliados como variáveis aleatórias contínuas, resultando na função de probabilidade acumulada.

O método das descargas sucessivas foi utilizado como base na concepção de um procedimento de ensaio para a avaliação de isolamentos não auto-recuperantes, como é o caso do isolamento de transformadores de distribuição, compostos basicamente por papel e óleo. Neste caso o procedimento é denominado *Impulso Atmosférico Escalonado – IAE*. No procedimento IAE, a tensão impulsiva é aplicada partindo-se de um nível u_0 e elevada em passos fixos Δu . A elevação de tensão é interrompida caso o NBI do transformador seja alcançado ou caso ocorra falha interna no isolamento (64). O item 4.6 – *Comparação dos Métodos* apresenta um exemplo de aplicação do método das descargas sucessivas em isolamentos auto-recuperantes, no qual é utilizado um isolador do tipo pino, classe 15 kV.

Comparado com o método dos níveis múltiplos, o método das descargas sucessivas permite a obtenção da função probabilidade acumulada através de um número reduzido de aplicações de tensão, tornando-se vantajoso neste aspecto.

4.5 *Método dos Acréscimos e Decréscimos (Up-and-Down Test)*

Na área de engenharia de alta tensão este método é aplicado através de grandezas impulsivas, geralmente tensão e corrente. As tensões impulsivas são utilizadas na avaliação da suportabilidade dielétrica de isolamentos auto-recuperantes, tais como centelhadores, isoladores, buchas, etc. Por outro lado as correntes impulsivas avaliam o desempenho mediante as características nominais de elos fusíveis, desligadores e elementos não lineares de para-raios, etc.

Ao contrário dos métodos anteriores, cujo objetivo era determinar a função de probabilidade que descreve a suportabilidade do isolamento, este método tem como objetivo determinar, de modo direto, a tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$. Alternativamente o método permite a obtenção de outros quantis, localizados nas extremidades da distribuição ($U_{10\%}$, $U_{90\%}$), mediante alterações no procedimento de ensaio. Neste item, é apresentada primeiramente a descrição original do método, proposta por Dixon e Mood (65). Em seguida, tem-se a abordagem simplificada, que conduz a resultados confiáveis e consiste na metodologia apresentada na norma IEC 60060-1 (60). A abordagem do método utilizada neste trabalho é uma composição da metodologia simplificada e das técnicas de verossimilhança, utilizadas para a obtenção dos intervalos de confiança da tensão $U_{50\%}$ e do desvio padrão σ .

4.5.1 Procedimento de Avaliação Original

O método dos acréscimos e decréscimos permite estimar de forma confiável a tensão $U_{50\%}$ quando esta segue a distribuição normal (Gaussiana), sendo capaz de fornecer também uma estimativa do desvio padrão (63).

A execução do método ocorre com a aplicação da tensão inicial u_{00} , onde não deve ocorrer descarga disruptiva. O valor de crista da tensão é então elevado em passos com amplitude fixa de Δu até que a primeira descarga disruptiva ocorra (u_1). Após a primeira descarga disruptiva, a tensão é reduzida em Δu . Se não ocorrer descarga disruptiva em $u_2 = u_1 - \Delta u$, a tensão deve ser novamente elevada em Δu , ou reduzida em caso contrário. O processo é repetido até um determinado número n_u de aplicações. A primeira vantagem do método é observada neste procedimento, onde os valores aplicados estão concentrados ao redor do valor médio (65).

Investigações mostraram que o passo de tensão Δu exerce influência no resultado final. Este fato pode ser observado na Figura 31, onde a probabilidade de ocorrência da primeira descarga disruptiva u_{d1} é menor quanto menor for o passo Δu em relação ao desvio padrão da distribuição.

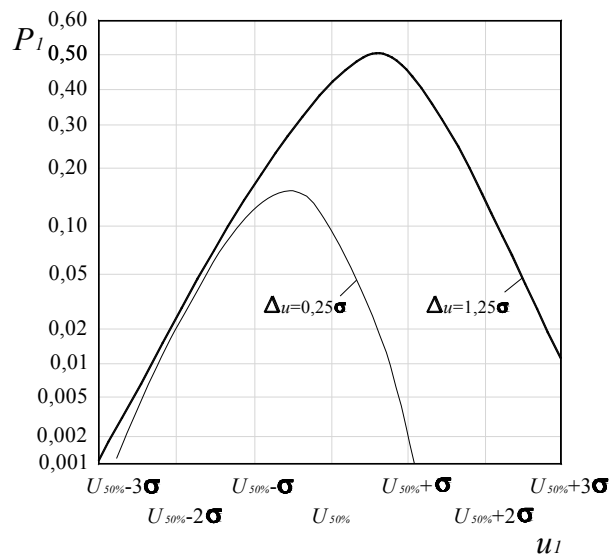


Figura 31 – Probabilidade da primeira descarga disruptiva no método dos acréscimos e decréscimos. Adaptado de (63).

As estimativas da tensão disruptiva crítica e do desvio padrão são denominadas neste item como $u_{d50}^{(*)}$ e $s^{(*)}$, respectivamente. Estes parâmetros são determinados com base no

evento (disrupção ou não disrupção) que ocorre em menor número durante as n_u aplicações de tensão. Neste caso o evento mais raro ocorre k_u vezes e o seu complementar q_u vezes, onde $n_u = k_u + q_u$. As n_u aplicações de tensão são então classificadas de acordo com a amplitude u_i . O índice $i = 0$ é correlacionado com o nível de tensão, no qual o evento mais raro ocorre primeiro e os níveis subsequentes assumem os índices $i = 1, 2, \dots, r$. A Figura 32 apresenta o desenvolvimento do método durante o ensaio e sua avaliação.

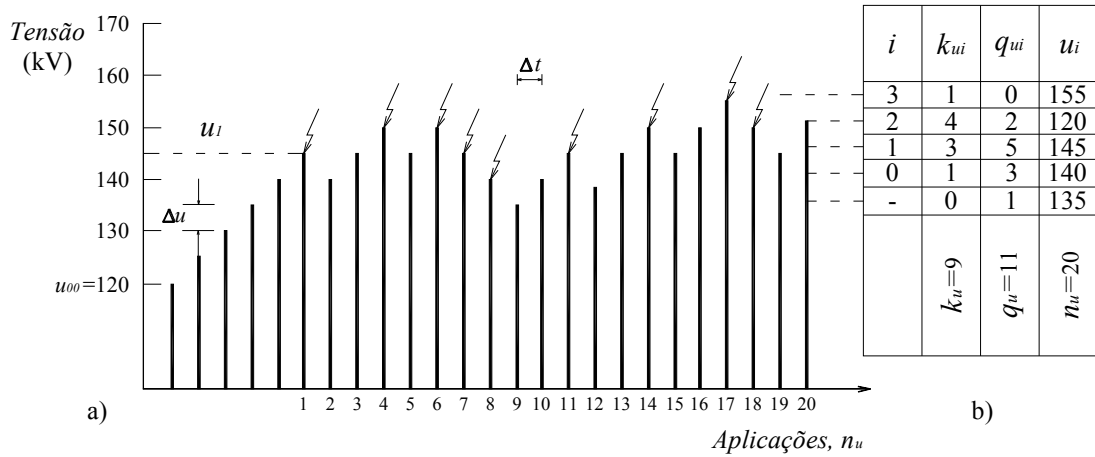


Figura 32 – a) Representação gráfica do método dos acréscimos e decréscimos. b) Avaliação do método. Adaptado de (63).

Os parâmetros $u_{d50}^{(*)}$ e o desvio padrão $s^{(*)}$ são obtidos através das equações (18) e (19), respectivamente. Se o evento que ocorre em menor número é a descarga disruptiva, o sinal (\pm) na equação (18) deve ser negativo, caso contrário, positivo.

$$u_{d50}^{(*)} = u_0 + \Delta u \left(\frac{\sum_{i=1}^r i \cdot k_{ui}}{k_u} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (18)$$

$$s^{(*)} = 1,62 \cdot \Delta u \left(\frac{k \cdot \sum_{i=1}^r i^2 \cdot k_{ui} - \left(\sum_{i=1}^r i \cdot k_{ui} \right)^2}{k_u^2} + 0,029 \right) \quad (19)$$

Onde:

u_0 – tensão na qual o evento mais raro ocorre primeiro;

Δu – passo utilizado;

k_{ui} – é o número de ocorrências do evento mais raro no nível i_{th} ;

k_u – número de ocorrências do evento mais raro;

r – número de níveis, excluindo o nível com índice $i = 0$.

A fim de calcular o intervalo de confiança para os parâmetros $u_{d50}^{(*)}$ é necessário obter o desvio padrão amostral s_m para a média. A obtenção do desvio s_m é realizada de forma semelhante o procedimento apresentado na equação (20). Porém neste caso a referência (65) mostra que é necessário adicionar um fator de correção G , transformando-a na equação (21). O fator G tem como objetivo compensar a influência do passo Δu em relação ao desvio padrão estimado $s^{(*)}$, sendo obtido através da Figura 33. Desta forma os valores máximo e mínimo de $u_{d50}^{(*)}$ são obtidos através da equação (22) para um grau de confiança de 95 %.

$$s_m = \frac{s^{(*)}}{\sqrt{k_u}} \quad (20)$$

$$s_{mc} = G \frac{s^{(*)}}{\sqrt{k_u}} \quad (21)$$

$$u_{d50,min,máx} = u_{d50}^{(*)} \pm 1,96 \cdot s_{mc} \quad (22)$$

Onde:

s_m – desvio padrão amostral;

s_{mc} – desvio padrão amostral corrigido com base no fator G ;

G – fator de correção G ;

$u_{d50,min,máx}$ – intervalo de confiança da tensão $u_{d50\%}^{(*)}$.

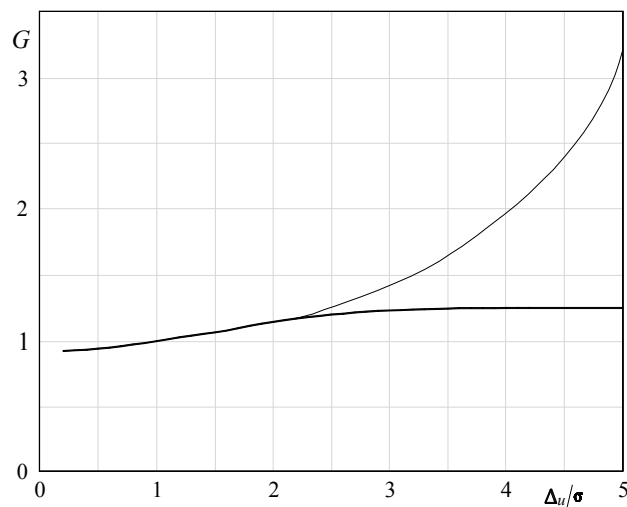


Figura 33 – Fator G para correção do desvio padrão amostral. Utilizar a linha cheia quando $\Delta u / \sigma$ for um número inteiro. Interpolar G entre a linha cheia e a linha fina em caso contrário. Adaptado de (65).

As variações em torno do valor real de $U_{50\%}$ são maiores quanto menor for o número de aplicações n_u e o passo Δu selecionados. Uma estimativa útil do passo Δu consiste em considerá-lo próximo do desvio padrão ou escolher o número mais prático de ser utilizado em cada aplicação, com base nos limites de 1 % a 10 % de $u_{d50}^{(*)}$ (63, 65).

4.5.2 Procedimento de Avaliação Padronizado

O procedimento para a utilização do método dos acréscimos e decréscimos previsto na norma IEC 60060-1 (60) é semelhante ao descrito no item 4.5.1, com pequenas diferenças na contabilização do primeiro nível e no método de avaliação. A tensão inicial aplicada u_{00} não deve causar a disrupção no isolamento ensaiado. O valor de crista da tensão é então elevado em passos com amplitude fixa Δu até que a primeira descarga disruptiva ocorra. Após a primeira descarga disruptiva, a tensão é reduzida em Δu . Se não ocorrer descarga disruptiva no nível $u_2 = u_1 - \Delta u$, a tensão deve ser novamente elevada em Δu , ou reduzida em caso contrário. O primeiro nível u_0 , a ser considerado nas avaliações consiste naquele em que pelo menos duas aplicações ocorreram previamente (disrupção ou não disrupção).

A Tabela 9 apresenta a representação gráfica utilizada durante a aplicação do método na forma padronizada. Nota-se que o nível u_0 é aquele no qual já existem pelo menos duas aplicações de tensão.

Tabela 9 – Desenvolvimento do método dos acréscimos e decréscimos padronizado.

<i>Tensão Aplicada</i>	<i>Aplicações</i>												
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>...</i>	<i>n</i>
\vdots													
u_i													
u_3				X									
u_2			0		X						X		X
u_1		0				X		X		0		...	
u_0	0						0		0				
\vdots													

Recomenda-se que o valor de Δu deve permanecer entre 3 % e 5 % da tensão $U_{50\%}$ obtida e o número total de aplicações n_u deve ser superior a 15 (60). Durante a aplicação do método neste trabalho o número total de aplicações foi fixado em 35. A cada impulso aplicado são registrados o tipo do evento (disrupção, X, ou não disrupção, 0) e a tensão de crista medida através do osciloscópio. A correção dos resultados para as condições

atmosféricas padrão também foi realizada a fim de possibilitar comparações entre resultados padronizados e os resultados para diferentes condições ambientes. Por este motivo são registrados os valores de temperatura, umidade relativa do ar e pressão no local de ensaio em três instantes distintos.

A tensão $U_{50\%}$ e o desvio padrão σ podem ser estimados através das equações (23) e (24), respectivamente. As avaliações de suportabilidade utilizando estas equações consideram que a probabilidade de ocorrência de descargas disruptivas no isolamento é representada por uma distribuição normal (Gaussiana). Esta premissa é frequentemente comprovada em ensaios que envolvem isolamentos auto-recuperantes, validando desta forma a abordagem estatística utilizada.

$$U_{50\%} = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^N u_i \cdot k_{ui} \quad (23)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_u - 1} \sum_{i=1}^{n_u} (u_i - U_{50\%})^2} \quad (24)$$

Onde:

$U_{50\%}$ – tensão disruptiva crítica;

u_i – valor de crista da tensão impulsiva aplicada no nível i ;

σ – desvio padrão;

n_u – número total de aplicações;

N – número de níveis de tensão aplicados;

k_{ui} – número de eventos em cada nível (X ou 0).

Assim como nos métodos dos níveis múltiplos e das descargas sucessivas, o método dos acréscimos e decréscimos também permite estimar a tensão correspondente a probabilidades diferentes de 50 %, bastando para isso realizar algumas modificações no procedimento de ensaio. Estas modificações foram propostas pelos pesquisadores Carrara e Dellera, resultando no *Método dos Acréscimos e Decréscimos Estendido*. Da mesma forma que no método padronizado, o método estendido assume que a função de probabilidade acumulada das tensões aplicadas no isolamento é representada por uma distribuição normal (Gaussiana). Esta premissa é constantemente confirmada na prática (63, 66).

O método dos acréscimos e decréscimos estendido utiliza $M > 1$, onde M é o número de aplicações de tensão consecutivas no mesmo nível. Para a obtenção da tensão $U_{50\%}$ no método padronizado tem-se que $M = 1$, conforme pode ser observado na Tabela 9. O próximo nível de tensão no método estendido será superior ao anterior caso ocorram M aplicações consecutivas sem interrupção, ou será inferior ao anterior caso ocorra 01 (uma) interrupção. A Figura 34 apresenta um exemplo de aplicação do método estendido para $M = 7$, que resulta na tensão $U_{10\%}$.

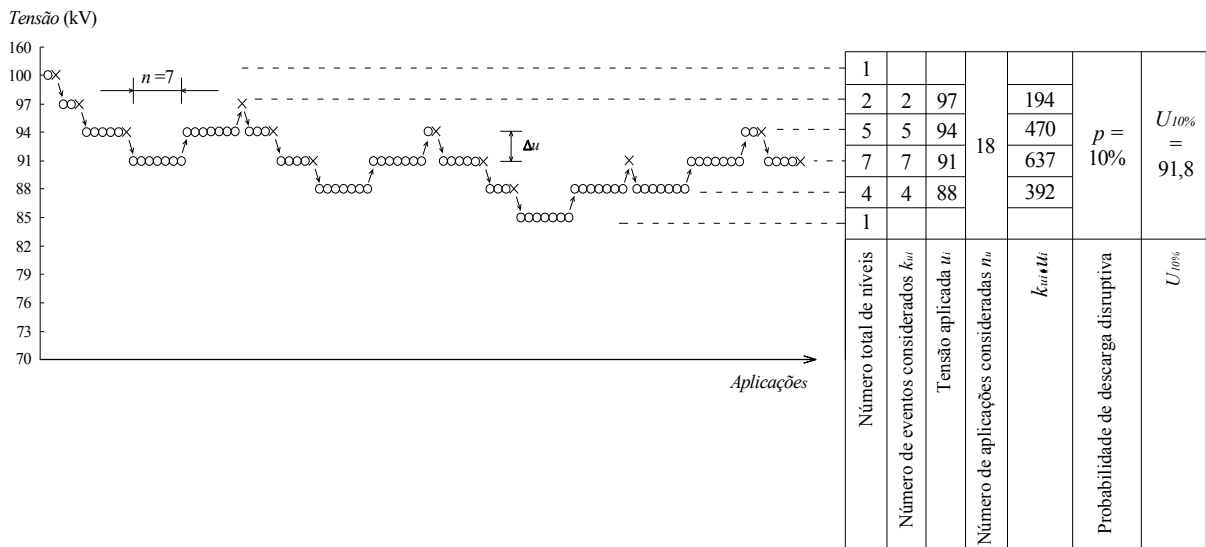


Figura 34 – Exemplo de aplicação do método dos acréscimos e decréscimos estendido para $M = 7$, que resulta na tensão $U_{10\%}$. Adaptado de (60).

O método em questão também pode ser utilizado para a determinação da tensão $U_{90\%}$, bastando considerar as interrupções consecutivas dentro da série (X), ao invés da não interrupção (O). A tensão $U_{10\%}$ corresponde ao NBI estatístico, na qual o isolamento apresenta 90 % de probabilidade de suportar um conjunto de aplicações de tensão. O NBI estatístico é aplicável apenas em isolamentos auto-recuperantes (13). Para maiores detalhes referentes ao método, suas modificações e exemplos de aplicação, recomenda-se as referências (60, 63, 66, 67).

4.5.3 Procedimento de Avaliação Através da Distribuição de Weibull

A função que descreve a probabilidade de ocorrência da descarga disruptiva no isolamento – $P(U)$ é geralmente do tipo crescente, traduzindo um aumento da probabilidade na medida em que a amplitude da tensão é elevada. Conforme comentado, a função $P(U)$ pode ser representada matematicamente pela distribuição normal (Gaussiana) para a maioria dos

ensaios que envolvem isolamentos auto-recuperantes. Devido a este fato, a utilização desta função não está relacionada com significado físico envolvido no ensaio, uma vez que as descargas disruptivas não ocorrem para tensões $U \leq u_{00}$. Neste sentido, outras distribuições podem representar de forma mais adequada o comportamento físico do isolamento, como é o caso da distribuição de Weibull. A distribuição de Weibull permite representar a suportabilidade do isolamento quando $U \leq u_{00}$, bastando para isso truncar a função $P(U)$ em $u_{00} = U_{50\%} - 4\sigma$ (68). Outra característica que concede vantagem à distribuição de Weibull é a sua simplicidade matemática e facilidade de implementação em programas computacionais.

A equação (25) mostra a função distribuição de Weibull – $P(X)$ na sua forma original.

$$P(X) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^\beta} \quad (25)$$

Onde:

- X – variável aleatória;
- δ – parâmetro de posição;
- α – parâmetro de escala;
- β – parâmetro de forma.

A equação (25) pode ser alterada a fim de representar a probabilidade da descarga disruptiva em um isolamento auto-recuperante fazendo com que o parâmetro de posição seja truncado conforme a equação (26). Através das equações (26) e (27) é possível relacionar os parâmetros de escala e forma, resultando na equação (28).

$$\delta = U_{50\%} - n_d \sigma \quad (26)$$

$$P(U_{50\%}) = 0,5 \quad (27)$$

Aplicando as equações (26) e (27) na equação (25), tem-se:

$$0,5 = 1 - e^{-\left(\frac{U_{50\%} - U_{50\%} + n_d \sigma}{\alpha}\right)^\beta}$$

Que resulta na equação (28).

$$\alpha = \frac{n_d \sigma}{\sqrt[\beta]{\ln 2}} \quad (28)$$

Onde:

n_d – número de desvios padrão utilizado para truncar a função $P(X)$. Este parâmetro normalmente varia entre 3 e 4 (68, 69). Neste trabalho considera-se $n_d = 4$.

σ – desvio padrão.

Aplicando as equações (26) e (28) na equação (25), tem-se a distribuição de Weibull – $P(U)$ adaptada para a avaliação de ensaios dielétricos conforme mostra a equação (29).

$$P(U) = 1 - 0,5 \left(1 + \frac{U - U_{50\%}}{n_d \sigma} \right)^\beta \quad (29)$$

Os parâmetros n_d e β relacionam-se na equação (31), que é obtida através da probabilidade correspondente a 01 (um) desvio padrão, conforme equação (30).

$$P(U_{50\%} - \sigma) = 0,16 \quad (30)$$

Aplicando a equação (30) na equação (29), tem-se:

$$0,16 = 1 - 0,5 \left(1 + \frac{U_{50\%} - \sigma - U_{50\%}}{n_d \sigma} \right)^\beta$$

Que resulta na equação (31).

$$\beta = \frac{1,38}{\ln \left(\frac{n_d}{n_d - 1} \right)} \quad (31)$$

A utilização de $n_d = 4$ na equação (31), resulta no parâmetro de forma $\beta = 4,8$.

Os resultados apresentados neste trabalho utilizam a abordagem descrita neste item, com a solução da equação (29) através do *Método de Verossimilhança*. Este método baseia-se

na maximização da função de verossimilhança – L_v a fim de determinar o valor mais provável da tensão $U_{50\%}$ e do desvio padrão σ , bem como seus intervalos de confiança. A determinação do valor mais provável utilizando o método de verossimilhança demanda processos iterativos, sendo necessária a utilização de programas computacionais. Os resultados apresentados no *Capítulo 5 – Resultados dos Ensaios e Análises* e no ANEXO G fazem uso do programa computacional desenvolvido por Gianguido Carrara, posteriormente atualizado e aprimorado pelo LAT-EFEI (70). Para um aprofundamento sobre o procedimento de avaliação através da distribuição de Weibull e sobre o método de verossimilhança, aplicado na avaliação de ensaios dielétricos, recomenda-se consultar as referências (67, 69, 71, 72).

4.6 Comparação dos Métodos

Neste item são apresentados exemplos práticos de aplicação para cada método de avaliação da suportabilidade dielétrica, abordada nos itens 4.3 a 4.5. Com base nos resultados, são realizadas também comparações em termos de praticidade e eficiência do método, tornando evidente a utilização do método os acréscimos e decréscimos através da abordagem padronizada ou através da Distribuição de Weibull.

Os exemplos apresentados nos itens *a)* a *e)* consideram o isolador do tipo pino, classe 15 kV, a ser ensaiado na forma 1,2 x 50 μ s. Os ensaios são realizados na condição a seco, polaridade positiva.

a) Método dos Níveis Múltiplos

De acordo com o item 4.3 – *Método dos Níveis Múltiplos*, a determinação do número total de níveis m a serem utilizados depende dos limites de tensão $u_{m\acute{a}x}$ e $u_{m\acute{i}n}$ para os quais as probabilidades de ocorrência de uma descarga disruptiva sejam maiores que zero e inferiores a unidade. Estes parâmetros foram obtidos através do ensaio para determinação da curva $V \times t$, realizado anteriormente neste isolador. Neste ensaio, observou-se que $u_{m\acute{a}x}$ e $u_{m\acute{i}n}$ situam-se em torno de 112,8 e 103,8 kV, respectivamente. Considerando um passo $\Delta u \approx 0,9$ kV, possível de ser ajustado no gerador de impulsos, tem-se através da equação (15) que o número teórico de níveis possíveis de serem ajustados no gerador de impulsos é $m_T = 11$. A norma IEC 60060-1 (60) recomenda a utilização de $m \geq 5$ e $n_m \geq 10$. Neste ensaio será utilizado $n_m = 10$ e $\Delta t = 10$ s. O diagrama contendo o procedimento de ensaio é apresentado no ANEXO D, para

o qual os resultados estão resumidos na Tabela 10. Os valores de tensão apresentados estão corrigidos para as condições atmosféricas padrão. O número de descargas k_i é obtido por inspeção na Figura 46, enquanto a frequência de disrupção f_i é resultado da equação (13).

Tabela 10 – Resultados do ensaio utilizando o método dos níveis múltiplos. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.

Número de Níveis - m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Tensão Ajustada (kV)	105,3	106,1	107,0	107,9	108,8	109,6	110,5	111,4	112,3	113,1	114,0	114,9	115,8
Número de aplicações - n_{mi}	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Número de descargas - k_i	1	0	2	1	3	1	5	6	6	5	8	7	9
Frequência de disrupção - f_i	0,1	-	0,2	0,1	0,3	0,1	0,5	0,6	0,6	0,5	0,8	0,7	0,9

A partir dos resultados apresentados na Tabela 10 é possível determinar a relação entre a tensão aplicada e a probabilidade de ocorrência da descarga disruptiva no isolador, conforme apresentado na Figura 35.

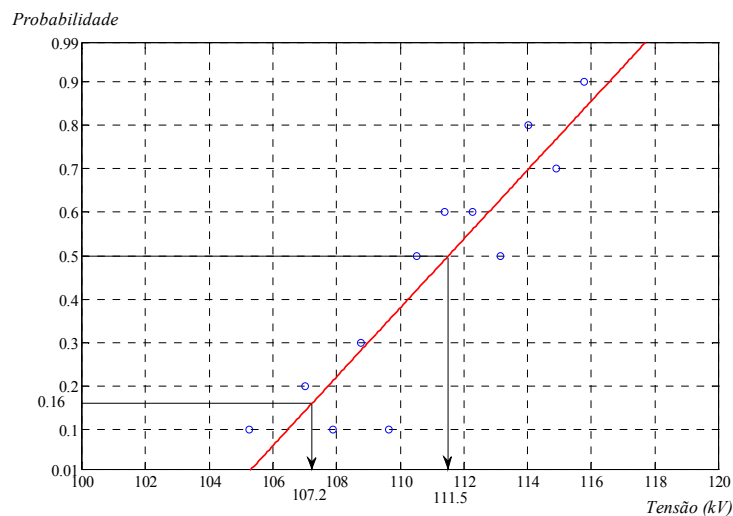


Figura 35 – Função probabilidade de descarga disruptiva empírica para o método dos níveis múltiplos. Coeficiente de determinação $R^2 = 0,822$.

A interpolação linear dos resultados apresentados na Figura 35 resulta em $U_{50\%} = 111,5$ kV e $\sigma = 4,3$ kV. Observa-se na Figura 35 que existe uma dispersão nos resultados, contribuindo para um coeficiente de determinação relativamente baixo. Este fato indica que as 130 aplicações de tensão utilizadas no ensaio são insuficientes para a determinação satisfatória da função probabilidade de descarga disruptiva. A referência (69) mostra uma comparação entre dois ensaios que utilizam o método dos níveis múltiplos com $n_m = 10$ e $n_m = 20$, no qual o resultado considerando $n_m = 20$ encontra-se consideravelmente mais próximo do valor teórico esperado da tensão $U_{50\%}$.

b) Método das Descargas Sucessivas

O procedimento para a aplicação do método das descargas sucessivas descrito no item 4.4 - *Método das Descargas Sucessivas* se inicia com a escolha de nível de tensão u_0 no qual há a garantia de que não ocorra descarga disruptiva. O valor de tensão u_0 recomendado pela referencia (63) consiste em adotar aproximadamente 90 % do menor nível de tensão que ocasiona descarga disruptiva. Com base na Tabela 10 tem-se que $u_0 \approx 96$ kV. Para este ensaio foi utilizado um passo $\Delta u \approx 1,5$ kV, $\Delta t_p = 10$ s e $n_r = 10$, onde n_r corresponde ao conjunto de aplicações de tensão que resultam em descargas disruptivas. O diagrama contendo o procedimento de ensaio é apresentado no ANEXO E, para o qual os resultados estão resumidos na Tabela 11. Os valores de tensão apresentados estão corrigidos para as condições atmosféricas padrão. As colunas *Frequência relativa* - h_k e *Frequência relativa acumulada* - $h_{\Sigma k}$ são calculadas através das equações 16 e 17, respectivamente.

Tabela 11 – Resultados do ensaio utilizando o método das descargas sucessivas. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.

<i>Tensão disruptiva (kV)</i>	<i>Frequência absoluta - h_{mk}</i>	<i>Frequência relativa - h_k</i>	<i>Frequência acumulada - $h_{\Sigma k}$</i>
105,3	2	0,182	0,182
106,7	1	0,091	0,273
109,6	2	0,182	0,455
111,1	3	0,273	0,727
112,6	2	0,182	0,909

A partir dos resultados apresentados na Tabela 11 é possível determinar a relação entre a tensão aplicada e a probabilidade de ocorrência da descarga disruptiva no isolador, conforme apresentado na Figura 36.

A interpolação linear na Figura 36 resulta em $U_{50\%} = 109,0$ kV e $\sigma = 3,5$ kV. Ao contrário do método dos níveis múltiplos, observa-se neste caso um aumento do coeficiente de determinação. Isto se deve ao fato de que os resultados de cada aplicação de tensão são ordenados antes de compor a distribuição de probabilidades da Figura 36, não traduzindo necessariamente em aumento da precisão no resultado. Apesar do número menor de aplicações de tensão, quando comparado com o método dos níveis múltiplos, as 99 aplicações realizadas neste caso inviabilizam a execução do método considerando as 13 formas não padronizadas.

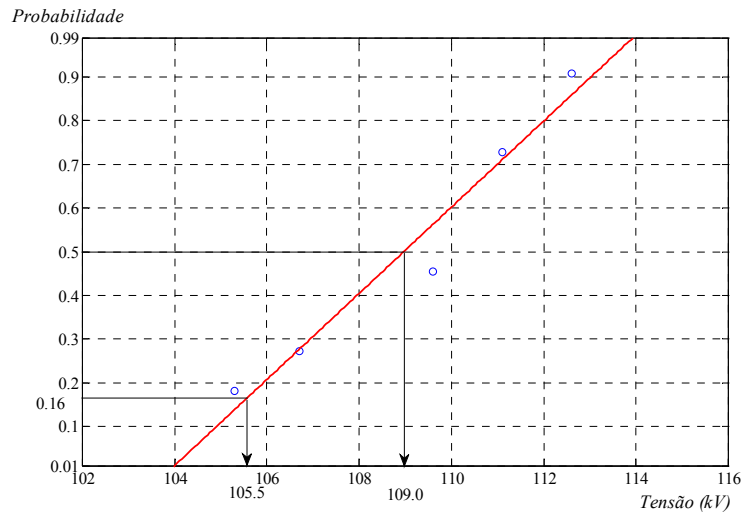


Figura 36 – Frequência acumulada de descargas disruptivas para o método das descargas sucessivas. Coeficiente de determinação $R^2 = 0,956$.

c) Avaliação do Método dos Acréscimos e Decréscimos Original

O método dos acréscimos e decréscimos é avaliado para as três abordagens apresentadas neste trabalho, correspondendo aos itens 4.5.1 a 4.5.3. A Tabela 22 do ANEXO F apresenta o diagrama relativo ao desenvolvimento do ensaio, onde o passo $\Delta u \approx 1,5$ kV e o número de aplicações $n_u = 35$. Este diagrama é utilizado como exemplo para a avaliação dos três.

Conforme descrito no item 4.5.1 – *Procedimento de Avaliação Original*, deve-se identificar na Tabela 22, qual evento é o mais raro (disrupção ou não disrupção). O evento mais raro neste caso é a disrupção, ou seja, $k_u = 16$ e consequentemente $q_u = 19$, totalizando $n_u = 35$ aplicações. O índice $i = 0$ é alocado para o primeiro nível de tensão u_i que apresentar o evento mais raro, ou seja, a disrupção. Portanto, $u_0 = 113,36$ kV. Deste nível em diante, os demais recebem os índices $i = 1, 2$ e 3 . Os parâmetros k_{ui} e q_{ui} são obtidos por inspeção direta na Tabela 22. A Tabela 12 apresenta o resumo dos parâmetros a serem utilizados nas equações (18) e (19) para o cálculo da tensão $U_{50\%}$ e do desvio padrão σ , respectivamente.

Tabela 12 – Resumo dos parâmetros para o método dos acréscimos e decréscimos original. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.

Nível - i	Tensão aplicada u_i (kV)	Número de disrupções k_{ui}	Número de não disrupções q_{ui}
3	117,8	5	0
2	116,3	7	5
1	114,8	2	8
0	113,4	2	3
-	111,9	0	3

A partir das equações (18) e (19), tem-se:

$$U_{50\%} = 113,36 + 1,5 \left(\frac{1 \cdot 2 + 2 \cdot 7 + 3 \cdot 5}{16} - \frac{1}{2} \right)$$

$$U_{50\%} = 115,5 \text{ kV}$$

$$\sigma = 1,62 \cdot 1,5 \left[\frac{16 \cdot (1 \cdot 2 + 2^2 \cdot 7 + 3^2 \cdot 5) - 31^2}{16^2} + 0,029 \right]$$

$$\sigma = 2,3 \text{ kV}$$

d) Avaliação do Método dos Acréscimos e Decréscimos Padronizado

O procedimento de avaliação para o método dos acréscimos e decréscimos padronizado leva em consideração todos os eventos apresentados na Tabela 22 do ANEXO F. Desta forma tem-se que $n_u = 35$ e $N = 5$. Os demais parâmetros u_i e k_{ui} são obtidos por inspeção direta na Tabela 22. A Tabela 13 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da tensão $U_{50\%}$ e do desvio padrão σ .

Tabela 13 – Resumo dos parâmetros para o método dos acréscimos e decréscimos padronizado. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.

<i>Tensão aplicada u_i (kV)</i>	<i>Número de interrupções k_{ui}</i>	<i>Número de não interrupções q_{ui}</i>	<i>Total de aplicações $k_{ui}+q_{ui}$</i>
117,8	5	0	5
116,3	7	5	12
114,8	2	8	10
113,4	2	3	5
111,9	0	3	3

A aplicação das equações (23) e (24) resulta em:

$$U_{50\%} = \frac{111,88 \cdot 3 + 113,36 \cdot 5 + 114,83 \cdot 10 + 116,30 \cdot 12 + 117,77 \cdot 5}{35}$$

$$U_{50\%} = 115,3 \text{ kV}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{35-1} \left[3 \cdot (111,88-115,3)^2 + 5 \cdot (113,36-115,3)^2 + 10 \cdot (114,83-115,3)^2 + 12 \cdot (116,30-115,3)^2 + 5 \cdot (117,77-115,3)^2 \right]}$$

$$\sigma = 1,70 \text{ kV}$$

e) Avaliação Método dos Acréscimos e Decréscimos Através da Distribuição de Weibull

O procedimento de avaliação para o método dos acréscimos e decréscimos utilizando a Distribuição de Weibull leva em consideração o resumo dos parâmetros apresentados na Tabela 13. No programa computacional que determina a tensão $U_{50\%}$, o desvio padrão σ e seus respectivos intervalos de confiança, são inseridos os níveis de tensão u_i , número de descargas disruptivas k_{ui} e o número de descargas sem interrupção q_{ui} . É inserido também o número de desvios padrão considerados $n_d = 4$, o que resulta no parâmetro de forma $\beta = 4,8$.

A Tabela 14 apresenta os resultados após a avaliação da equação (29) através do método de verossimilhança.

Tabela 14 – Resultados da avaliação através do método dos acréscimos e decréscimos utilizando a Distribuição de Weibull. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.

Parâmetro	Valor mínimo (kV)	Valor Médio (kV)	Valor máximo (kV)
$U_{50\%}$	114,4	115,6	117,1
σ	1,2	2,1	6,7

A Tabela 15 resume os resultados apresentados nos itens **a)** a **e)**. As colunas *Varição (%)* relacionam a variação percentual dos parâmetros $U_{50\%}$ e σ em relação ao método de avaliação utilizando a Distribuição de Weibull.

Tabela 15 – Resumo dos resultados e comparação dos métodos.

Método	$U_{50\%}$ (kV)	Varição (%)	σ (kV)	Varição (%)
<i>Níveis Múltiplos</i>	111,5	-3,5	4,29	104,3
<i>Descargas Sucessivas</i>	109,0	-5,7	3,45	64,3
<i>Acréscimos e Decréscimos Original</i>	115,5	-0,1	2,30	9,5
<i>Acréscimos e Decréscimos Padronizado</i>	115,3	-0,3	1,70	-19,0
<i>Acréscimos e Decréscimos Weibull</i>	115,6	-	2,10	-

As comparações apresentadas na Tabela 15 indicam a concordância nos resultados em relação à tensão $U_{50\%}$, onde a maior variação observada é de -5,7 %. Nota-se também que resultados similares são obtidos para as três abordagens do método dos acréscimos e decréscimos. Por outro lado, o desvio padrão σ apresenta maiores variações em relação à abordagem de Weibull, chegando a 104,3 % no método dos níveis múltiplos. Dado que, neste trabalho, o método de avaliação utilizando a Distribuição de Weibull permite a obtenção dos limites inferior e superior para a tensão $U_{50\%}$ e para o desvio padrão σ , pode-se considerar que todos os resultados apresentados no método dos acréscimos e decréscimos são equivalentes do ponto de vista estatístico. O mesmo não pode ser afirmado para os métodos dos níveis múltiplos e das descargas sucessivas, que apresentaram violação do limite inferior para a tensão $U_{50\%}$.

Portanto, o método dos acréscimos e decréscimos, em especial a abordagem através da Distribuição de Weibull, é capaz de fornecer resultados satisfatórios e estáveis em termos da tensão $U_{50\%}$, utilizando apenas 35 aplicações de tensão. Por este motivo o método em questão foi utilizado em todas as avaliações apresentadas no item 5 – *Resultados dos Ensaios e Análises*.

4.7 *Garantindo Independência nos Ensaios*

Durante a execução dos ensaios para a avaliação da suportabilidade dielétrica de um determinado isolamento, é necessário garantir independência do resultado a cada aplicação de tensão (disrupção ou não disrupção). Caso contrário, o resultado final será tendencioso, invalidando o ensaio. Se uma nova amostra não for utilizada para cada aplicação de tensão a independência mútua entre as aplicações de tensão deve ser verificada. A dependência dos resultados de uma determinada aplicação de tensão nas aplicações anteriores é causada por alterações físicas no material isolante, forma da tensão aplicada (alternada, contínua ou impulsiva), energia consumida nas descargas parciais e de disrupção, bem como pelo intervalo de tempo escolhido entre as aplicações.

Em ensaios dielétricos realizados em eletrodos, a dependência é geralmente detectada devido a alterações decorrentes de descargas parciais ou disruptivas. Eletrodos com raios de curvatura relativamente reduzidos estão propensos a sofrerem os efeitos da erosão. Para eletrodos com pequenas superfícies, ocorre o surgimento de rugosidades e a formação de

resíduos não metálicos. Estes fatores influenciam na independência dos resultados durante sucessivas aplicações de tensão.

Para o caso de isolamentos compostos de gás comprimido, além dos efeitos observados nos isolamentos auto-recuperantes em ar, ocorrem também alterações no espaço onde o gás está confinado. Primeiramente, as descargas disruptivas desencadeiam reações químicas e, portanto, acarretam alterações na composição do gás. Além disso, o processo de formação de descargas cria espaços vazios de carga, que se recombina de forma mais lenta. Caso a próxima aplicação de tensão ocorra imediatamente após a última descarga disruptiva, antes das cargas se recombinarem, existe uma diferença na distribuição de campo, que influencia no desenvolvimento da descarga disruptiva atual, comparado com o caso em que não há cargas livres no gás.

Os efeitos observados em isolamentos líquidos são semelhantes aos efeitos para o gás comprimido, porém neste caso as alterações químicas devido às descargas são mais intensas e a mobilidade dos espaços vazios de cargas é menor. O método de ensaio utilizando os níveis múltiplos pode ser realizado neste tipo de isolamento com cautela, respeitando os intervalos de tempo para a recomposição do meio.

Em isolamentos sólidos não há como realizar mais de uma aplicação de tensão para a mesma amostra, uma vez que as descargas danificam de forma irreversível a estrutura do material. Desta forma para cada aplicação de tensão deve ser utilizada uma nova amostra, garantindo a independência dos resultados. Em alguns casos o ensaio é inviabilizado devido ao custo no fornecimento de novas amostras.

Para o caso de isolamentos auto-recuperantes, o volume de ar ao redor da amostra ensaiada garante uma constante renovação do meio isolante, ou seja, em intervalos de segundos, os efeitos do arco estabelecido na última descarga disruptiva não são detectados na descarga seguinte. Porém, quando da aplicação de centenas de impulsos em isolamentos auto-recuperantes, estes podem apresentar indícios de perfuração. Este é o caso dos isoladores do tipo pino, que neste trabalho, são substituídos a cada conjunto de 02 ensaios para a determinação da tensão $U_{50\%}$. O mesmo não ocorre para os isoladores do tipo pilar, onde não existe o fenômeno da perfuração. Porém é necessária sua substituição a cada 04 ensaios (condições a seco e sob chuva, polaridades positiva e negativa) devido à ocorrência de desgaste do esmalte presente na superfície destes isoladores.

5 Resultados dos Ensaios e Análises

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios para a determinação da tensão $U_{50\%}$ considerando as 13 formas não padronizadas apresentadas na Tabela 3, além da forma padrão 1,2 x 50 μs . Os isoladores dos tipos pino e pilar, classes 15 e 25 kV, foram avaliados nas condições a seco e sob chuva, bem como nas polaridades positiva e negativa. Os resultados dos ensaios são apresentados em forma de gráficos de linha e barras. Os resultados no formato de linhas permitem a visualização do comportamento da tensão $U_{50\%}$ na medida em que as formas impulsivas são alteradas, concedendo maior sensibilidade às variações. Nesta representação as formas de tensão são divididas em frentes rápidas (0,5 x 5 μs a 0,5 x 50 μs), frentes padronizadas (1,2 x 5 μs a 1,2 x 50 μs) e frentes lentas (3 x 10 μs a 10 x 50 μs)⁵.

A representação no formato de barras permite identificar a sobreposição da região de incerteza em cada valor $U_{50\%}$, comprovando se há equivalência estatística destes. Os resultados numéricos são apresentados no ANEXO G no formato de tabelas com os valores $U_{50\%}$, limites de confiança (*Erro +/-*) e desvio padrão σ . A coluna *Variacão* refere-se à diferença percentual entre o valor obtido $U_{50\%}$ para as formas não padronizadas e o valor $U_{50\%}$ para a forma padrão 1,2 x 50 μs .

As condições ambientes foram registradas no início e no término de cada ensaio, a fim de permitir correções dos resultados para as condições ambientes padronizadas (umidade absoluta – 11 g/m³, pressão 760 mmHg e temperatura 20 °C) de acordo com a norma IEC 60060-1 (60). Nos ensaios sob chuva é necessário garantir que as condições de precipitação mantenham-se constantes ao longo de todo o procedimento, que consiste na calibração da forma impulsiva para verificação dos tempos de frente e cauda e nas aplicações de tensão. A Tabela 16 apresenta os limites dos parâmetros de precipitação utilizados durante os ensaios sob chuva. Estes parâmetros são verificados no início e no término de cada ensaio.

Tabela 16 – Condições de precipitação padronizadas (60).

Condição de Precipitação	Valor
<i>Componente vertical (mm/min)</i>	1,0 a 2,0
<i>Componente horizontal (mm/min)</i>	1,0 a 2,0
<i>Temperatura da água (°C)</i>	<i>Temperatura ambiente ± 15</i>
<i>Condutividade da água ($\mu\text{s}/\text{cm}$)</i>	100 ± 15

⁵ Esta classificação é utilizada apenas para o conjunto de formas impulsivas relacionadas neste trabalho.

5.1 Resultados - Isolador do Tipo Pino Classe 15 kV

As Figuras 37 e 38 apresentam os resultados dos ensaios para determinação da tensão $U_{50\%}$ no isolador do tipo pino classe 15 kV nos formatos de linha e barras, respectivamente.

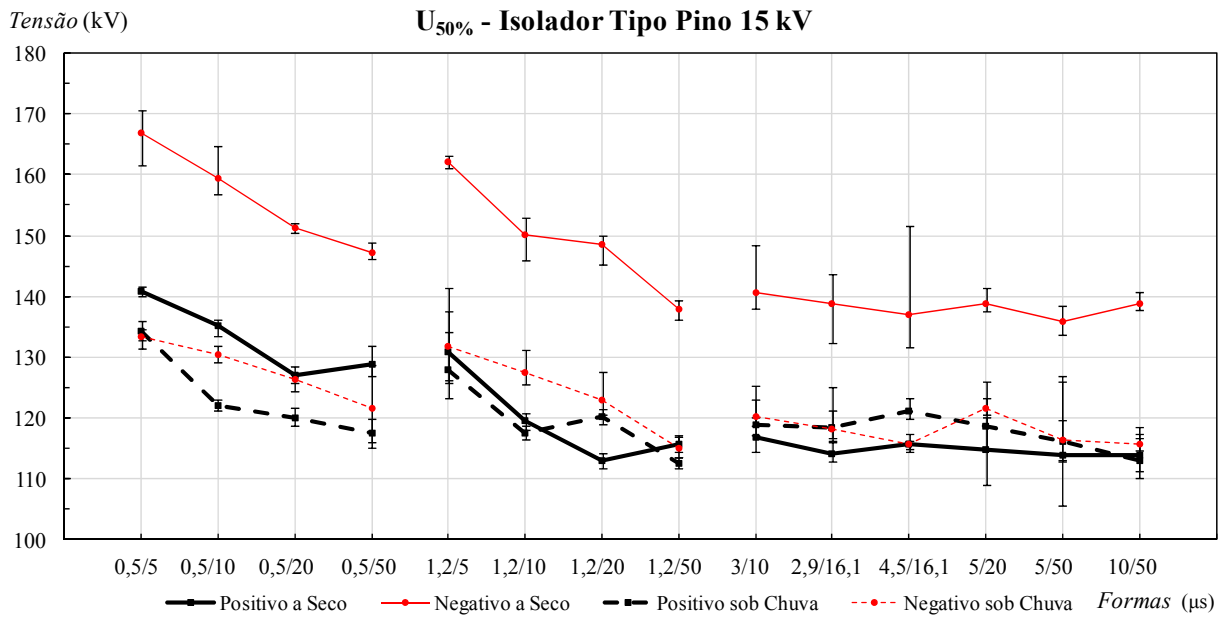


Figura 37 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 15 kV – Gráfico de linhas.

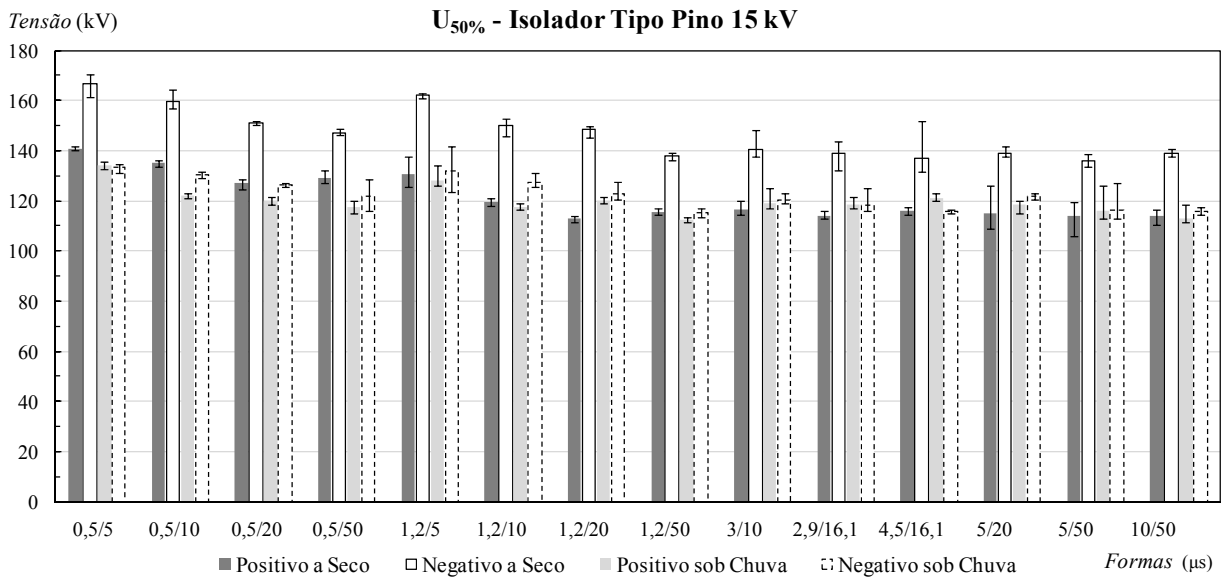


Figura 38 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 15 kV – Gráfico de barras.

5.2 Resultados - Isolador do Tipo Pino Classe 25 kV

As Figuras 39 e 40 apresentam os resultados dos ensaios para determinação da tensão $U_{50\%}$ no isolador do tipo pino classe 25 kV nos formatos de linha e barras, respectivamente.

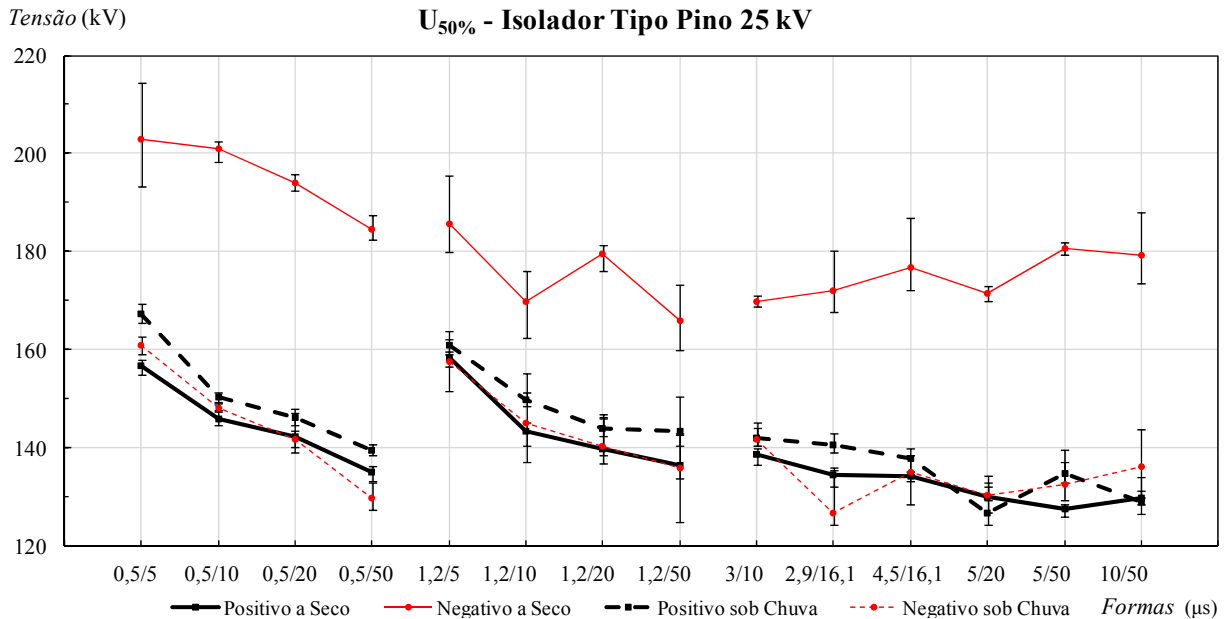


Figura 39 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 25 kV – Gráfico de linhas.

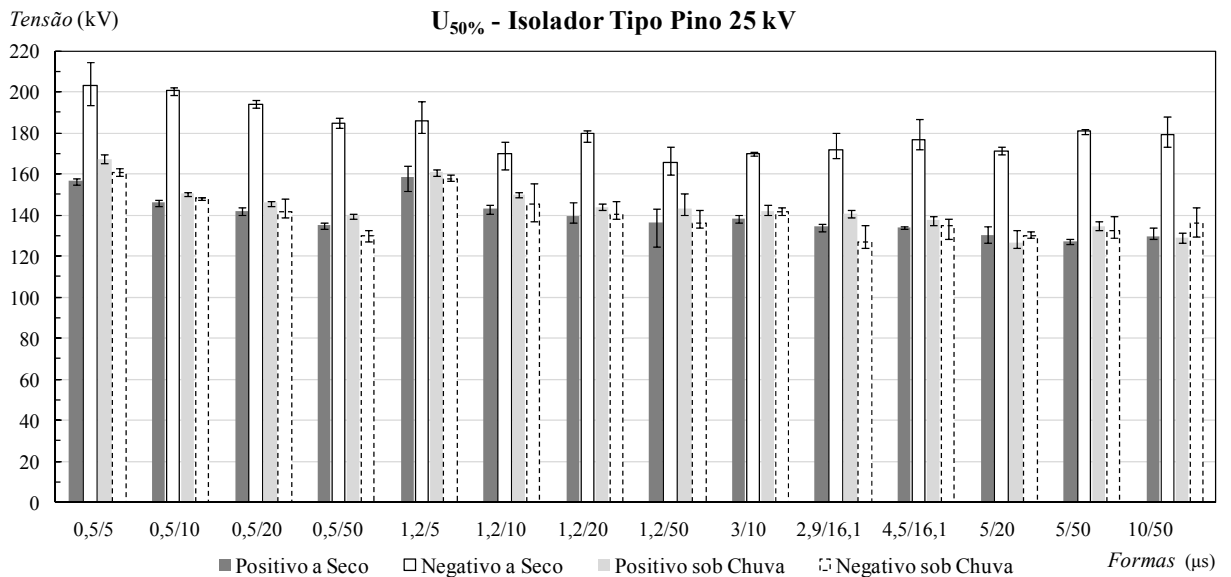


Figura 40 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pino classe 25 kV – Gráfico de barras.

5.3 Resultados - Isolador do Tipo Pilar Classe 15 kV

As Figuras 41 e 42 apresentam os resultados dos ensaios para determinação da tensão $U_{50\%}$ no isolador do tipo pilar classe 15 kV nos formatos de linha e barras, respectivamente.

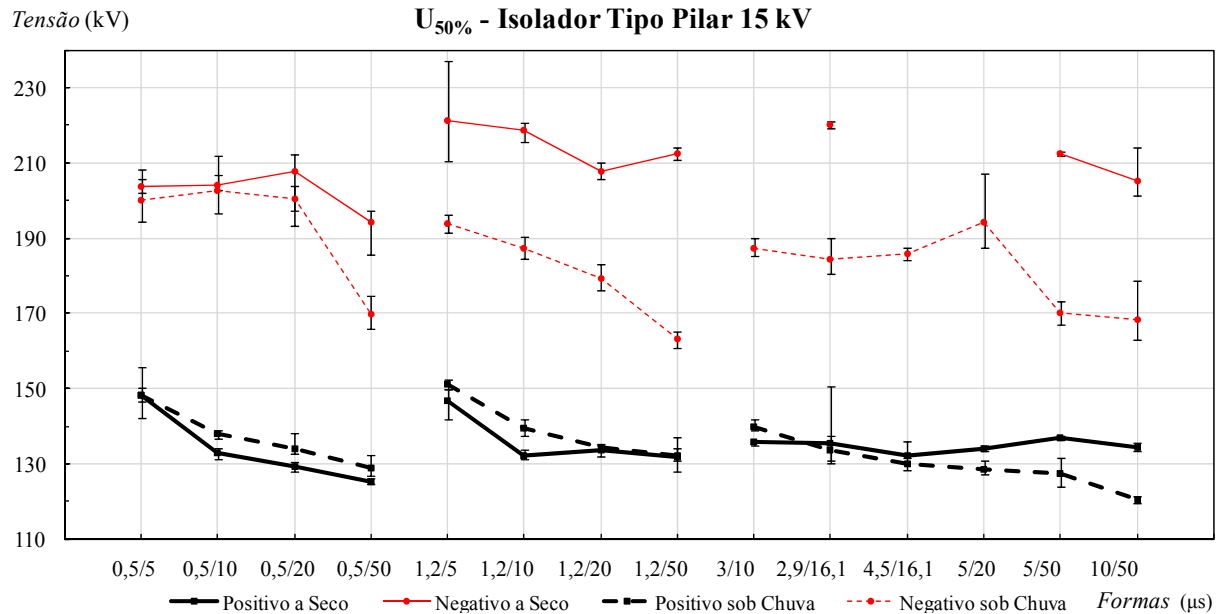


Figura 41 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 15 kV – Gráfico de linhas.

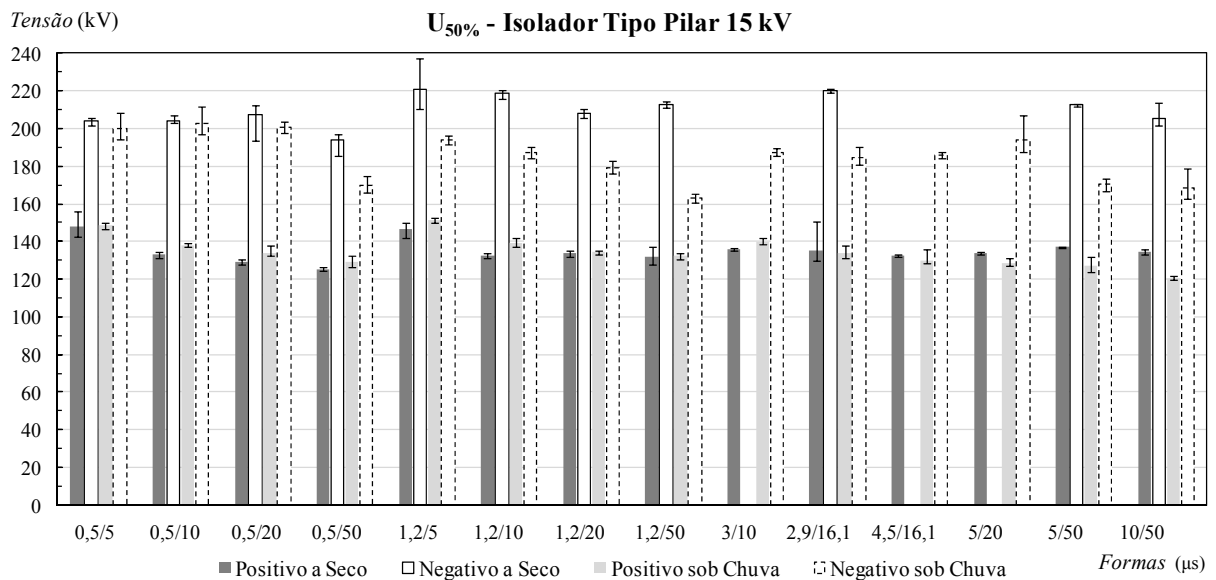


Figura 42 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 15 kV – Gráfico de barras.

5.4 Resultados - Isolador do Tipo Pilar Classe 25 kV

As Figuras 43 e 44 apresentam os resultados dos ensaios para determinação da tensão $U_{50\%}$ no isolador do tipo pilar classe 25 kV nos formatos de linha e barras, respectivamente.

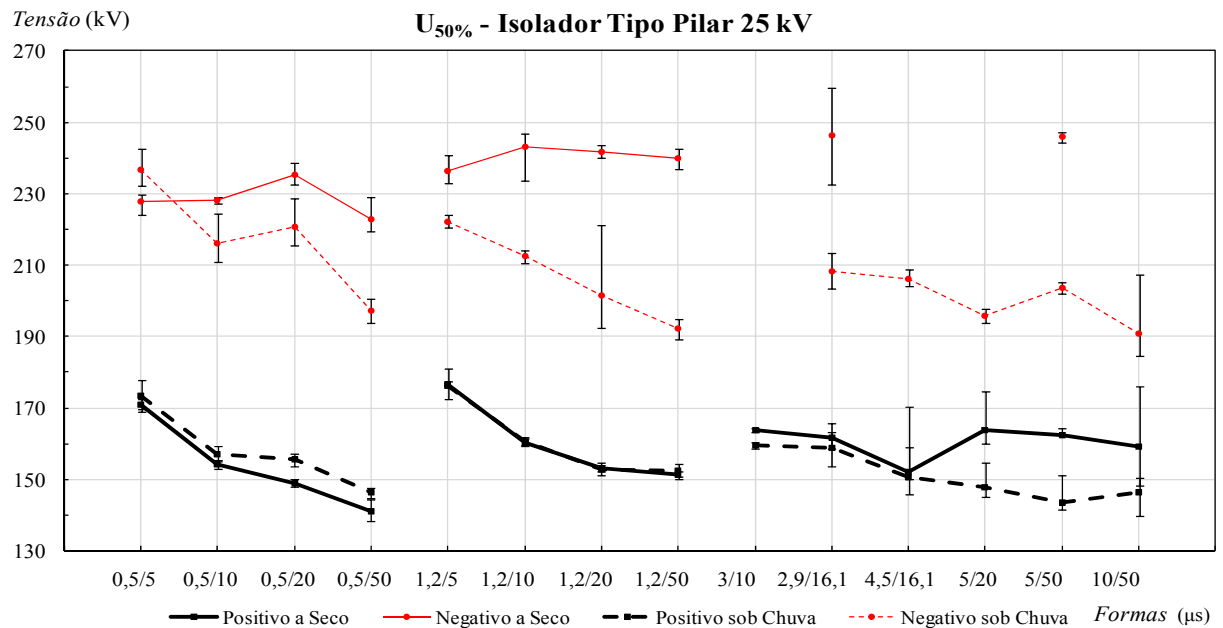


Figura 43 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 25 kV – Gráfico de linhas.

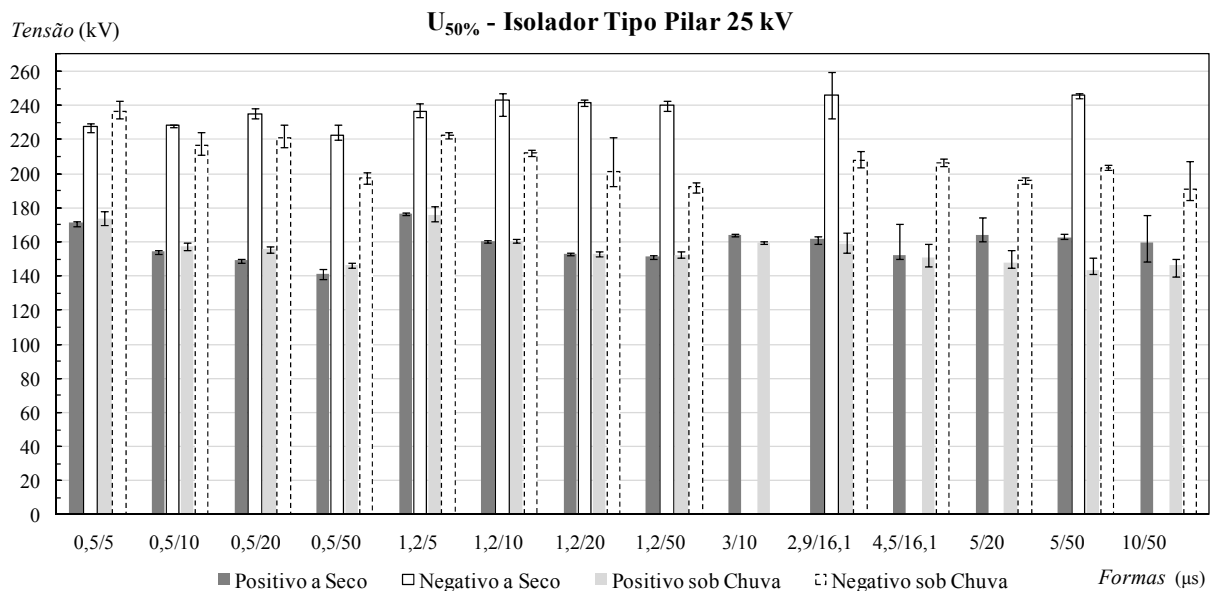


Figura 44 – Tensão $U_{50\%}$ para o isolador do tipo pilar classe 25 kV – Gráfico de barras.

5.5 *Análises*

5.5.1 *Isolador Tipo Pino Classe 15 kV*

De forma geral os resultados apresentados na Figura 37 mostram uma tendência de aumento da tensão $U_{50\%}$ quando o isolador é submetido às formas impulsivas com frentes rápidas e padronizadas. De acordo com a Tabela 23, observa-se um aumento médio de 19 % na suportabilidade do isolador para a forma 0,5 x 5 μ s, considerando as 04 condições de ensaio (seco, sob chuva, polaridades positiva e negativa). Esta variação refere-se à diferença percentual entre o valor obtido $U_{50\%}$ para as formas não padronizadas e o valor $U_{50\%}$ para a forma padrão 1,2 x 50 μ s. Comparando os resultados para as frentes rápidas e padronizadas, é possível notar que o aumento da suportabilidade é ainda mais pronunciado para as formas com frentes rápidas, onde o tempo de frente é inferior ao valor padronizado ($0,5 < 1,2 \mu$ s). Neste conjunto de formas, a taxa de crescimento da tensão é superior às demais e, portanto, o tempo disponível para formação das descargas iniciais, responsáveis por ionizar o ar é menor, diminuindo a probabilidade de ocorrência da descarga final entre o condutor energizado e o terminal aterrado no isolador. Este efeito é potencializado também devido a redução do tempo de cauda de 50 para 5 μ s. Portanto, o aumento de suportabilidade para estas formas deve-se à composição dos tempos de frente com a redução do tempo de cauda.

Para as formas que possuem frentes lentas, observa-se uma variação média de 2 % na tensão $U_{50\%}$ para as 04 condições de ensaio. Neste caso os efeitos dos tempos de frente e cauda estão combinados e apresentam maior semelhança, do ponto de vista estatístico, com o comportamento do isolador quando submetido à forma padronizada (1,2 x 50 μ s).

Observando o comportamento da tensão $U_{50\%}$ nos ensaios sob chuva, nota-se que na maioria dos casos o efeito desta na suportabilidade do isolador é reduzir os níveis para valores próximos ou inferiores à suportabilidade a seco na polaridade positiva. Este comportamento comprova que os ensaios dielétricos realizados na polaridade positiva impõem maior solicitação ao isolador, resultando em um nível de suportabilidade inferior. Na Figura 37 este comportamento é observado nos resultados para as frentes padronizadas e lentas. Porém para as formas com frente rápida, tem-se que o menor nível de suportabilidade foi observado na polaridade positiva com o isolador na condição sob chuva.

No gráfico de barras apresentado na Figura 38, a visualização da região de incerteza ao redor do valor $U_{50\%}$ torna-se mais clara, possibilitando identificar a sobreposição dos

resultados. Esta sobreposição mostra que na maioria dos casos os resultados dos ensaios a seco, na polaridade positiva, e sob chuva nas polaridades positiva e negativa, são equivalentes.

Dado que os resultados para as formas com frentes lentas apresentaram variação média de 2 % em relação ao valor padronizado, torna-se possível calcular um valor médio para a tensão $U_{50\%}$ e para os desvios padrão a partir da forma 1,2 x 50 μs até a forma 10 x 50 μs , conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Tensão $U_{50\%}$ média para as formas 1,2 x 50 μs a 10 x 50 μs . Isolador tipo pino classe 15 kV.

<i>Condição</i>	<i>Seco</i>		<i>Sob chuva</i>	
<i>Polaridade</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>
$U_{50\% \text{ médio}} \text{ (kV)}$	115,0	138,3	117,0	117,6
$\sigma_{\text{médio}} \text{ (kV)}$	1,1	1,5	3,2	2,6

O resumo dos valores $U_{50\% \text{ médio}}$ e $\sigma_{\text{médio}}$ apresentados na Tabela 17 consiste na primeira estimativa de um valor $U_{50\%}$ representativo da suportabilidade do isolador para diferentes formas não padronizadas com frentes lentas. A modelagem da suportabilidade para as formas com frentes rápidas e padronizadas é mais complexa e pode ser feita através do Modelo do Efeito Disruptivo (*DE – Disruptive Effect*).

5.5.2 Isolador Tipo Pino Classe 25 kV

De forma semelhante aos resultados observados no isolador do tipo pino classe 15 kV, observa-se também para a classe 25 kV, uma tendência de aumento da tensão $U_{50\%}$ para frentes rápidas e padronizadas, conforme mostra a Figura 39. De acordo com a Tabela 24, o aumento médio na suportabilidade do isolador para a forma 0,5 x 5 μs é de 18 %, considerando as 04 condições de ensaio. O aumento de suportabilidade mais pronunciado é também observado para as formas com frentes rápidas, devido aos fatores citados anteriormente. A semelhança nos resultados entre os isoladores do tipo pino classe 15 e 25 kV se deve ao formato destes isoladores, que possuem o mesmo desenho construtivo, diferindo-se apenas nas dimensões.

Considerando as formas com frentes lentas, observa-se uma variação média de 1 % na tensão $U_{50\%}$ para as 04 condições de ensaio. Neste caso os efeitos dos tempos de frente e cauda estão combinados e apresentam maior semelhança, do ponto de vista estatístico, com o comportamento do isolador quando submetido à forma padronizada (1,2 x 50 μs).

Analogamente, os níveis da tensão $U_{50\%}$ nos ensaios sob chuva são reduzidos para valores próximos da suportabilidade a seco na polaridade positiva. Ao contrário do isolador classe 15 kV, o isolador classe 25 kV apresentou menor nível de suportabilidade na polaridade positiva a seco para todas as formas, com exceção apenas da forma 0,5 x 50 μ s, polaridade negativa sob chuva. No gráfico de barras apresentado na Figura 40, é possível visualizar a sobreposição dos resultados, mostrando a equivalência estatística destes.

A Tabela 18 resume os valores de tensão $U_{50\%}$ e desvios padrão médios para o isolador do tipo pino classe 25 kV a partir da forma 1,2 x 50 μ s até a forma 10 x 50 μ s.

Tabela 18 – Tensão $U_{50\%}$ média para as formas 1,2 x 50 μ s a 10 x 50 μ s. Isolador tipo pino classe 25 kV.

Condição	<i>Seco</i>		<i>Sob chuva</i>	
	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>
$U_{50\%}$ médio (kV)	133,0	173,7	136,3	134,0
σ médio (kV)	4,0	5,4	6,5	4,8

O resumo dos valores $U_{50\%}$ média e σ médio apresentados na Tabela 18 consiste na primeira estimativa de um valor $U_{50\%}$ representativo da suportabilidade do isolador para diferentes formas não padronizadas com frentes lentas.

5.5.3 Isolador Tipo Pilar Classe 15 kV

Conforme apresentado na Figura 41, tem-se que para os isoladores do tipo pilar classe 15 kV a tendência de aumento da tensão $U_{50\%}$ é semelhante para as formas com frentes rápidas e padronizadas, polaridade positiva a seco e sob chuva. Para a polaridade negativa, as tensões $U_{50\%}$ apresentam comportamentos bastante distintos nas condições a seco e sob chuva. Considerando a condição de ensaio a seco, polaridade negativa, observa-se pouca variação para as formas com frentes lentas e variações mais pronunciadas nas demais formas. Nota-se ainda neste caso, a redução de suportabilidade para frentes rápidas, quando comparadas com as formas com frentes padronizadas. Este fato é observado devido aos fatores aplicados para a correção das sobre-elevações neste grupo de formas. De acordo com a Tabela 25, tem-se um aumento médio de 12 % na suportabilidade do isolador na polaridade positiva, forma 0,5 x 5 μ s, considerando as condições de ensaio a seco e sob chuva. A polaridade negativa na condição a seco apresenta redução de 4 %, enquanto a condição sob chuva resulta em um aumento de suportabilidade de 23 %.

Os resultados faltantes na Figura 41 se devem à baixa eficiência apresentada pelo gerador de impulsos nas respectivas formas, como pode ser observado na Tabela 21. Valores reduzidos de eficiência impossibilitam a obtenção das tensões impulsivas necessárias para a realização dos ensaios.

No isolador em questão, o comportamento constante dos resultados para frentes lentas pode ser estendido até a forma $1,2 \times 10 \mu\text{s}$. A variação média da tensão $U_{50\%}$ desde a forma $1,2 \times 10 \mu\text{s}$ até a forma $10 \times 50 \mu\text{s}$ na polaridade positiva, condições a seco e sob chuva, é de 1 %.

No gráfico de barras apresentado na Figura 42, a visualização da região de incerteza ao redor do valor $U_{50\%}$ torna-se evidente, possibilitando identificar a sobreposição dos resultados. Esta sobreposição mostra que, na maioria dos casos, os resultados dos ensaios a seco na polaridade positiva e sob chuva nas polaridades positiva e negativa são equivalentes.

A Tabela 19 resume os valores de tensão $U_{50\%}$ e desvios padrão médios para o isolador do tipo pilar classe 15 kV a partir da forma $1,2 \times 10 \mu\text{s}$ até a forma $10 \times 50 \mu\text{s}$, considerando a polaridade positiva a seco e sob chuva, e a polaridade negativa a seco.

Tabela 19 – Tensão $U_{50\%}$ média para o Isolador tipo pilar classe 15 kV.

Condição	<i>Seco</i>		<i>Sob chuva</i>	
	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>
$U_{50\%}$ média (kV)	134,1	212,8	131,8	- ⁽¹⁾
σ médio (kV)	1,7	5,9	6,1	- ⁽¹⁾

⁽¹⁾ a tensão $U_{50\%}$ média não foi calculada devido à dispersão entre os resultados para esta condição.

5.5.4 Isolador Tipo Pilar Classe 25 kV

A Figura 43 mostra que os resultados para o isolador do tipo pilar classe 25 kV seguem a mesma tendência de comportamento observada na classe 15 kV. Este resultado é esperado devido o formato semelhante dos isoladores, diferindo-se apenas nas dimensões. Desta forma, a tendência de aumento da tensão $U_{50\%}$ é novamente percebida nas formas com frentes rápidas e padronizadas, polaridade positiva a seco e sob chuva. Para a polaridade negativa, as tensões $U_{50\%}$ apresentam comportamentos distintos nas condições a seco e sob chuva. Observa-se na Tabela 26 um aumento médio de 14 % na suportabilidade do isolador para a polaridade positiva, forma $0,5 \times 5 \mu\text{s}$, considerando as condições de ensaio a seco e sob chuva. A polaridade negativa na condição a seco apresenta redução de 5 %, enquanto a condição sob chuva resulta em um aumento de suportabilidade de 23 %.

No isolador em questão, os resultados para as formas com frentes lentas apresentam variação em torno de um valor médio, que neste caso pode também ser estendida até a forma $1,2 \times 10 \mu\text{s}$. A variação média da tensão $U_{50\%}$ desde a forma $1,2 \times 10 \mu\text{s}$ até a forma $10 \times 50 \mu\text{s}$ nas polaridades positiva e negativa, condições a seco e sob chuva, é de 3 %. A Figura 44 apresenta o resultado no formato de barras para o isolador em questão.

A Tabela 20 resume os valores de tensão $U_{50\%}$ e desvio padrão médios para o isolador do tipo pilar classe 25 kV a partir da forma $1,2 \times 10 \mu\text{s}$ até a forma $10 \times 50 \mu\text{s}$, considerando as polaridades positiva e negativa, nas condições a seco e sob chuva.

Tabela 20 – Tensão $U_{50\%}$ média para o Isolador tipo pilar classe 25 kV.

Condição	<i>Seco</i>		<i>Sob chuva</i>	
	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>
$U_{50\%}$ média (kV)	158,6	243,4	152,6	201,3
$\sigma_{\text{médio}}$ (kV)	5,1	2,7	6,1	7,8

5.6 Considerações Finais

As análises apresentadas nos itens 5.5.1 a 5.5.4 permitem identificar características importantes em relação à suportabilidade dos isoladores ensaiados para as formas impulsivas consideradas. Os resultados obtidos ampliam o conhecimento adquirido até o presente momento em relação ao comportamento dielétrico dos isoladores ensaiados mediante formas impulsivas não padronizadas. Os resultados fornecem ainda uma confirmação da tensão $U_{50\%}$ a ser utilizada na representação dos isoladores em estudos de sobretensões atmosféricas com tempos frente superior ao valor padronizado, combinadas com tempos de cauda que vão de 10 a 50 μs .

Com relação à representação das sobretensões atmosféricas em ensaios dielétricos e estudos computacionais, a tensão $U_{50\%}$ média para frentes lentas apresenta pouca variação em relação à tensão $U_{50\%}$ para a forma padrão $1,2 \times 50 \mu\text{s}$. Este resultado comprova que a forma impulsiva padrão pode ser utilizada para representar as solicitações de tensão com tempos de frente superiores ao padronizado, denominado neste trabalho como frentes lentas.

Em se tratando de coordenação de isolamento, onde se faz necessária a avaliação do isolamento auto-recuperante nas condições a seco e principalmente sob chuva, tem-se que o ensaio para a determinação da tensão $U_{50\%}$ a seco na polaridade positiva, geralmente atende a necessidade de avaliação das demais condições – polaridade positiva sob chuva e polaridade negativa a seco e sob chuva. Este fato é comprovado observando-se os níveis de tensão $U_{50\%}$

para a polaridade positiva a seco, que do ponto de vista estatístico é inferior ou igual aos resultados das demais condições de ensaio. Portanto, considerando os isoladores avaliados, é necessário que apenas 01 (um) ensaio seja realizado para que o menor nível de suportabilidade seja conhecido.

Os ensaios ainda comprovam não haver prejuízo para a coordenação de isolamento, caso as redes de média tensão sejam solicitadas por sobretensões com frentes rápidas, visto que os isoladores ensaiados apresentam aumento de sua suportabilidade para todas as condições de ensaio.

6 Conclusões

A avaliação da suportabilidade dielétrica de isoladores de distribuição frente à sobretensões induzidas, parte primeiramente da determinação das formas impulsivas características deste tipo de sobretensão. A partir desta verificação, o método de avaliação e o parâmetro a ser utilizado nas comparações de desempenho são escolhidos. Por fim, os resultados são apresentados de modo que o desempenho dos isoladores ensaiados seja visualizado na medida em que as formas não padronizadas, representativas das sobretensões induzidas, são alteradas.

Com o objetivo de identificar as formas impulsivas típicas de sobretensões atmosféricas em redes de distribuição de média tensão, as descargas atmosféricas foram primeiramente divididas em *diretas* e *indiretas*. O estudo dos fatores que influenciam na amplitude e na forma das sobretensões atmosféricas devido a descargas diretas mostrou que, em geral, ocorrem diferenças em relação à forma impulsiva padrão $1,2 \times 50 \mu\text{s}$, porém com maior concordância entre as medições em linhas reais e as práticas normalizadas para ensaios de tensão suportável ao impulso atmosférico. Por outro lado, a avaliação dos parâmetros que determinam as características das sobretensões induzidas mostra que não é possível determinar uma forma típica para este tipo de sobretensão, sendo que cada sistema estudado tem suas particularidades. Desta forma, as solicitações dielétricas impostas por sobretensões induzidas podem ser avaliadas em laboratórios de alta tensão, devido à possibilidade de concepção de diferentes formas impulsivas através dos geradores de impulsos.

Com base no exposto, foram selecionadas 13 formas impulsivas não padronizadas, possíveis de serem reproduzidas no gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. A precisão obtida em termos dos tempos de frente e cauda, aliada a flexibilidade do gerador de impulsos, permitiu a concepção de formas impulsivas não padronizadas com tempos de frente variando de $0,5$ a $10 \mu\text{s}$ e tempos de cauda variando de 5 a $50 \mu\text{s}$. As formas impulsivas concebidas reproduzem de maneira satisfatória as solicitações de tensão a serem aplicadas nos isoladores ensaiados.

O parâmetro utilizado para a avaliação da suportabilidade dos isoladores consiste na tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$. A tensão $U_{50\%}$ foi avaliada considerando as 13 formas não padronizadas, além da forma padrão $1,2 \times 50 \mu\text{s}$. Os ensaios foram realizados nas condições a seco e sob chuva, para as polaridades positiva e negativa, totalizando aproximadamente 8000 aplicações de tensão em 224 ensaios. Desta forma a escolha do método de avaliação através

dos acréscimos e decréscimos foi de fundamental importância, visto que os demais métodos apresentados – métodos dos níveis múltiplos e descargas sucessivas demandam uma quantidade elevada de aplicações de tensão, inviabilizando os ensaios.

Os resultados apresentados permitem a identificação de características importantes em relação à suportabilidade dos isoladores ensaiados para as formas impulsivas consideradas. Primeiramente, constatou-se que a representação da suportabilidade às sobretensões atmosféricas em ensaios dielétricos e estudos computacionais pode ser realizada através da forma padronizada, desde que o objetivo seja representar as solicitações impostas por descargas atmosféricas diretas viajando ao longo das linhas de média tensão ou induzidas. Este resultado é justificado devido à pequena variação obtida entre a tensão $U_{50\%}$ média para as frentes lentas e a tensão $U_{50\%}$ para a forma padrão. Com relação à coordenação de isolamento, onde se faz necessária a avaliação do isolamento auto-recuperante nas condições a seco e sob chuva, tem-se que o ensaio para a determinação da tensão $U_{50\%}$ a seco na polaridade positiva, geralmente atende a necessidade de avaliação das demais condições – polaridade positiva sob chuva e polaridade negativa a seco e sob chuva. Os resultados mostram que os níveis de tensão $U_{50\%}$ para a polaridade positiva a seco, são do ponto de vista estatístico, inferiores ou iguais aos resultados das demais condições de ensaio. Portanto, considerando os isoladores avaliados, torna-se necessário a realização de apenas 01 (um) ensaio para que o menor nível de suportabilidade frente a surtos induzidos seja conhecido. Ainda com relação à coordenação de isolamento, as redes de média tensão apresentam elevação do nível de isolamento em todas as condições de ensaio, caso sejam solicitadas por sobretensões atmosféricas com frentes rápidas.

6.1 Publicações na Área e Correlatas

A primeira publicação relacionada a este trabalho consiste na aprovação do resumo para a elaboração de artigo técnico a ser publicado e apresentado no *EIC 2013 – Electrical Insulation Conference*, através do *IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society*.

- LOPES, G. P., PEDROSO, J. A. D., MARTINEZ, M. L. B., Evaluation of CFO for Medium Voltage Insulators Submitted to Non-standard Impulse Shapes – Experimental Results. IEEE Electrical Insulation Conference - EIC, 2013.

As publicações correlatas referem-se à parceria entre o LAT-EFEI Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, a AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia e a Universidade de Bologna, na Itália. Nesta parceria, as publicações relacionadas a seguir foram desenvolvidas dentro do projeto de P&D – Pesquisa e Desenvolvimento, intitulado “Coordenação de Isolamento em Redes de Média Tensão com Neutros Ressonantes”.

- LOPES, G. P., MARTINEZ, M. L. B., BORGUETTI, A., NAPOLITANO, F., NUCCI, C. A., UCHOA, J. I. L., SANTOS, G. J. G., FAGUNDES, D. R., A Proposal to Evaluate the Risk of Failure of Distribution Transformers Insulation Submitted to Lightning Induced Voltages. CIRED - International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2013.
- LOPES, G. P., MARTINEZ, M. L. B., SALUSTIANO, R., FARIA, I. P., TELLES, V. G. C., A Methodology to Predict the Lightning Insulation Strength for Distribution Transformers by Applications of Reduced Lightning Standard Impulse Voltages. IEEE International Symposium on Electrical Insulation - ISEI, 2012.
- LOPES, G. P., SALUSTIANO, R., FERRAZ, G. M. F., MARTINEZ, M. L. B., SANTOS, G. J. G., FAGUNDES, D. R., Avaliação da Suportabilidade do Isolamento de Transformadores de Distribuição Através da Aplicação de Impulsos Atmosféricos com Tensão Reduzida. IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.
- FERRAZ, G. M. F., LOPES, G. P., MARTINEZ, M. L. B., Cálculo do Tempo de Sobrecarga em Transformadores Através do Equivalente Térmico Simplificado. IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.
- BORGUETTI, A., NAPOLITANO, F., NUCCI, C. A., MARTINEZ, M. L. B., LOPES, G. P., UCHOA, J. I. L., Protection Systems Against Lightning-Originated Overvoltages in Resonant Grounded Power Distribution Systems. 31st ICLP - International Conference on Lightning Protection, 2012.
- NAPOLITANO, F., BORGUETTI, A., MESSORI, D., NUCCI, C. A., MARTINEZ, M. L. B., LOPES, G. P., UCHOA, J. I. L., Assessment of the Lightning Performance of Compact Overhead Distribution Lines. 2012 CIGRE SC C4 Colloquium in Japan, 2012.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma vez que os resultados apresentados possuem uma abordagem do ponto de vista de engenharia, onde se buscou determinar o comportamento dielétrico de isoladores de distribuição em redes de média tensão através de métodos experimentais, tem-se como primeira proposta para trabalhos futuros a investigação dos fenômenos físicos desenvolvidos durante as descargas disruptivas para diferentes formas não padronizadas. Através desta abordagem, torna-se possível determinar de forma detalhada os fatores físicos que levam ao aumento da tensão $U_{50\%}$ para as formas com frentes rápidas e padronizadas.

Dado que os resistores necessários para a concepção das formas não padronizadas estão disponíveis para utilização no gerador de impulsos e que novas amostras foram providenciadas pela AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, tem-se como proposta adicional para trabalhos futuros o levantamento das características tensão x tempo (*curvas $V \times t$*) para os isoladores em questão. As *curvas $V \times t$* fornecem a relação entre o tempo necessário até a disrupção em função da tensão aplicada. Desta forma, têm-se informações detalhadas do comportamento do isolador na medida em que as solicitações de tensão apresentam alteração de forma e amplitude.

A partir dos resultados de tensão $U_{50\%}$ fornecidos através do método dos acréscimos e decréscimos e as *curvas $V \times t$* para os isoladores em cada condição de ensaio, têm-se os requisitos de ensaio necessários para o levantamento do modelo matemático capaz de representar o comportamento dielétrico mediante qualquer solicitação de tensão impulsiva. Este modelo é denominado como Modelo do Efeito Disruptivo (*Disruptive Effect - DE*).

Por fim um novo trabalho pode ser iniciado, destinando-se a avaliar a suportabilidade dielétrica de isoladores do tipo pino poliméricos. Esta abordagem é capaz de fornecer parâmetros importantes relativos ao desempenho das redes compactas em relação às redes convencionais, indicando se os resultados observados podem ser estendidos a este tipo de rede.

7 Referências

- (1) COORAY, G. V. The Lightning Protection – IET Power and Energy Series no. 58. 1 ed. London. IET. 2010.
- (2) INTERNATIONAL STANDARD. IEC 60071-1: Insulation Co-ordination – Part 1: Definitions, Principles and Rules. Geneva. 2006.
- (3) D’AJUZ, A. *et al.* Transitórios Elétricos a Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão. 1 ed. Niterói. Editora Universitária – Universidade Federal Fluminense. 1987.
- (4) LEWIS, W. W. The Protection of Transmission Systems Against Lightning. Dover Edition. New York. Dover. 1965.
- (5) BRAZ, C. P. Avaliação do Comportamento Dielétrico de Isoladores de Distribuição de Média Tensão Frente a Impulsos Atmosféricos com Formas de Onda Não Normalizadas. 2011. 126 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14039: Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2005.
- (7) RAKOV, V. A., UMAN, M. A. Lightning: Physics and Effects. 3ed. New York. Cambridge University Press, 2006.
- (8) PINTO Jr., O., PINTO, I. A. Relâmpagos. 2 ed. São Paulo. Ed. Brasiliense, 2008.
- (9) VISACRO FILHO, S. Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia. 1 ed. São Paulo. Ed. Artliber Ltda. 2005.
- (10) COORAY, G. V. The Lightning Flash – IET Power and Energy Series no. 34. 2 ed. London. IET. 2008.
- (11) UMAN, M. A. The Lightning Discharge. Dover Edition. New York. Dover Publications. 2001.
- (12) IMENCE, ALI F. *et al.* Modeling Guidelines for Fast Front Transients. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.11, N° 1, January 1996.
- (13) HILEMAN, A. R. Insulation Coordination for Power Systems. 1 ed. Boca Raton. CRC Press, Taylor and Francis Group. 1999.
- (14) VELASCO, J. A. M. Power System Transients – Parameter Determination. 1ed. Boca Raton. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2010.
- (15) WAGNER, C. F., LLOYD, B. L. Effects of Corona on Travelling Waves. AIEE Trans. October, 1955.
- (16) PORRINO, A. *et al.*, Joint CIRED/CIGRE Working Group 05. Protection of MV and LV Networks Against Lightning. Part I: Basic Information. CIRED 97, Conference Publication No. 438. June, 1997.
- (17) ERIKSSON, A. *et al.* Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. CIGRÉ. October, 1991.

- (18) SOARES Jr., A., SHOROEDER, M. A. O., VISACRO, S. Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 20, No. 2. April, 2005.
- (19) NUCCI, C. A. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part I: Return-Stroke Current Models with Specific Channel-Base Current for the Evaluation of the Return-Stroke Electromagnetic Fields. Working Group 33.01 (Lightning). *CIGRÉ, Electra* No. 161. August, 1995.
- (20) BRUCE, C. E. R., GOLD, R. H. The Lightning Discharge. *Journal of the IEE*. Vol. 88, pp. 487-520. London. December, 1941.
- (21) UMAN, M. A., McLAIN, D. K. Magnetic Field of Lightning Return Stroke. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 74, 1969.
- (22) LIN, Y. T., UMAN, M. A., STANDLER, R. B. Lightning Return Stroke Models. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 85, No. C3. March, 1980.
- (23) MASTER, M. J., UMAN, M. A., LIN, Y. T., STANDLER, R. B. Calculations of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields Above Ground. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 86, No. C12. December, 1981.
- (24) HEIDLER, F. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation. *Proceedings of 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Zürich, 1985.
- (25) NUCCI, C. A., MAZZETTI, C., RACHIDI, F., IANOZ, M. On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations. *Proceedings of 19th International Conference on Lightning Protection*. Graz. April, 1988.
- (26) DIENDORFER, G., UMAN, M. A. An Improved Return Stroke Model with Specified Channel-Base Current. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 95, No. D9. August, 1990.
- (27) COORAY, V. A Model for Subsequent Return Strokes. *Journal of Electrostatics*, No. 30. Elsevier, 1993.
- (28) NUCCI, C. A. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part II: Coupling Models for the Evaluation of Induced Voltages. Working Group 33.01.01 (Lightning Induced Voltages). *CIGRÉ, Electra* No. 162. October, 1995.
- (29) RUSCK, S. Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks. *Transaction of the Royal Institute of Technology*. No. 120. Stockholm, 1958.
- (30) CHOWDHURI, P., GROSS, E. T. B. Voltage Surges Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes. *Proceedings of IEE*. Vol. 114, No. 12. December, 1967.
- (31) AGRAWAL, A. K., PRICE, H. J., GURBAXANI, S. H. Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*. Vol. EMC-22, No. 2. May, 1980.
- (32) TAYLOR, C. D., SATTERWHITE, R. S., HARRISON, C. W. The Response of a Terminated Two-wire Transmission Line Excited by a Non-uniform Electromagnetic Field. *IEEE Transaction on Antennas Propagations*. Vol. AP-13, 1965.

- (33) RACHIDI, F. Formulation to the Field-to-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Fields. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. Vol. 35, No. 3. August, 1993.
- (34) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. Induced Voltages on Distribution Lines Due to Lightning Discharges on Nearby Metallic Structures. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 34, No. 5. September, 1998.
- (35) BARKER, P. P., SHORT, T. A., EYBERT-BERARD, A. R., BERLANDIS, J. P. Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11, No. 2. April, 1996.
- (36) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines – Application of the Extended Rusck Model. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 51, No. 3. August, 2009.
- (37) NUCCI, C. A., BORGUETTI, A., PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. Lightning-Induced Voltages on Distribution Overhead Lines: Comparison Between Experimental Results From a Reduced-Scale Model and Most Recent Approaches. Proceedings of the 24th International Conference on Lightning Protection. Birmingham. September, 1998.
- (38) DE LA ROSA, F., VALDIVIA, R., PÉREZ, H., LOZA, J. Discussion About the Inducing Effects of Lightning in an Experimental Power Distribution Line in Mexico. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 3, No. 3. July, 1988.
- (39) ERIKSSON, A. J., STRINGFELLOW, M. F., MEAL, D. V. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-101. No. 4. April, 1982.
- (40) YOKOYAMA, S., MIKAYE, K., MITANI, H., TAKANISHI, A. Simultaneous Measurement of Lightning Induced Voltages with Associated Stroke Currents. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 102, No. 8. August, 1983.
- (41) YOKOYAMA, S., MIKAYE, K., MITANI, H., YAMAZAKI, N. Advanced Observations of Lightning Induced Voltages on Power Distribution Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 1, No. 2. August, 1986.
- (42) YOKOYAMA, S., MIKAYE, K., MITANI, H., YAMAZAKI, N. Advanced Observations of Lightning Induced Voltages on Power Distribution Lines (II). IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 4, No. 4. October, 1989.
- (43) MASTER, M. J., UMAN, M. A., BEASLEY, W., DARVENIZA, M. Lightning Induced Voltages on Power Lines: Experiment. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Vol. 103, No. 9. September, 1984.
- (44) COORAY, V., DE LA ROSA, F. Shapes and Amplitudes of the Initial Peaks of Lightning-Induced Voltage in Power Lines Over Finitely Conducting Earth: Theory and Comparison with Experiment. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. AP-34. No. 1. January, 1986.
- (45) RUBINSTEIN, M., UMAN, M. A., MEDELIUS, P. J., THOMSON, E. M. Measurements of the Voltage Induced on an Overhead Power Line 20m from

- Triggered Lightning. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 36, No. 2. May, 1994.
- (46) MICHISITHA, K., ISHII, M., ASAKAWA, A., YOKOYAMA, S., KAMI, K. Voltage Induced on a Test Distribution Line by Negative Winter Lightning Strokes to Tall Structure. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 45, No. 1. January, 2003.
- (47) PIANTINI, A., DE CARVALHO, T. O., NETO, S. A., JANISZEWSKI, J. M., ALTAFIM, R. A. C., NOGUEIRA, A. L. T. A System for Simultaneous Measurements of Lightning Induced Voltages on Lines With and Without Arresters. Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection. Vol. 1. September, 2004.
- (48) YOKOYAMA, S. Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 103, No. 1. January, 1984.
- (49) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. An Experimental Study of Lightning-Induced Voltages by Means of Scale Model. Proceedings of the 21st International Conference on Lightning Protection. September, 1992.
- (50) ISHII, M., MICHISHITA, K., HONGO, Y. Experimental Study of Lightning Induced-Voltage on an Overhead Wire Over Lossy Ground. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 41, No. 1. February, 1999.
- (51) BERGER, K., ANDERSON, R. B., KRÖNINGER, H. Parameters of Lightning Flashes. Study Committee No. 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination). CIGRÉ, Electra No. 41. July, 1975.
- (52) VISACRO, S., SCHROEDER, M. A. O., SOARES JR., A., CHERCHIGLIA, L. C., SOUSA, V. J. Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. Journal on Geophysical Research. Vol. 109, No. D01105, 1-11, 2004.
- (53) NUCCI, C. A., RACHIDI, F., IANOZ, M. V., MAZZETTI, C. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 35 No. 1. February, 1993.
- (54) NUCCI, C. A. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part III: Sensitivity Analysis. Working Group C4.01 (Lightning). Final Draft of Part III.
- (55) FARHAD, R., NUCCI, C. A., IANOZ, M., MAZZETTI, C., Influence of a Lossy Ground on Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 38, No. 3. August, 1996.
- (56) ALLIBONE, T. E., PERRY, F. R. Standardization of Impulse-Voltage Testing. IEE Journal. Vol. 78, No. 471. March, 1936.
- (57) WITZKE, R. L., BLISS, T. J. Surge Protection of Cable-Connected Equipment. AIEE Transactions. Vol. 69, 1950.
- (58) WITZKE, R. L., BLISS, T. J. Co-ordination of Lightning Arrester Location With Transformer Insulation Level. AIEE Transactions. Vol. 69, 1950.

- (59) KUFFEL, E., ZAENGL, W. S., KUFFEL, J. High Voltage Engineering – Fundamentals. 2 ed. Oxford. Newnes. 2000.
- (60) INTERNATIONAL STANDARD. IEC 60060-1: High Voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Requirements. Geneva. 2010.
- (61) OLIVEIRA Jr., R. G. Tensões Induzidas em Linhas de Média Tensão. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- (62) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6936: Técnicas de Ensaio Elétrico de Alta Tensão – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- (63) HAUSCHILD, W., MOSCH, W. Statistical Techniques for High-voltage Engineering. English Edition. United Kingdom. Peter Peregrinus Ltd. 1992.
- (64) LOPES, G. P., MARTINEZ, M. L. B., SALUSTIANO, R., FARIA, I. P., TELLES, V. G. C., A Methodology to Predict the Lightning Insulation Strength for Distribution Transformers by Applications of Reduced Lightning Standard Impulse Voltages. Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation - ISEI. July, 2012.
- (65) DIXON, W. J., MOOD, A. M. A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. Journal of the American Statistical Association. Vol. 43, No 241. Mar., 1948.
- (66) CARRARA, G., DELLERA, L. Accuracy of an Extended Up-and-down Method in Statistical Testing of Insulation. Study Committee No. 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination). CIGRÉ, Electra No. 23. July, 1972.
- (67) CARRARA, G., HAUSCHILD, W. Statistical Evaluation of Dielectric Test Results Study Committee No. 33. CIGRÉ, Electra No. 133. December, 1990.
- (68) INTERNATIONAL STANDARD. IEC 60071-2: Insulation Coordination – Part 2: Application Guide. Geneva. 1996.
- (69) HYLÉN-CAVALLIUS, N., CHAGAS, F. A., Possible Precision of Statistical Insulation Test Methods. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-102, No. 8. August, 1983.
- (70) FIORINI PAVINATTO, E., FLAVIO D. DE LIMA, M., SPRESSOLA, F. E., BARREIRA MARTINEZ, M. L., A Software for the Statistical Analysis of the results of Lightning Impulse Testing. 18th Dielectric Materials, Measurements and Applications. Conference Publications No. 473. September, 2000.
- (71) BROWN, G. W., Method of Maximum Likelihood Applied to the Analysis of Flashover Data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-88, No. 12. December, 1969.
- (72) DAVIES, A. J., ROWLANDS, A. R., TURRI, R., WATERS, R. T., Statistical Analysis of Flashover Data Using a Generalized Likelihood Method. IEE Proceedings. Vol. 135, No. 1. January, 1988.

ANEXO A – Código do Programa para a Estimativa das Resistências R_1 e R_2 .

```

disp(' -----')
disp(' |                GERADOR DE IMPULSO LAT-EFEI                |')
disp(' |                CONFIGURAÇÃO 6S                            |')
disp(' |                DADOS:                                       |')
disp(' |                1. SOMATORIO DOS 5 RESISTORES DE CARGA = 24100 ohm |')
disp(' |                2. RESISTENCIA TOTAL DO SISTEMA DE MEDIÇÃO = 31450 ohm |')
disp(' |                3. CAPACITANCIA DE CARGA = 12,186 nF         |')
disp(' |                4. CAPACITANCIA DE DESCARGA = 1,05 nF       |')
disp(' |                5. TEMPO DE FRENTE DESEJADO 1,2us          |')
disp(' |                6. TEMPO DE CAUDA DESEJADO = 50us          |')
disp(' -----')

clear
clc
tic;

% -----
% |                Inserção dos Dados                            |
% -----

C1=12.186e-9;      % Capacitor total de carga
C2=1.05e-9;       % Capacitor total de descarga
RL=24100;         % Resistencia de carga
Rdiv=31450;       % Resistencia do sistema e mediação
tfdes=1.2e-6;    % Tempo de frente desejado
tcdes=50e-6;     % Tempo de cauda desejado

d=0;

for R1=350:10:500

    for R2=4000:50:5500

        a=1/(R1*C1)+1/(R1*C2)+1/(R2*C1);
        b=1/(R1*R2*C1*C2);
        k=R1*C2;

        syms a1 a2
        s=solve(a1*a2-b,a1+a2-a);

        x=double(s.a1(1));
        y=double(s.a1(2));

        if x>y

            A1=y;
            A2=x;
        else
            A1=x;
            A2=y;
        end

        tmax=log(A2/A1)/(A2-A1);      % tempo necessario para atingir valor de crista
        umax=(1/(k*(A2-A1)))*(exp(-A1*tmax)-exp(-A2*tmax));      % valor de crista

    em pu

        syms t3 t9 t5
        u3=solve((1/(k*(A2-A1)))*(exp(-A1*t3)-exp(-A2*t3))-0.3*umax); % calculo do
tempo 30%
        u9=solve((1/(k*(A2-A1)))*(exp(-A1*t9)-exp(-A2*t9))-0.9*umax); % calculo do
tempo 90%

```

```

        u5=solve(((1/(k*(A2-A1)))*(exp(-A1*t5)))-0.5*umax);           % calculo do
tempo 50%

        tf=1.667*(double(u9)-double(u3));           % calculo do tempo de frente
        tc=double(u5);

        if ((tf > 0.95*tfdes)&(tf < 1.05*tfdes))&&((tc > 0.95*tcdes)&(tc <
1.05*tcdes))

            d=d+1;
            T(d,1)=tf;
            T(d,2)=tc;
            tau(d,1)=1/A1; % calculo da constante de tempo da cauda
            tau(d,2)=1/A2; % calculo da constante de tempo de frente
            R_1(d)=R1;
            R_2(d)=R2;
        end
    end
end

Rd=mean(R_1);           % calculo do valor medio de Rd necessario
R_e=mean(R_2);           % calculo do valor medio de R2

syms Rx

Re=double(solve(1/((RL*Rx)/(RL+Rx)+Rd)+1/Rdiv-1/R_e)); % calculo do valor e Re
necessario

disp('Tempo de frente [us] e Tempo de cauda [us]')
mean(T)

disp('Constante de Tempo de cauda [us] e Constante de Tempo de frente [us]')
mean(tau)

disp('Resistor de amortecimento (Rd) necessario [ohm]')
Rd

disp('Resistencia de Descarga Total Necessaria ((RL//Re)+Rd)//Rdiv [ohm]')
R_e

if Re > 0

    disp('Resistor de Descarga (Re) necessario [ohm]')
    Re
else
    disp('Nao Existe Resistor de Descarga (Re) para a forma de onda desejada na
configuracao 6S')
end

toc

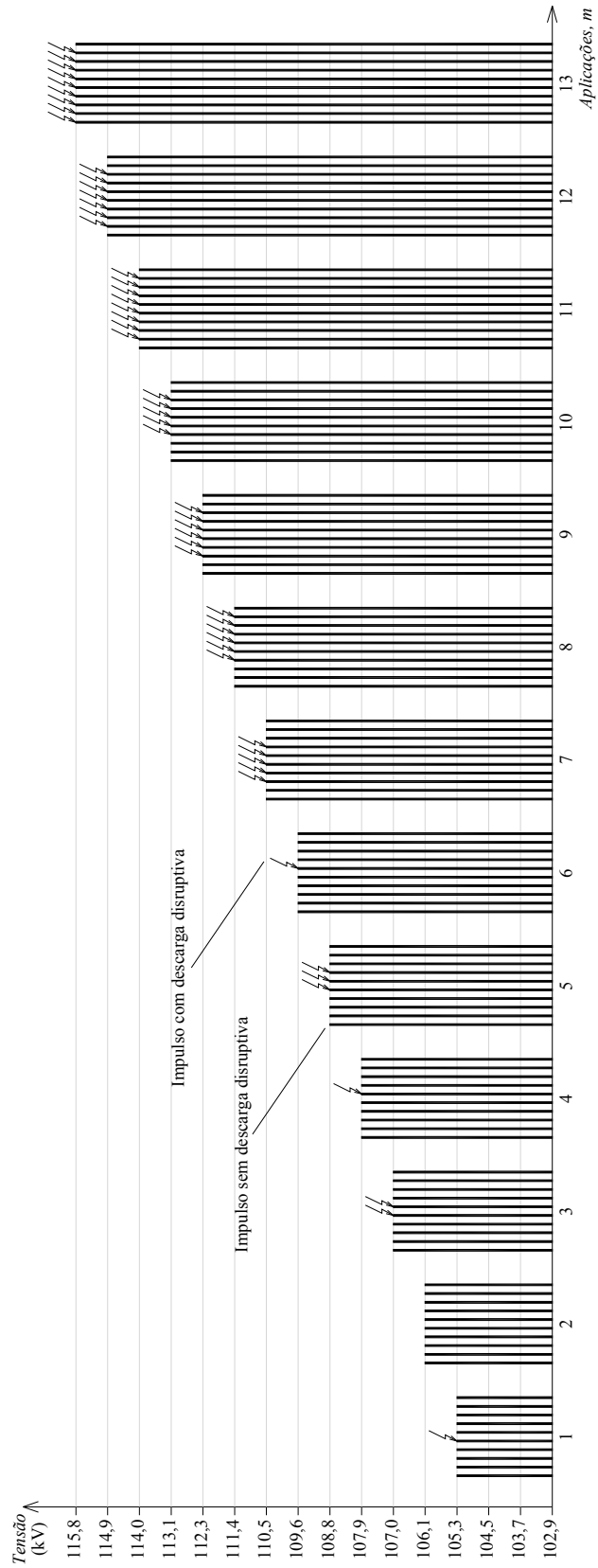
```


ANEXO C – Determinação das Formas Impulsivas – Simulações x Ensaios.

Tabela 21 – Resultados das Simulações x Ensaios para a Determinação das Formas Impulsivas.

<i>Forma Impulsiva</i>	<i>Resultados das Simulações</i>			<i>Resultados dos Ensaios</i>			<i>Diferença Entre os Resultados (%)</i>		<i>Efic. (%)</i>
	$t_f \times t_c (\mu s)$	$R'_d (\Omega)$	$R'_e (\Omega)$	$R_s (\Omega)$	$R'_d (\Omega)$	$R'_e (\Omega)$	$R_s (\Omega)$	$\Delta(R'_d+R_s)$	
0,5 x 5	6 x 25	3 x 50, 3 x 100	70	3 x 10, 3 x 25	6 x 100	70	20	33	88
0,5 x 10	6 x 10	3 x 100, 3 x 275	140	6 x 10	3 x 100, 3 x 400	140	0	33	85
0,5 x 20	6 x 10	6 x 350	140	6 x 10	6 x 400	140	0	14	90
0,5 x 50	3 x 10, 3 x 25	6 x 1400	70	3 x 10, 3 x 25	6 x 1500	70	0	7	90
1,2 x 5	6 x 100	6 x 50	210	6 x 100	6 x 50	210	0	0	62
1,2 x 10	6 x 50	6 x 150	350	6 x 50	6 x 150	280	11	0	79
1,2 x 20	3 x 25, 3 x 50	6 x 350	210	3 x 25, 3 x 50	6 x 400	280	16	14	87
1,2 x 50	6 x 10	6 x 1265	350	3 x 10, 3 x 25	6 x 1265	350	11	0	90
3 x 10	6 x 350	6 x 100	70	6 x 350	3 x 50, 3 x 100	350	13	-25	43
1,9 x 16,1	3 x 100, 3 x 350	3 x 150, 3 x 350	140	3 x 100, 3 x 350	3 x 100, 3 x 400	140	0	0	65
4,5 x 16,1	3 x 350, 3 x 650	6 x 150	350	3 x 350, 3 x 650	6 x 150	350	0	0	49
5 x 20	6 x 650	3 x 150, 3 x 275	70	6 x 650	3 x 150, 3 x 250	140	2	-6	44
5 x 50	6 x 350	6 x 1000	350	6 x 350	6 x 1000	140	-9	-3	74
10 x 50	6 x 1300	3 x 350, 3 x 1000	350	6 x 1300	3 x 400, 3 x 1000	280	-1	4	47

ANEXO D – Diagrama de Ensaio para o Método dos Níveis Múltiplos.



ANEXO E – Diagrama de Ensaio para o Método das Descargas Sucessivas.

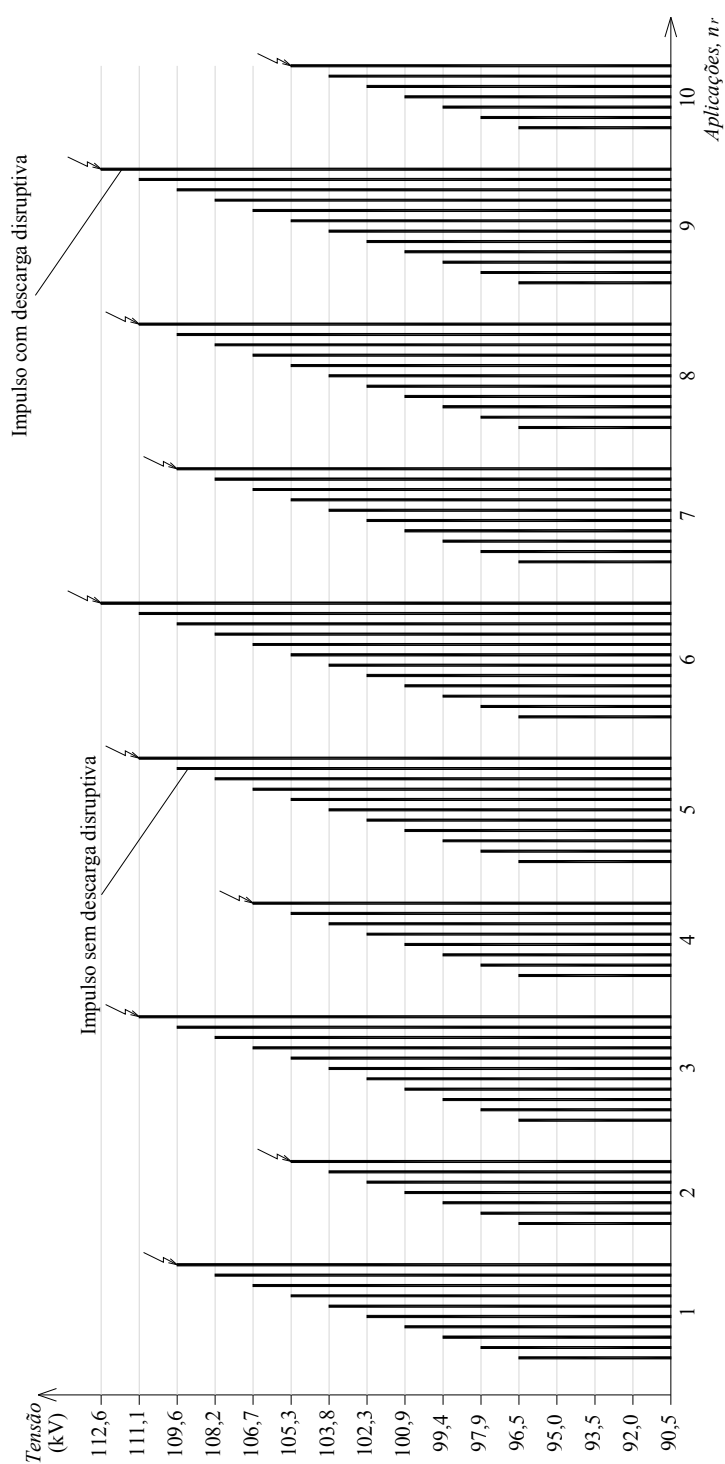


Figura 47 – Diagrama de ensaio para o método das descargas sucessivas. Isolador do tipo pino, classe 15 kV. Forma 1,2 x 50 μ s a seco, polaridade positiva.

ANEXO G – Resultados dos Ensaios para Determinação da Tensão $U_{50\%}$.Tabela 23 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pino Classe 15 kV.

<i>Forma</i>		<i>Tipo Pino Classe 15 kV a Seco</i>									
		<i>Positivo</i>					<i>Negativo</i>				
t_f (μs)	t_c (μs)	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>
0,5	5	0,8	140,8	0,9	1,4	22%	5,3	166,9	3,6	3,8	21%
0,5	10	1,7	135,1	1,2	2,2	17%	2,7	159,5	5,2	3,8	16%
0,5	20	2,5	127,0	1,5	2,5	10%	0,8	151,2	0,7	1,3	10%
0,5	50	1,9	128,9	3,0	3,0	12%	1,1	147,3	1,5	2,0	7%
1,2	5	5,2	130,9	6,7	3,3	13%	1,0	162,1	1,0	1,5	18%
1,2	10	1,5	119,6	1,3	2,1	3%	4,2	150,0	3,0	3,4	9%
1,2	20	1,4	113,0	1,2	1,5	-2%	3,3	148,6	1,5	3,2	8%
1,2	50	1,2	115,6	1,5	2,1	-	1,7	137,9	1,4	2,3	-
3	10	2,3	116,8	3,5	2,0	1%	2,7	140,6	7,8	2,2	2%
2,9	16,1	1,3	114,1	2,0	2,2	-1%	6,5	138,8	4,9	3,2	1%
4,5	16,1	1,4	115,8	1,6	1,7	0%	5,3	137,0	14,6	3,8	-1%
5	20	5,8	114,9	11,2	3,9	-1%	1,3	138,9	2,6	1,9	1%
5	50	8,2	113,9	5,7	5,4	-1%	2,2	135,9	2,6	2,9	-1%
10	50	3,5	113,8	3,0	2,5	-2%	1,1	138,8	2,0	1,5	1%

<i>Forma</i>		<i>Tipo Pino Classe 15 kV sob Chuva</i>									
		<i>Positivo</i>					<i>Negativo</i>				
t_f (μs)	t_c (μs)	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>
0,5	5	1,5	134,3	1,6	2,3	19%	2,0	133,4	1,3	2,4	16%
0,5	10	0,8	122,1	1,0	1,4	8%	1,2	130,4	1,5	2,1	13%
0,5	20	1,3	120,0	1,6	2,2	7%	0,7	126,5	0,8	1,2	10%
0,5	50	2,2	117,4	2,5	3,1	4%	5,5	121,6	7,2	4,6	6%
1,2	5	1,7	127,9	6,2	2,6	14%	8,4	131,8	9,8	3,9	15%
1,2	10	1,1	117,5	1,4	1,8	4%	2,0	127,6	3,6	3,1	11%
1,2	20	1,3	120,2	1,3	2,0	7%	2,5	123,1	4,6	3,6	7%
1,2	50	0,9	112,6	0,9	1,5	-	1,4	115,1	1,9	2,4	-
3	10	1,8	119,0	6,3	2,4	6%	1,4	120,3	2,9	1,9	5%
2,9	16,1	1,7	118,5	2,9	2,6	5%	2,0	118,2	6,8	3,2	3%
4,5	16,1	1,3	121,2	2,1	1,9	8%	0,6	115,6	0,7	1,0	1%
5	20	3,6	118,6	1,5	2,1	5%	1,1	121,7	1,6	1,7	6%
5	50	3,0	116,2	9,9	3,7	3%	3,3	116,3	10,6	4,4	1%
10	50	1,6	112,9	5,5	2,4	0%	1,1	115,8	1,7	1,7	1%

Tabela 24 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pino Classe 25 kV.

Forma		Tipo Pino Classe 25 kV a Seco									
		Positivo					Negativo				
t_f (μ s)	t_c (μ s)	Erro - (kV)	$U_{50\%}$ (kV)	Erro + (kV)	σ (kV)	Variação (%)	Erro - (kV)	$U_{50\%}$ (kV)	Erro + (kV)	σ (kV)	Variação (%)
0,5	5	1,7	156,6	1,4	2,2	15%	9,5	202,9	11,4	5,3	22%
0,5	10	1,3	146,0	1,7	2,2	7%	2,6	200,9	1,6	2,9	21%
0,5	20	2,0	142,2	1,4	2,4	4%	1,7	194,1	1,8	2,5	17%
0,5	50	1,7	135,0	1,2	2,1	-1%	2,0	184,5	2,9	3,3	11%
1,2	5	6,8	158,4	5,5	3,6	16%	5,8	185,7	9,8	3,7	12%
1,2	10	3,0	143,5	1,7	2,9	5%	7,6	169,9	6,0	4,2	2%
1,2	20	2,9	139,6	6,8	3,8	2%	3,5	179,5	1,9	3,1	8%
1,2	50	11,7	136,5	6,5	4,9	-	6,0	165,8	7,6	6,6	-
3	10	2,0	138,5	1,3	1,6	1%	1,0	169,9	1,1	1,4	2%
2,9	16,1	2,4	134,5	1,4	2,4	-1%	4,3	172,0	8,2	3,6	4%
4,5	16,1	0,9	134,1	0,6	1,2	-2%	4,7	176,8	10,1	3,2	7%
5	20	3,4	130,1	4,3	2,4	-5%	1,4	171,3	1,7	1,6	3%
5	50	1,4	127,5	1,0	1,8	-7%	1,3	180,8	1,1	1,8	9%
10	50	1,3	129,6	4,4	2,0	-5%	5,7	179,2	8,8	3,0	8%

Forma		Tipo Pino Classe 25 kV sob Chuva									
		Positivo					Negativo				
t_f (μ s)	t_c (μ s)	Erro - (kV)	$U_{50\%}$ (kV)	Erro + (kV)	σ (kV)	Variação (%)	Erro - (kV)	$U_{50\%}$ (kV)	Erro + (kV)	σ (kV)	Variação (%)
0,5	5	1,8	167,4	2,0	2,6	17%	1,7	160,8	1,8	2,5	18%
0,5	10	1,1	150,4	0,9	1,6	5%	0,7	148,2	0,8	1,3	9%
0,5	20	1,4	146,1	1,0	1,8	2%	2,7	141,7	6,2	3,6	4%
0,5	50	1,2	139,5	1,2	1,9	-3%	2,5	129,8	3,0	3,1	-5%
1,2	5	1,9	160,9	1,1	2,0	12%	0,9	157,5	2,1	1,6	16%
1,2	10	1,4	149,8	1,4	2,0	4%	8,1	145,1	10,2	4,9	7%
1,2	20	1,5	143,8	2,1	2,5	0%	1,9	140,3	6,6	3,0	3%
1,2	50	3,0	143,4	6,9	4,1	-	2,2	135,9	6,8	3,7	-
3	10	1,5	141,9	3,2	2,0	-1%	1,2	141,6	2,4	1,8	4%
2,9	16,1	1,4	140,6	2,3	2,2	-2%	2,4	126,7	8,7	3,6	-7%
4,5	16,1	2,7	137,9	1,9	2,0	-4%	6,4	135,0	3,4	2,8	-1%
5	20	2,3	126,6	6,2	2,2	-12%	0,8	130,1	1,8	1,4	-4%
5	50	1,7	134,7	2,3	2,5	-6%	3,2	132,6	7,1	3,4	-2%
10	50	2,2	128,9	2,5	2,1	-10%	6,3	136,2	7,7	3,5	0%

Tabela 25 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pilar Classe 15 kV.

<i>Forma</i>		<i>Tipo Pilar Classe 15 kV a Seco</i>									
		<i>Positivo</i>					<i>Negativo</i>				
t_f (μs)	t_c (μs)	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>
0,5	5	5,7	148,1	7,6	4,2	12%	1,8	203,8	1,9	2,7	-4%
0,5	10	1,7	133,0	1,3	2,3	1%	1,3	204,2	2,7	2,3	-4%
0,5	20	1,3	129,3	1,1	1,8	-2%	14,2	207,6	4,7	5,4	-2%
0,5	50	0,7	125,4	0,8	1,2	-5%	8,4	194,1	3,2	4,4	-9%
1,2	5	5,0	146,8	3,1	2,8	11%	10,6	221,1	16,1	4,2	4%
1,2	10	1,1	132,3	1,4	2,0	0%	3,1	218,7	1,8	3,1	3%
1,2	20	1,7	133,7	1,4	2,3	1%	2,1	207,9	2,4	2,7	-2%
1,2	50	3,8	131,9	5,1	3,8	-	1,7	212,5	1,8	2,5	-
3	10	0,6	135,7	0,6	0,9	3%	-	-	-	-	-
2,9	16,1	5,3	135,4	15,1	3,9	3%	1,0	220,2	0,9	1,4	4%
4,5	16,1	0,6	132,3	0,6	0,9	0%	-	-	-	-	-
5	20	0,8	134,1	0,7	1,1	2%	-	-	-	-	-
5	50	0,5	137,0	0,4	0,7	4%	0,5	212,4	0,5	0,8	0%
10	50	0,8	134,2	1,5	1,3	2%	3,7	205,2	8,9	2,9	-3%

<i>Forma</i>		<i>Tipo Pilar Classe 15 kV sob Chuva</i>									
		<i>Positivo</i>					<i>Negativo</i>				
t_f (μs)	t_c (μs)	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>
0,5	5	1,8	148,4	1,9	2,6	12%	5,5	200,0	8,3	8,6	23%
0,5	10	1,0	137,9	1,0	1,6	4%	5,8	202,5	9,3	9,0	24%
0,5	20	1,2	134,0	4,1	1,9	1%	3,0	200,4	3,5	5,2	23%
0,5	50	2,2	128,9	3,4	3,4	-2%	3,9	169,7	5,1	6,6	4%
1,2	5	1,2	151,0	1,3	1,8	14%	2,4	193,8	2,4	3,8	19%
1,2	10	2,1	139,5	2,3	2,7	5%	2,7	187,2	3,2	4,7	15%
1,2	20	0,9	134,2	0,9	1,4	1%	3,1	179,4	3,7	5,3	10%
1,2	50	1,5	132,2	1,9	2,5	-	2,2	163,1	2,2	3,5	-
3	10	1,1	139,9	1,8	1,6	6%	2,0	187,2	2,6	3,3	15%
2,9	16,1	2,9	133,8	3,7	3,0	1%	3,8	184,5	5,5	6,2	13%
4,5	16,1	1,6	130,1	5,9	2,4	-2%	1,7	185,9	1,7	2,7	14%
5	20	1,2	128,6	2,3	1,8	-3%	6,5	194,1	13,0	8,4	19%
5	50	3,4	127,4	4,4	3,4	-4%	3,2	170,2	3,3	5,1	4%
10	50	0,9	120,4	1,2	1,5	-9%	5,1	168,1	10,4	6,8	3%

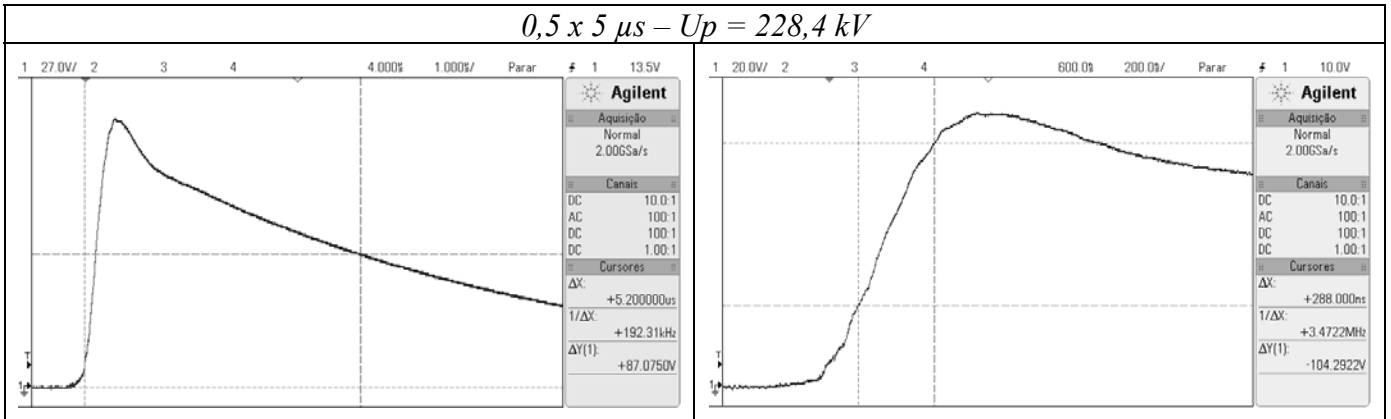
Tabela 26 – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$. Isolador do Tipo Pilar Classe 25 kV.

<i>Forma</i>		<i>Tipo Pilar Classe 25 kV a Seco</i>									
		<i>Positivo</i>					<i>Negativo</i>				
t_f (μs)	t_c (μs)	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>
0,5	5	2,0	171,1	1,3	2,5	13%	3,7	227,8	2,0	3,3	-5%
0,5	10	1,4	154,3	1,0	1,8	2%	0,8	228,2	0,8	1,3	-5%
0,5	20	1,0	149,0	1,1	1,7	-1%	2,8	235,3	3,3	3,5	-2%
0,5	50	2,7	141,0	3,4	3,1	-7%	3,1	222,7	6,4	4,5	-7%
1,2	5	0,9	176,7	0,9	1,4	17%	3,5	236,4	4,6	3,0	-2%
1,2	10	1,0	160,4	1,1	1,6	6%	9,2	243,0	3,9	4,6	1%
1,2	20	0,9	153,1	0,8	1,5	1%	1,6	241,6	2,2	2,6	1%
1,2	50	1,2	151,2	1,0	1,8	-	3,2	240,0	2,5	3,3	-
3	10	0,7	163,9	0,6	0,9	8%	-	-	-	-	-
2,9	16,1	3,1	161,7	1,7	2,8	7%	13,7	246,2	13,3	4,4	3%
4,5	16,1	1,9	152,0	18,6	2,8	1%	-	-	-	-	-
5	20	3,9	163,9	10,6	2,4	8%	-	-	-	-	-
5	50	0,2	162,2	2,3	1,8	7%	1,5	246,0	1,4	2,1	3%
10	50	10,8	159,4	16,8	2,6	5%	-	-	-	-	-

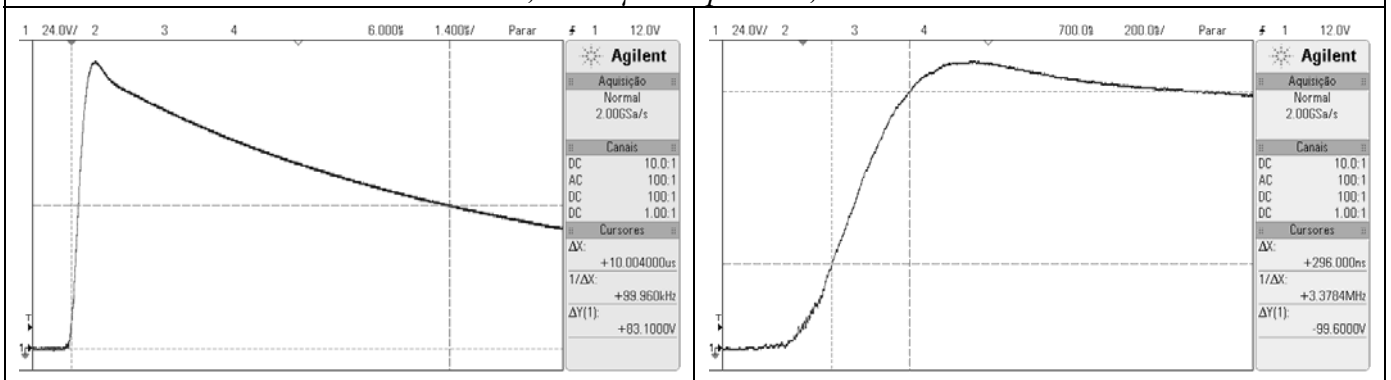
<i>Forma</i>		<i>Tipo Pilar Classe 25 kV sob Chuva</i>									
		<i>Positivo</i>					<i>Negativo</i>				
t_f (μs)	t_c (μs)	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>	<i>Erro - (kV)</i>	$U_{50\%}$ (kV)	<i>Erro + (kV)</i>	σ (kV)	<i>Variação (%)</i>
0,5	5	3,8	173,6	4,2	5,4	14%	4,3	236,7	6,0	7,1	23%
0,5	10	1,9	157,0	2,2	3,3	3%	5,3	216,3	8,0	8,7	13%
0,5	20	1,8	155,6	1,8	3,0	2%	5,3	220,7	8,0	8,4	15%
0,5	50	1,4	146,3	1,4	2,2	-4%	3,3	197,2	3,3	5,3	3%
1,2	5	3,7	176,1	4,8	3,1	16%	1,8	222,2	2,0	3,1	16%
1,2	10	1,1	160,6	1,1	1,7	5%	1,9	212,4	1,9	3,1	11%
1,2	20	1,5	152,8	1,9	2,5	0%	8,9	201,4	19,7	12,5	5%
1,2	50	1,6	152,3	2,2	2,7	-	2,9	192,1	2,9	4,7	-
3	10	1,0	159,5	1,0	1,6	5%	-	-	-	-	-
2,9	16,1	5,5	159,0	6,8	3,7	4%	4,8	208,1	5,3	6,6	8%
4,5	16,1	4,8	150,8	8,2	3,1	-1%	2,0	206,2	2,7	3,4	7%
5	20	2,6	147,8	7,1	2,5	-3%	1,7	195,7	2,3	2,8	2%
5	50	2,1	143,7	7,4	3,4	-6%	1,5	203,5	1,7	2,6	6%
10	50	6,5	146,4	4,0	2,5	-4%	6,0	190,8	16,8	6,0	-1%

ANEXO H – Oscilogramas de Tensão – Cauda e Frente

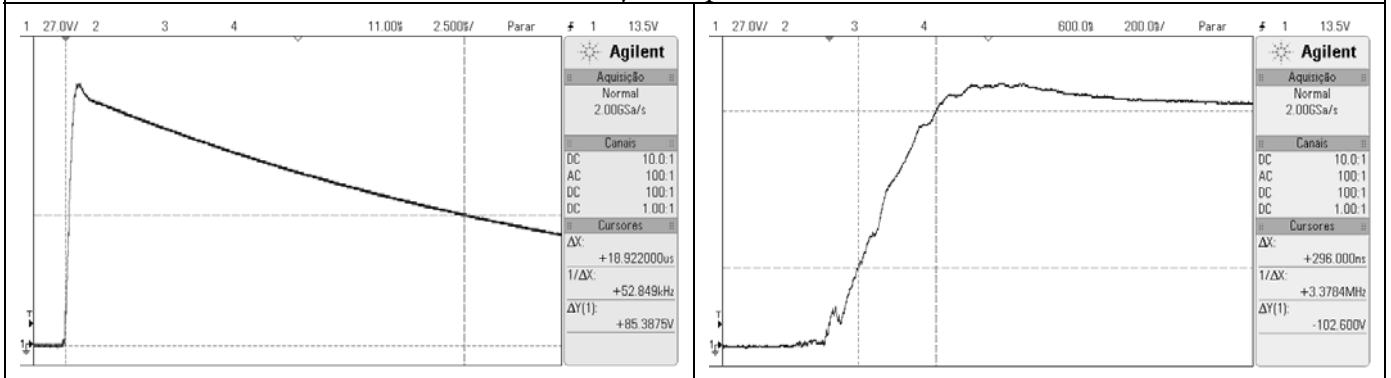
$0,5 \times 5 \mu s - U_p = 228,4 \text{ kV}$



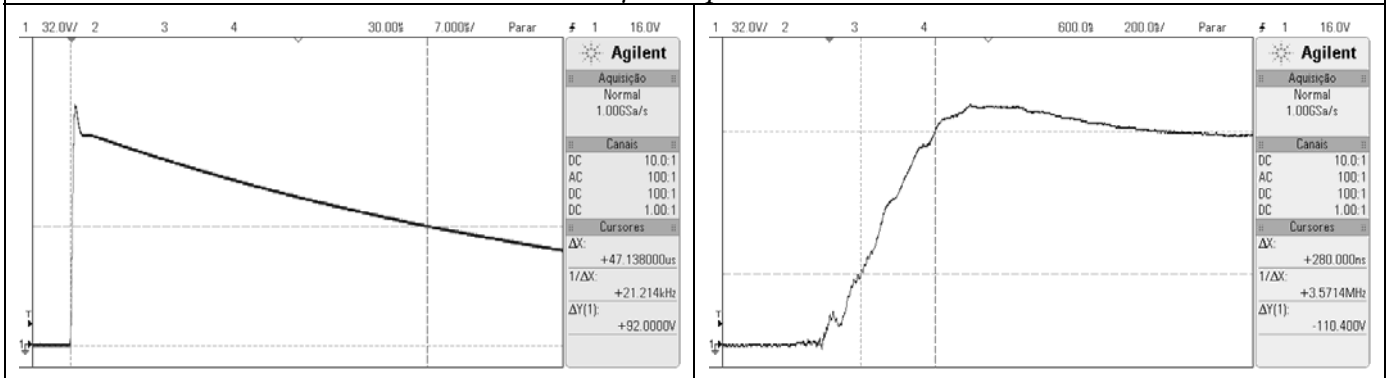
$0,5 \times 10 \mu s - U_p = 218,4 \text{ kV}$



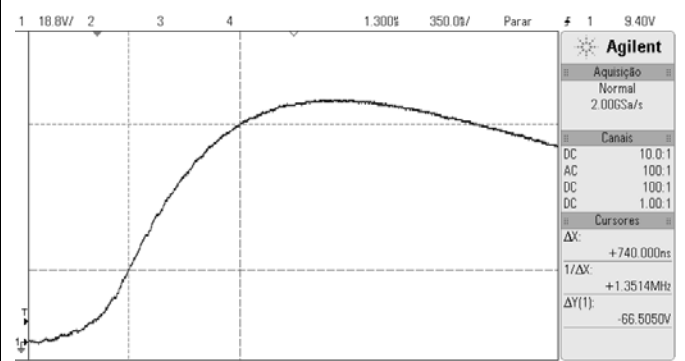
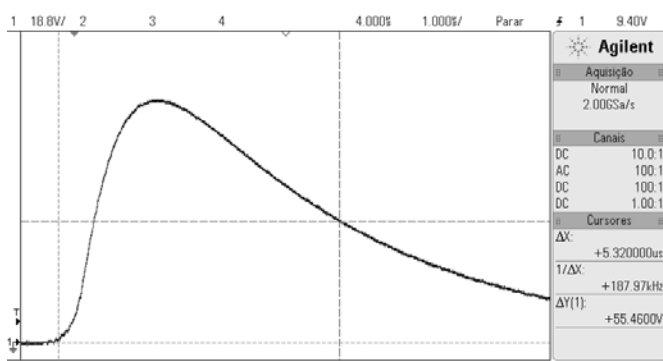
$0,5 \times 20 \mu s - U_p = 224,8 \text{ kV}$



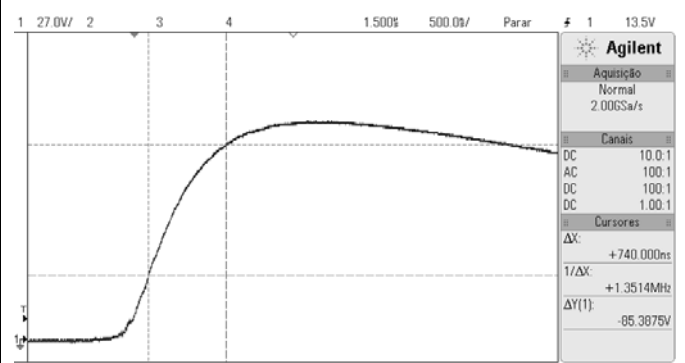
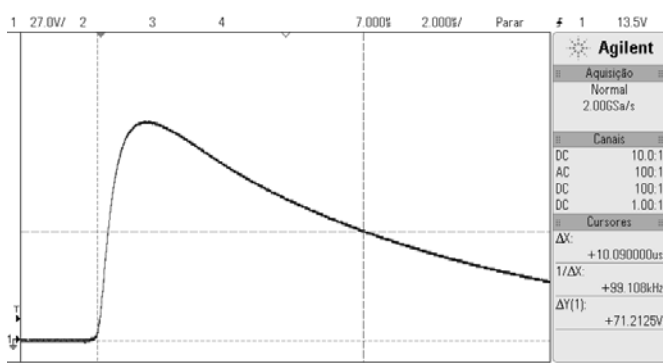
$0,5 \times 50 \mu s - U_p = 241,8 \text{ kV}$



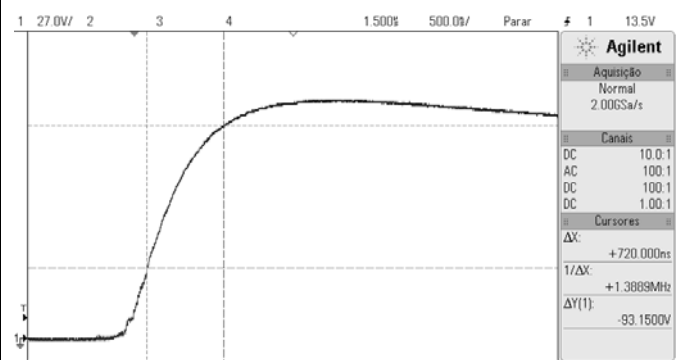
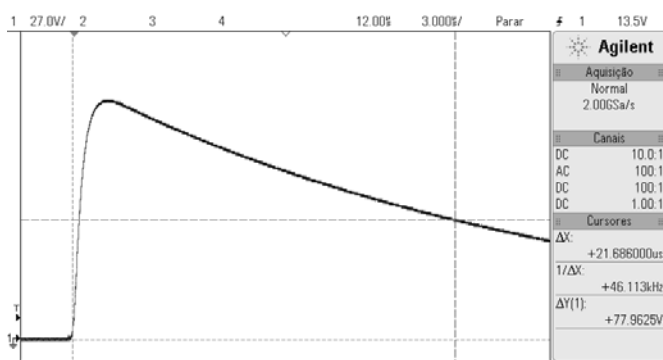
$1,2 \times 5 \mu s - U_p = 145,4 \text{ kV}$



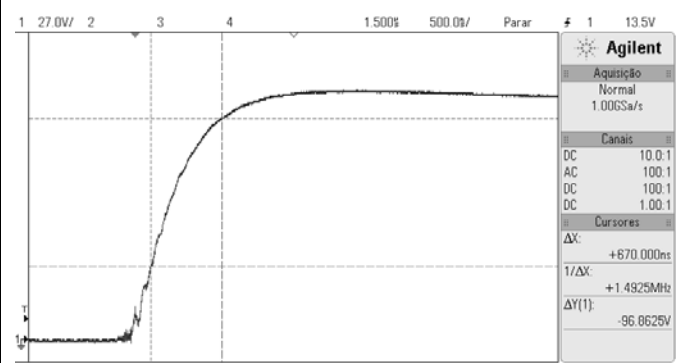
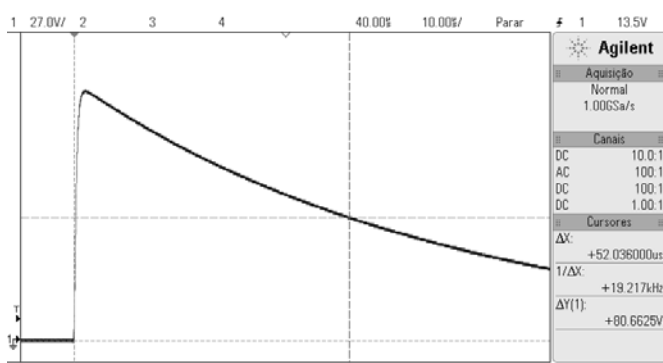
$1,2 \times 10 \mu s - U_p = 186,7 \text{ kV}$



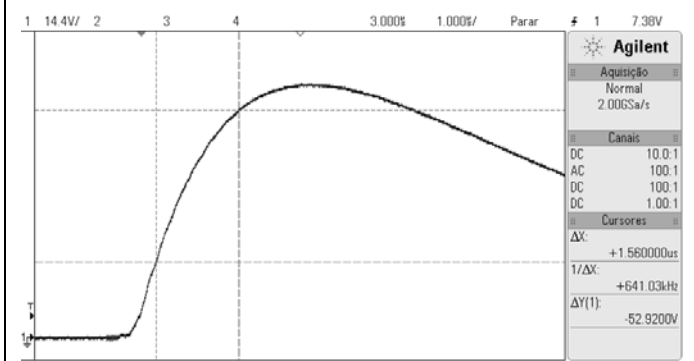
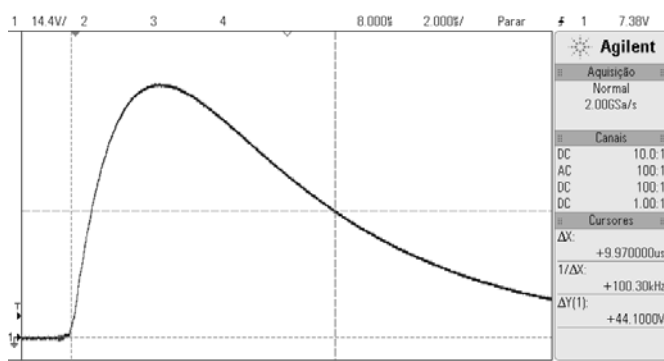
$1,2 \times 20 \mu s - U_p = 204,4 \text{ kV}$



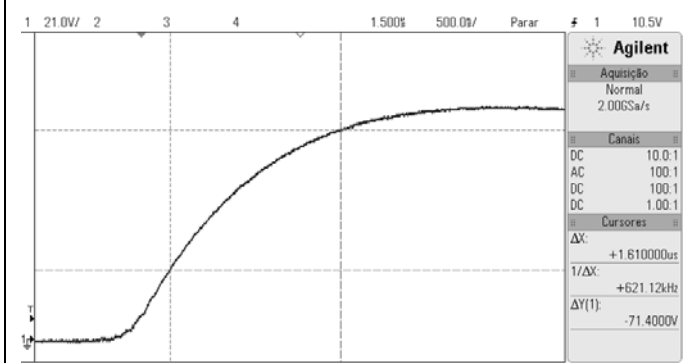
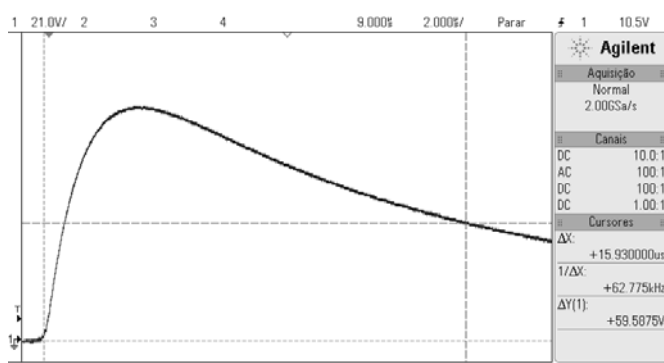
$1,2 \times 50 \mu s - U_p = 212,0 \text{ kV}$



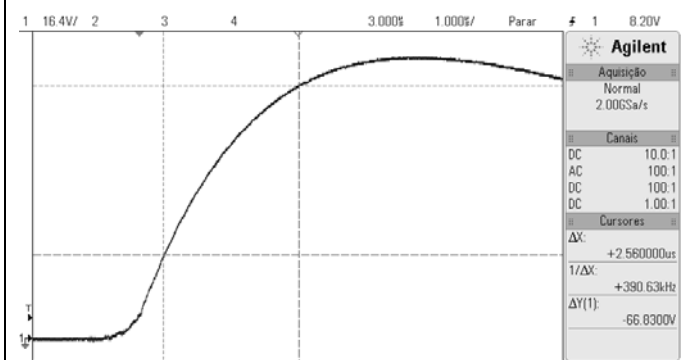
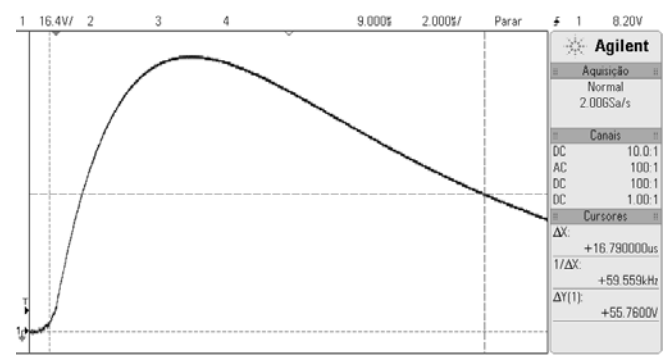
$3 \times 10 \mu s - U_p = 115,9 \text{ kV}$



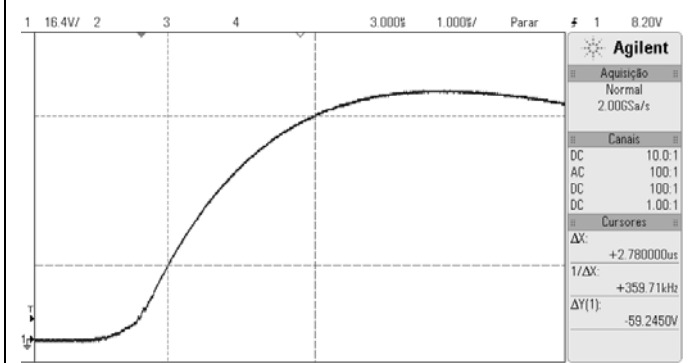
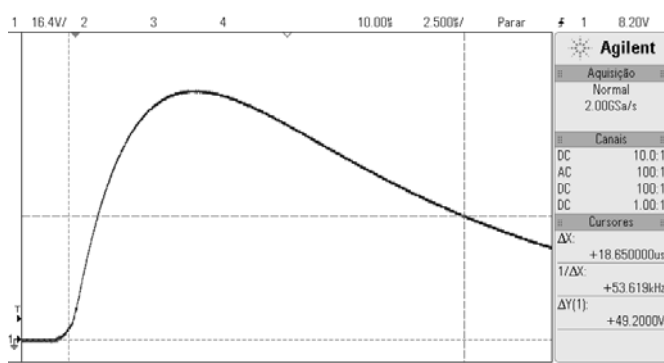
$2,9 \times 16,1 \mu s - U_p = 156,6 \text{ kV}$



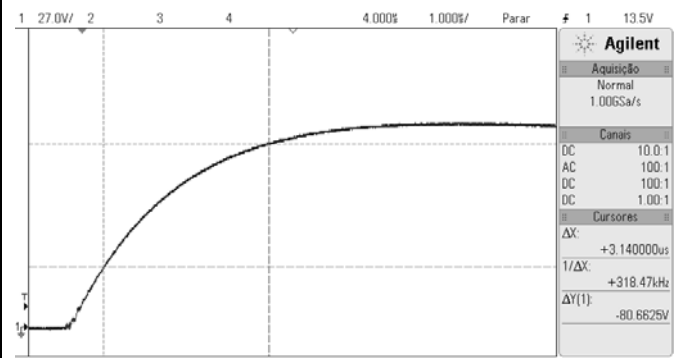
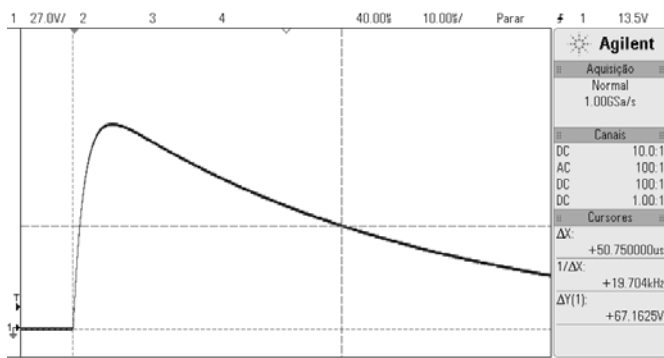
$4,5 \times 16,1 \mu s - U_p = 146,5 \text{ kV}$



$5 \times 20 \mu s - U_p = 129,6 \text{ kV}$



$5 \times 50 \mu s - U_p = 176,5 \text{ kV}$



$10 \times 50 \mu s - U_p = 141,4 \text{ kV}$

