

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Gabriel Henrique de Faria

Estudo do Comportamento Dielétrico de Equipamentos de
Manobra em Média Tensão Frente a Impulsos Não
Padronizados

Itajubá, Junho de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Gabriel Henrique de Faria

Estudo do Comportamento Dielétrico de Equipamentos de Manobra em Média Tensão Frente a Impulsos Não Padronizados

**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. Estácio Tavares Wanderley Neto
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes**

Itajubá, Junho de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Gabriel Henrique de Faria

Estudo do Comportamento Dielétrico de Equipamentos de Manobra em Média Tensão Frente a Impulsos Não Padronizados

Dissertação aprovada por banca examinadora em 23 de Junho de 2017, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.***

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira

Prof. Dr. Credson de Salles

Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes (Coorientador)

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto (Orientador)

Itajubá, Junho de 2017

Dedicatória

*Meus sinceros agradecimentos ao Professor Manuel Luis Barreira
Martinez (in memoriam), pelo conhecimento compartilhado, pela
oportunidade cedida para que eu pudesse realizar meu mestrado junto ao
LAT-EFEI e por ter sido uma referência profissional e pessoal.*

Agradecimentos

- A Deus, pelo dom da vida.
- Ao Professor Manuel Luis Barreira Martinez (in memoriam), pela oportunidade de trabalhar no LAT-EFEI, pela orientação durante a graduação e parte do mestrado e por ter compartilhado sua vasta experiência na área de alta tensão.
- Ao Professor Estácio Tavares Wanderley Neto, pela orientação, pelo ensinamento e pelo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Professor Gustavo Paiva Lopes, pela orientação, pelo ensinamento e pelo auxílio durante a execução dos ensaios realizados e o desenvolvimento deste trabalho.
- A toda equipe do LAT-EFEI, pelo apoio prestado, pelo companheirismo e pela amizade.
- Aos meus pais, Donizete e Lúcia, agradeço por toda dedicação, incentivo e amor a mim demonstrado. Aos meus irmãos Lucas e Ivan e à minha irmã Tainara, pela atenção, carinho e incentivo.
- À CAPES, pelo suporte financeiro concedido para realização desta pesquisa.

Resumo

As descargas atmosféricas podem causar sobretensões no sistema elétrico de potência, capazes de provocar danos em equipamentos e componentes, principalmente na rede de distribuição de energia elétrica. A sua incidência no sistema elétrico de potência é dividida em dois tipos: direta e indireta. As descargas diretas são as que incidem diretamente na linha, resultando em sobretensões de amplitudes elevadas. Por outro lado, as descargas indiretas incidem nas proximidades da rede, induzindo sobretensões com amplitudes reduzidas se comparadas com as descargas diretas, porém, capazes de afetar o sistema de distribuição de energia elétrica. As normas que estabelecem os ensaios em equipamentos frente a tensões de impulso atmosférico, consideram a utilização da forma de impulso de tensão padrão, com 1,2 μ s de tempo de frente e 50 μ s de tempo de cauda. Esta forma é representativa de uma descarga atmosférica direta. Entretanto, as formas de impulso induzidas diferem consideravelmente da forma de impulso padrão, apresentando tempos de frente de 1,2 μ s a 3,5 μ s e cauda de 4 μ s a 10 μ s, por exemplo. Nesse sentido, este trabalho tem a finalidade de avaliar a suportabilidade dielétrica de equipamentos de manobra, que consistem nas chaves seccionadoras e chaves fusíveis de média tensão, projetadas para operar em linhas aéreas de distribuição, nas classes de 15,0 kV e 24,2 kV. Para isto, são utilizadas a tensão disruptiva crítica ($U_{50\%}$) e a curva tensão x tempo (*Curva Vxt*). A fim de avaliar a suportabilidade dielétrica frente a sobretensões induzidas, foram selecionadas cinco formas de impulso não padronizadas, com tempo de frente e cauda de 0,5 x 5 μ s, 0,5 x 20 μ s, 1,2 x 10 μ s, 3 x 16 μ s e 5 x 50 μ s, respectivamente. A forma de impulso padrão também foi avaliada com a finalidade de comparação e os ensaios foram realizados na condição a seco, para as polaridades positiva e negativa. Os resultados oriundos deste trabalho foram comparados com os resultados apresentados na literatura para isoladores de porcelana, também nas classes de 15,0 kV e 24,2 kV. A avaliação destes resultados indica que para ambos os parâmetros utilizados (tensão $U_{50\%}$ e *Curva Vxt*) e formas de impulso, a menor suportabilidade é observada na polaridade positiva para as chaves seccionadoras, mesmo comportamento apresentado pelos isoladores de porcelana. No caso das chaves fusíveis, a menor suportabilidade é observada na polaridade negativa, significando uma mudança da polaridade crítica. Esta mudança pode ser avaliada considerando o processo de formação da descarga disruptiva, que depende da disposição física dos elementos (condutores e isolantes) que compõem os equipamentos. Adicionalmente, os resultados da tensão $U_{50\%}$ indicam um aumento da suportabilidade quando os equipamentos são submetidos às formas de impulso com frentes rápidas e caudas curtas – 0,5 x 5 μ s e 0,5 x 20 μ s. As conclusões apresentadas neste trabalho são importantes para se obter o comportamento dielétrico dos equipamentos e componentes frente a impulsos de tensão, auxiliando na determinação do nível real de isolamento da rede de distribuição.

Palavras-chave: chave seccionadora, chave fusível, formas de impulso não padronizadas, tensão disruptiva crítica, Curvas $V \times t$.

Abstract

Lightning discharges can cause overvoltages on the electrical power system, capable damaging equipment and components, mainly on the distribution network. Its incidence on the electric power system are divided in two types: direct and indirect. Direct strikes are those that strike directly on the lines, resulting on higher voltages. On the other hand, indirect strikes occur in the vicinity of the network, inducing reduced voltages amplitudes in comparison with direct strikes, however, they can affect the distribution system. The standards intended to test equipment and apparatus for lightning withstanding consider to use the standard impulse shape, with 1.2 μs of front time and 50 μs of tail time. This impulse shape is representative of a direct strike. However, the induced overvoltage impulse shape differs considerably from the standard impulse shape, presenting front times from 1.2 μs to 3.5 μs and tail times from 4 μs to 10 μs , for example. In this way, this work aims at evaluating the lightning withstanding of medium voltage switches and cut-out fuses, designed to operate on overhead distribution lines of 15.0 kV and 24.2 kV. For this, it is used the critical flashover voltage ($U_{50\%}$) and the voltage x time curves (V_{xt} Curves). In order to evaluate the lightning withstanding with attention on induced overvoltages, five non-standard impulse shapes were chosen, with front and tail times of 0.5 x 5 μs , 0.5 x 20 μs , 1.2 x 10 μs , 3 x 16 μs and 5 x 50 μs , respectively. The standard impulse shape results are also provided for the purpose of comparison and the tests are performed on dry condition, for positive and negative polarities. The results of this work were compared with the results presented in the literature for porcelain insulators of 15.0 kV and 24.2 kV. The evaluation of the results indicates that for both test methods ($U_{50\%}$ and V_{xt} Curves) and impulse shapes, the lowest withstand values are observed on positive polarity for switches, presenting the same behavior observed for porcelain insulators. In the case of cut-out fuses, the lowest withstand values are observed on negative polarity, meaning a change on the critical polarity. This change may be discussed considering the formation of disruptive discharge, which depends on the physical arrangement of the elements (conductors and insulators) used in the equipment. In addition, the $U_{50\%}$ results show an increase of withstand when stressed by lightning impulses of fast front and short tail times – 0.5 x 5 μs and 0.5 x 20 μs . The conclusions presented in this work are extremely important in order to obtain the dielectric behavior of the equipment and components stressed by impulses shapes, contributing to determine the real level of distribution network insulation.

Keywords: switches, cut-out fuses, nonstandard impulse shapes, critical flashover voltage, V_{xt} curves, lightning overvoltages.

Lista de Figuras

Figura 1 – (a) Descargas atmosféricas que não atingem o solo: (i) Entre nuvens; (ii) No interior da nuvem; (iii) Da nuvem para um ponto na atmosfera. (b) Descargas atmosféricas que atingem o solo: (i) Descendente negativa; (ii) Descendente positiva; (iii) Ascendente positiva; (iv) Ascendente negativa. Fonte: Adaptado de [9].	6
Figura 2 – Propagação de uma descarga atmosférica com canal ascendente movendo em direção ao canal descendente.	7
Figura 3 – Propagação do surto de corrente dado a incidência direta de uma descarga atmosférica em um condutor de fase da linha.	8
Figura 4 – Incremento de elétrons devido a um incremento da distância.	13
Figura 5 – Distorção no campo aplicado causada pelo campo elétrico originado pela avalanche de elétrons. Fonte: Adaptado de [31].	15
Figura 6 – Representação de um arranjo de campo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].	16
Figura 7 – Formação do <i>streamer</i> positivo. Fonte: Adaptado de [25].	17
Figura 8 – Propagação do <i>streamer</i> positivo. Fonte: Adaptado de [25].	18
Figura 9 – Formação do <i>streamer</i> negativo. Fonte: Adaptado de [25].	19
Figura 10 – Propagação do <i>streamer</i> negativo. Fonte: Adaptado de [25].	20
Figura 11 – Propagação do <i>streamer</i> em ramificações para arranjo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].	21
Figura 12 – Comportamento da tensão e corrente com a ocorrência do <i>streamer</i> e posterior ruptura da isolação – Campo uniforme e espaçamento de 10 mm entre eletrodos. Fonte: Adaptado de [25].	22
Figura 13 – Variação da tensão de polaridade positiva por espaçamento entre eletrodos em uma configuração de campo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].	23
Figura 14 – Variação da tensão de polaridade negativa por espaçamento entre eletrodos em uma configuração de campo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].	24
Figura 15 – Forma de impulso de tensão com a ocorrência de uma descarga disruptiva. Fonte: Adaptado de [25].	27
Figura 16 – Configuração ponta esférica-plano. Fonte: Adaptado de [31].	28
Figura 17 – Tensão de ruptura por fator de utilização de campo. Fonte: Adaptado de [31].	28
Figura 18 – Arranjos de eletrodos: (a) Plano-plano com espaçamento de 3 cm; (b) Esfera-plano com espaçamento do 4 cm; (c) Ponta-plano com espaçamento de 5 cm. Fonte: Adaptado de [34].	31

Figura 19 – Tensão crítica de disrupção por variação do espaçamento e pressão: (a) Polaridade positiva e (b) Polaridade negativa. Fonte: Adaptado de [35].	33
Figura 20 – Chave seccionadora de média tensão na classe 15,0 kV: 1 - Terminais; 2 - Olhal para manobra manual (abertura e fechamento); 3 - Haste de abertura e fechamento; 4 - Gancho de fixação da haste; 5 - Isoladores de porcelana; 6 - Base do equipamento, fixada na estrutura da rede.	36
Figura 21 – Chaves seccionadoras: (a) Classe 15,0 kV (b) Classe 24,2 kV.	37
Figura 22 – Chave fusível de média tensão na classe de 15,0 kV: 1 - Terminal superior (entrada); 2 - Isolador de porcelana superior; 3 - Isolador de porcelana inferior; 4 - Gancho de fixação do porta-fusível; 5 - Olhal para manobra manual; 6 - Cartucho ou porta-fusível; 7 - Articulação; 8 - Terminal inferior (saída); 9 - Ponto de fixação do equipamento com a estrutura da rede.	38
Figura 23 – Chaves fusíveis: (a) Classe 15,0 kV; (b) Classe 24,2 kV.	38
Figura 24 – Obtenção da <i>Curva V_{xt}</i> . Fonte: Adaptado de [31].	42
Figura 25 – <i>Curva V_{xt}</i> de um isolador tipo disco aplicando a forma de impulso padronizada na polaridade positiva. Fonte: Adaptado de [48].	43
Figura 26 – <i>Curvas V_{xt}</i> variando o tempo de frente, obtidas entre eletrodos meia esfera com espaçamento de 1 cm. Fonte: Adaptado de [49].	44
Figura 27 – Tensões <i>U_{50%}</i> das chaves seccionadoras de classes 15 kV e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul.	48
Figura 28 – Ponto de maior ocorrência das descargas disruptivas nas chaves seccionadoras.	50
Figura 29 – Tensões <i>U_{50%}</i> das chaves fusíveis de classes 15 kV e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul.	52
Figura 30 – Disrupção na chave fusível de classe 24,2 kV: (a) Descarga disruptiva rente ao isolador superior; (b) Descarga disruptiva no isolador superior, atingindo o parafuso de fixação do equipamento com a cruzeta; (c) Descarga disruptiva percorrendo o isolador inferior.	53
Figura 31 – <i>Curvas V_{xt}</i> obtidas para a chave seccionadora de classe 15,0 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.	55
Figura 32 – <i>Curvas V_{xt}</i> obtidas para a chave seccionadora de classe 24,2 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.	56
Figura 33 – <i>Curvas V_{xt}</i> obtidas para a chave fusível de classe 15,0 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.	57
Figura 34 – <i>Curvas V_{xt}</i> obtidas para a chave fusível de classe 24,2 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.	58
Figura 35 – Danos causados na chave fusível de classe 15,0 kV: (a) Terminal de entrada; (b) Terminal de saída; (c) Base do equipamento, no centro do isolador.	59

Figura 36 – Tensões $U_{50\%}$ após e antes da realização dos ensaios para obtenção das <i>Curvas V_{xt}</i> , utilizando a forma de impulso $1,2 \times 50 \mu s$: (a) Chave fusível de classe 15,0 kV; (b) Chave fusível de classe 24,2 kV.	60
Figura 37 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 15,0 kV na polaridade positiva. Fonte: O autor (2017) e [7].	61
Figura 38 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 15,0 kV na polaridade negativa. Fonte: O autor (2017) e [7].	62
Figura 39 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 24,2 kV na polaridade positiva. Fonte: O autor (2017) e [7].	64
Figura 40 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 24,2 kV na polaridade negativa. Fonte: O autor (2017) e [7].	65
Figura 41 – Diagrama elétrico do gerador de impulsos do LAT-EFEI. Fonte: [7].	74
Figura 42 – Tensões $U_{50\%}$ dos isoladores de porcelana do tipo pino de classes 15 e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul. Fonte: Adaptado de [7].	83
Figura 43 – Tensões $U_{50\%}$ dos isoladores de porcelana do tipo pilar de classes 15 e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul. Fonte: Adaptado de [7].	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tensão $U_{50\%}$ para arranjo esfera-esfera em ambas polaridades, considerando variação do espaçamento. Fonte: Adaptado de [19].	30
Tabela 2 – Tensão $U_{50\%}$ variando o espaçamento entre eletrodos haste-haste. Fonte: Adaptado de [32].	31
Tabela 3 – Avaliação da suportabilidade dielétrica de três arranjos de eletrodos submetidos a impulsos de tensão. Fonte: Adaptado de [34].	32
Tabela 4 – Fator de utilização de campo para o arranjo analisado considerando variação do espaçamento. Fonte: Adaptado de [35].	33
Tabela 5 – Formas de impulso utilizadas no trabalho.	39
Tabela 6 – Método dos acréscimos e decréscimos padronizado, sendo: X - ocorrência da descarga disruptiva; 0 - não ocorrência da descarga disruptiva. Fonte: [7].	41
Tabela 7 – Valores normalizados das condições atmosféricas. Fonte: [20].	46
Tabela 8 – Coeficientes m e w relacionados ao parâmetro g . Fonte: [20].	47
Tabela 9 – Tensões $U_{50\%}$: Chave seccionadora, classe 15,0 kV.	49
Tabela 10 – Tensões $U_{50\%}$: Chave seccionadora, classe 24,2 kV.	49
Tabela 11 – Diferença de resultados entre as polaridades para as chaves seccionadoras, considerando como base de cálculo o maior valor de $U_{50\%}$.	50
Tabela 12 – Tensões $U_{50\%}$: Chave fusível, classe 15,0 kV.	52
Tabela 13 – Tensões $U_{50\%}$: Chave fusível, classe 24,2 kV.	53
Tabela 14 – Diferença de resultados entre as polaridade para as chaves fusíveis, considerando como base de cálculo o maior valor de $U_{50\%}$.	54
Tabela 15 – ANTES: tensões $U_{50\%}$ utilizadas na avaliação das chaves fusíveis, antes da realização dos ensaios para levantamento das <i>Curvas V_{xt}</i> . APÓS: tensões $U_{50\%}$ novas, referentes à ensaios realizados após obtenção das <i>Curvas V_{xt}</i> . Resultados obtidos para a forma de impulso padrão.	59
Tabela 16 – Distâncias de arco para os equipamentos da classe 15,0 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].	61
Tabela 17 – Formas de impulso mais críticas para os equipamentos da classe 15,0 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].	63
Tabela 18 – Distâncias de arco para os equipamentos da classe 24,2 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].	63

Tabela 19 – Formas de impulso mais críticas para os equipamentos da classe 24,2 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].	66
Tabela 20 – Formas de impulso utilizadas no trabalho. Fonte: Adaptado de [7].	75
Tabela 21 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pino, classe 15,0 kV. Fonte: Adaptado de [7].	82
Tabela 22 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pino, classe 24,2 kV. Fonte: Adaptado de [7].	82
Tabela 23 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pilar, classe 15,0 kV. Fonte: Adaptado de [7].	82
Tabela 24 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pilar, classe 24,2 kV. Fonte: Adaptado de [7].	83

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AES Sul	Distribuidora gaúcha de energia.
COMSOL [®]	Programa para simulações multifísicas.
Curvas V x t	Característica tensão x tempo de disrupção.
IAP	Impulse Analyzer Program.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão Professor Manuel Luís Barreira Martinez da Universidade Federal de Itajubá.
Matlab [®]	Programa computacional iterativo de alta performance voltado para o cálculo numérico.
MEAE	Método de Ensaio e Análise Estatística.
NBI	Nível Básico de Isolamento.
NBR	Norma Brasileira.
P&D	Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.
RC	Circuito elétrico de primeira ordem formado por capacitores e resistores.
UNIBO	Universidade de Bologna, Itália.

Lista de Símbolos

$\bar{\alpha}$	Coefficiente efetivo de ionização.
$\bar{\alpha}(x)$	Coefficiente efetivo de ionização variável com a distância.
Δu	Passo fixo de tensão do ensaio de acréscimos e decréscimos.
$\Delta U_{50\%}$	Divergência dos resultados da tensão $U_{50\%}$ das formas de impulso não padronizadas em relação à forma padronizada.
Δu_t	Passo fixo de tensão para a <i>Curva V_{xt}</i> .
Δx	Aumento do comprimento do “ <i>streamer</i> ”.
0	Não ocorrência de descarga disruptiva na isolação.
C	Capacitância característica da rede.
d	Distância de separação dos eletrodos.
D	Coefficiente de difusão.
d_a	Distância de arco.
dn	Comprimento adicional.
dn	Número adicional de elétrons.
e	Carga eletrônica.
$E(x)$	Variação do campo elétrico com variação do comprimento x .
E_0	Campo elétrico aplicado ao dielétrico.
E_c	Campo elétrico a uma distância xc .
E_{max}	Campo elétrico máximo observado no arranjo.
E_{medio}	Campo elétrico médio ao longo do espaçamento entre eletrodos.
E_r	Campo elétrico na ponta da avalanche de elétrons.
f_a	Frequência de atração.
f_i	Frequência de Ionização.
g	Parâmetro relacionado às descargas iniciais.
H	Umidade durante o ensaio.
H_0	Umidade padrão.
I_p	Valor da corrente de retorno da descarga atmosférica.
k	Parâmetro dependente do tipo de tensão aplicada sobre a isolação.
k_1	Fator de correção da densidade do ar.
k_2	Fator de correção da umidade do ar.
K_t	Fator de correção para as condições atmosféricas padronizadas.
ku_i	Número de eventos em cada nível de tensão (disrupção ou não).

L	Indutância característica da rede.
m	Expoente utilizado para calcular o fator de correção da densidade do ar (k_1).
N	Fator de utilização de campo elétrico.
n_0	Número de elétrons no ponto $x = 0$.
n_d	Número de elétrons no ponto $x = d$.
n_t	Número total de aplicações de impulsos de tensão no ensaio <i>Up and Down</i> .
N_t	Número total de níveis de tensão no ensaio <i>Up and Down</i> .
n_x	Número de elétrons a uma distância x .
P	Pressão durante o ensaio.
P_0	Pressão padrão.
R	Raio da ponta da avalanche de elétrons.
R_m	Média radial da difusão da avalanche de elétrons provocada pelas ramificações.
t	Tempo do avanço da avalanche de elétrons.
T	Temperatura durante o ensaio.
T_0	Temperatura padrão.
t_1	Tempo de frente.
t_2	Tempo de cauda.
t_{b0}	Tempo correspondente ao ponto inicial da forma de impulso.
t_{b2} e t_{b5}	Tempo do início da forma de impulso (t_{b0}) até a ocorrência do colapso de tensão.
td	Tempo entre o instante que a forma de impulso atinge V_s e o instante em que ocorre o colapso de tensão.
u_0	Nível de tensão inicial do ensaio <i>Up and Down</i> .
U_0	Tensão de disrupção corrigida.
u_1	Próximo nível Após u_0 .
u_2	Próximo nível Após u_1 .
$U_{50\%}$	Tensão disruptiva crítica.
U_d	Sobretensão causada pela descarga direta no condutor de fase.
U_e	Tensão disruptiva mensurada no ensaio.
u_i	Valor de pico da tensão de impulso para o nível i .
V_{b2}	Valor de pico da tensão de impulso.
V_{b5}	Tensão de disrupção.
vd	Velocidade de deslocamento dos elétrons.
ve	Velocidade de deriva.
V_p	Valor de pico da tensão de impulso aplicada sobre a isolação.

V_r	Tensão aplicada sobre a isolação.
V_s	Valor crítico de tensão para iniciar a ionização cumulativa.
w	Expoente utilizado para calcular o fator de correção da umidade do ar (k_2).
X	Ocorrência de descarga disruptiva na isolação.
Z_s	Impedância característica da rede.
α	Coefficiente de ionização de <i>Townsend</i> (colisões iônicas por unidade de comprimento).
δ	Densidade relativa do ar.
η	Número de atrações por unidade de comprimento.
ξ_0	Permissividade do meio.
σ	Desvio padrão da tensão $U_{50\%}$.

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Visão Geral.....	1
1.2	Relevância do Tema	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura do Trabalho.....	3
2	Descargas Atmosféricas e seus Efeitos no Sistema Elétrico de Potência.....	5
2.1	Formação da Descarga Atmosférica.....	5
2.1.1	Descargas Atmosféricas Diretas.....	8
2.1.2	Descargas Atmosféricas Indiretas	9
2.2	Avaliação e Formação de Descargas Disruptivas em Eletrodos e Equipamentos com Isolação a Ar.....	10
2.2.1	Formação da Descarga Disruptiva em Eletrodos Isolados a Ar	10
2.2.2	Formação e Propagação de Streamers	12
2.2.3	Transição do Canal Streamer para a Descarga Disruptiva	21
2.2.4	Descarga Disruptiva Causada por Tensão de Impulso	26
2.2.5	Avaliação da Descarga em Diferentes Configurações de Eletrodos	27
3	Procedimentos para Avaliação da Suportabilidade Dielétrica das Amostras	35
3.1	Amostras Ensaaiadas.....	35
3.2	Formas de Impulso Utilizadas.....	39
3.3	Método dos Acréscimos e Decréscimos para Obtenção da Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$	40
3.4	Curva Característica Tensão de Pico por Tempo de Disrupção – <i>Curva V_{xt}</i>	42
3.5	Correção da Tensão Disruptiva para as Condições Atmosféricas Padronizadas	45
4	Resultado dos Ensaios e Análises	48
4.1	Resultados e Análises das Tensões $U_{50\%}$	48
4.1.1	Chaves Seccionadoras	48
4.1.2	Chaves Fusíveis	51
4.2	Resultados e Análises das <i>Curvas V_{xt}</i>	54

4.2.1	Chaves Seccionadoras	54
4.2.2	Chaves Fusíveis	57
4.3	Comparação com os Resultados dos Isoladores de Porcelana dos Tipos Pino e Pilar	60
4.3.1	Classe 15,0 kV	60
4.3.2	Classe 24,2 kV	63
5	Conclusões	67
5.1	Publicações na Área	68
5.2	Trabalhos Futuros	69
ANEXO A – Obtenção das Formas de Impulso Através do Gerador de Impulsos de Tensão do LAT-EFEI		74
ANEXO B – Curvas Vxt Obtidas nos Ensaios		76
ANEXO C – Tensões $U_{50\%}$ para os Isoladores Pino e Pilar		82

1 Introdução

1.1 Visão Geral

O sistema elétrico é submetido a diversas eventualidades de origem natural, operacional, entre outras. Dentre os fenômenos de origem natural, destacam-se as descargas atmosféricas, que ocorrem com elevada frequência em grande parte do território brasileiro [1, 2]. Essas descargas elétricas podem causar surtos de tensão na rede elétrica, capazes de provocar danos em equipamentos e componentes, comprometendo o fornecimento contínuo e adequado de energia.

Apesar das descargas atmosféricas atingirem todos os setores do sistema elétrico como geração, transmissão e distribuição, seus efeitos são mais drásticos à rede de distribuição de energia elétrica, pois operam em média tensão, de 1,0 kV a 36,2 kV e, conseqüentemente, apresentam menor nível de isolamento [3].

Para minimizar a ocorrência de danos e desligamentos indevidos na rede causados por surtos de tensão provocados por descargas atmosféricas, os equipamentos que compõem o sistema são projetados de modo a atender uma tensão suportável de impulso atmosférico, também conhecida como Nível Básico de Isolamento (NBI), de acordo com a norma ABNT NBR 6939 [4].

A comprovação da suportabilidade e/ou desempenho dielétrico dos equipamentos frente a surtos de tensão causados por descargas atmosféricas é feita por meio de ensaios em laboratório. Os procedimentos de ensaios são normalizados e definidos por comitês técnicos pertinentes, tomando-se como base o NBI do equipamento e utilizando a forma de impulso padrão que é representativa dos surtos causados por descargas atmosféricas que incidem diretamente na rede (descargas diretas). Tal forma de impulso apresenta 1,2 μ s de tempo de frente (t_f)⁽¹⁾ e 50 μ s de tempo de cauda (t_2)⁽²⁾.

Por outro lado, sabe-se que a maioria dos surtos são induzidos por descargas que incidem nas proximidades das redes (descargas indiretas), pois esse tipo de incidência ocorre com maior frequência e também pode causar danos no sistema de distribuição. Nesses casos, as formas de impulso induzidas apresentam diversas combinações entre tempo de frente e cauda, diferenciando-as da forma de impulso padrão, 1,2 x 50 μ s. Portanto, torna-se fundamental a avaliação da suportabilidade dielétrica de equipamentos da rede de média tensão

(1) Tempo de frente: parâmetro virtual definido como 1/0,6 vez o intervalo de tempo entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de crista na curva da tensão de ensaio.

(2) Tempo de cauda: parâmetro virtual definido como o intervalo dentre a origem e o instante no qual a curva de ensaio decresce até a metade do valor da tensão de ensaio.

frente a impulsos não padronizados, levando em consideração o comportamento dielétrico para ambas as polaridades.

1.2 Relevância do Tema

O Brasil apresenta alto índice de ocorrência de descargas atmosféricas nuvem-solo [1, 2]. Esses eventos solicitam constantemente a isolação da rede elétrica através de surtos de tensão induzidos ou originados nos cabos de fase, os quais são um dos maiores causadores de falhas no sistema de distribuição, afetando os índices que determinam a qualidade do fornecimento de energia. Portanto, é grande a preocupação das empresas vinculadas ao setor elétrico com respeito aos problemas causados por descargas atmosféricas.

Frente a esse cenário, o Laboratório de Alta Tensão Professor Manuel Luís Barreira Martinez da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI) desenvolve diversas pesquisas relacionadas à coordenação em isolamento de redes de média tensão e avaliação da suportabilidade dielétrica de equipamentos utilizados no sistema.

Dentre as recentes pesquisas realizadas no LAT-EFEI, destaca-se o P&D denominado “*Coordenação de Isolamentos em Redes de Média Tensão Com Neutros Ressonantes*”, [5], desenvolvido em parceria com a concessionária de energia elétrica AES Sul e a Universidade de Bolonha (UNIBO), na Itália. Dentre os assuntos abordados, esse projeto previa estudos da suportabilidade dielétrica de isoladores, chaves seccionadoras e chaves fusíveis de média tensão frente a formas de impulso de tensão, padronizada e não padronizadas.

Os estudos foram realizados com base nos resultados de ensaios experimentais em laboratório. A partir dos resultados é possível estimar a influência dos tempos de frente e cauda na suportabilidade de cada equipamento, bem como a influência da polaridade da tensão de impulso na isolação. Dessa maneira, é possível indicar, para cada equipamento, qual a forma de impulso e a polaridade crítica que poderá ser utilizada na execução de futuros ensaios.

Os resultados dos ensaios para os isoladores de porcelana tipo pino e pilar, foram analisados e publicados em estudos similares a esse trabalho, desenvolvidos por *Lopes*, conforme referências [6, 7, 8]. O presente trabalho complementa os estudos até então realizados, avaliando a suportabilidade das chaves seccionadoras e chaves fusíveis frente a surtos causados por descargas atmosféricas diretas e indiretas, levando em consideração a polaridade da forma de impulso aplicada sobre a amostra. Além disso, é possível realizar comparações entre os resultados obtidos com aqueles apresentados por *Lopes*, considerando a geometria dos equipamentos.

O nível real de isolamento de determinada rede de distribuição pode ser estimado conhecendo a suportabilidade dos equipamentos instalados. Isso permite estudos de coordenação de isolamento mais precisos, resultando em um aumento da confiabilidade em função da redução da taxa de desligamentos indevidos.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo primário avaliar a influência dos tempos de frente e cauda, e polaridade das formas de impulso representativas de surtos causados por descargas atmosféricas, direta ou indireta, sobre a isolação de chaves seccionadoras e chaves fusíveis de média tensão, nas classes 15,0 kV e 24,2 kV. Para isto, os parâmetros utilizados são a *Tensão Disruptiva Crítica* ($U_{50\%}$) e a *Curva V_{xt}* , dada pela tensão de pico (ou de disrupção) versus tempo de corte (instante do colapso da tensão).

Os objetivos secundários são:

- Indicar a forma de impulso e a polaridade crítica para cada equipamento ensaiado.
- Realizar um estudo estatístico comparativo entre os resultados e amostras ensaiadas.
- Comparar os resultados apresentados neste trabalho com os apresentados na literatura para isoladores de porcelana dos tipos pino e pilar.
- Indicar os equipamentos com melhores e piores desempenhos para as redes de distribuição nas classes de 15,0 kV e 24,2 kV.
- Abordar as diferenças de suportabilidade dielétrica entre os equipamentos ensaiados com base nas teorias da formação das descargas disruptivas em eletrodos e equipamentos isolados a ar.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos, seguidos de referências e anexos. No *Capítulo 1* é apresentada a introdução da dissertação desenvolvida, indicando uma visão geral do tema abordado, a relevância do trabalho e os objetivos almejados.

No *Capítulo 2* é apresentada uma breve revisão bibliográfica a respeito da formação das descargas atmosféricas, bem como seus efeitos no sistema elétrico de potência. Nesse ponto são discutidas as diferenças entre a formação das sobretensões causadas por descargas diretas e indiretas. Com a finalidade de analisar a influência da polaridade e geometria dos equipamentos na sua suportabilidade dielétrica, a parte final do capítulo apresenta uma revisão bibliográfica

dos fenômenos e teorias envolvidos na formação da descarga disruptiva em eletrodos e equipamentos que apresentam isolação a ar.

No *Capítulo 3* é apresentada as chaves seccionadoras e chaves fusíveis estudadas no trabalho. São apresentadas também as 5 formas de impulso não padronizadas, utilizadas na avaliação da suportabilidade dielétrica das amostras ensaiadas, bem como os métodos para obter os parâmetros *Tensão Disruptiva Crítica ($U_{50\%}$)* e *Curva V_{xt}* . Em sequência são detalhados os equacionamentos necessários para realizar a correção da tensão disruptiva para as condições atmosféricas padronizadas.

O *Capítulo 4* contém os resultados dos ensaios das amostras, apresentados em formato gráfico e em tabelas. Os resultados são analisados estatisticamente para cada equipamento, comparando as formas de impulso e polaridades. Por fim, é feita uma análise comparativa da suportabilidade dielétrica dos equipamentos ensaiados nesse trabalho e os resultados obtidos para os isoladores de porcelana dos tipos pino e pilar.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões do trabalho e as discussões finais. Também são indicadas as publicações do autor relacionadas ao tema e as sugestões para trabalhos futuros.

No *Anexo A* da dissertação, encontra-se o diagrama elétrico do gerador de impulsos do LAT-EFEI, utilizado para reproduzir as formas de impulso avaliadas no trabalho. Adicionalmente é apresentada uma tabela com os valores de resistências utilizadas para variar o tempo de frente e cauda das formas de impulso de tensão. No *Anexo B* são apresentas as *Curvas V_{xt}* levantadas durante os ensaios realizados. A fim de comparar os resultados, o *Anexo C* contém em tabelas e gráficos, os resultados da tensão $U_{50\%}$ dos isoladores de porcelana do tipo pino e pilar.

2 Descargas Atmosféricas e seus Efeitos no Sistema Elétrico de Potência

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os conceitos relacionados à formação da descarga atmosférica, destacando seus efeitos no sistema elétrico de potência, principalmente nas redes elétricas de distribuição, que opera em níveis reduzidos de suportabilidade. Por fim, são abordados os conceitos físicos envolvendo a formação da descarga disruptiva em espaçamentos isolados a ar, meio dielétrico no qual as amostras analisadas nesse trabalho são inseridas.

2.1 Formação da Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica consiste em um fenômeno natural, aleatório e comum durante tempestades, caracterizada como sendo o rompimento de um meio dielétrico, no caso o ar, entre duas superfícies eletricamente carregadas com polaridades opostas, ocasionado o surgimento de uma corrente intensa em um curto intervalo de tempo. Essas descargas podem ocorrer no interior da nuvem, entre nuvens, da nuvem para o solo ou da nuvem para um determinado ponto na atmosfera [7, 9]. As descargas nuvem-solo podem ocorrer para ambas as polaridades e de ambas extremidades, ou seja, da nuvem para o solo, chamada de descarga descendente ou do solo para a nuvem, chamada de descarga ascendente. As descargas mais comuns são as descendentes negativas, transferindo cargas negativas para o solo e representando algo em torno de 90% das ocorrências [1, 10].

Em uma nuvem de tempestade ocorre o surgimento de cargas positivas e negativas devido a colisões de partículas de gelo, conforme apresenta a referência [11]. A mesma referência indica que a distribuição das cargas no interior da nuvem é um fenômeno complexo, pois há correntes de ar em diversas direções, criando vários centros de carga. Porém, de maneira geral as cargas positivas se acumulam na parte superior, por serem mais leves se comparadas com as cargas negativas. A concentração de carga na base da nuvem induz uma concentração de carga de polaridade oposta no solo, a partir de então, surge um intenso campo elétrico que pode provocar a ruptura da isolamento através de uma descarga elétrica.

Na Figura 1 é apresentado de modo ilustrativo, os tipos de descargas atmosféricas que podem ocorrer em nuvens de tempestade [9]. Como o foco do trabalho são os efeitos causados pela descarga atmosférica no sistema elétrico de distribuição de energia, onde são instalados os equipamentos analisados, os conceitos apresentados abordam a ocorrência da descarga

atmosférica nuvem-solo, capaz de provocar transitórios na rede elétrica, caracterizados por impulsos de tensão de tempos de frente rápidos, variando tipicamente entre 0,1 e 20 μ s, conforme a norma IEC 60071-1 [12].

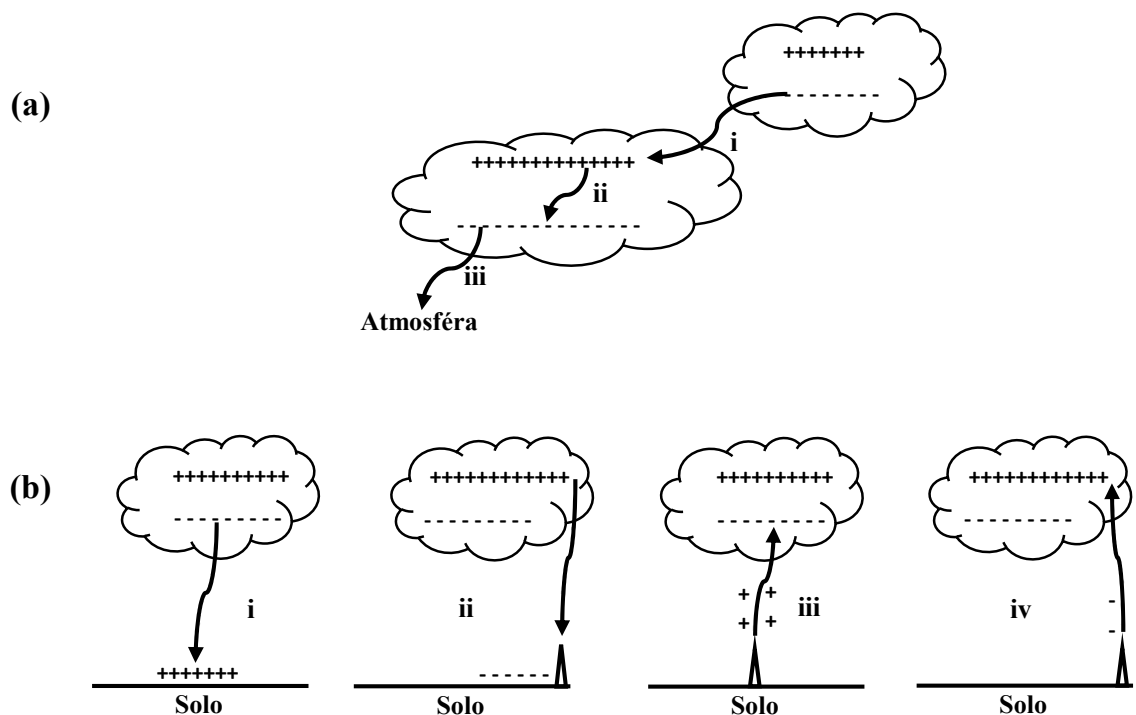


Figura 1 – (a) Descargas atmosféricas que não atingem o solo: (i) Entre nuvens; (ii) No interior da nuvem; (iii) Da nuvem para um ponto na atmosfera. (b) Descargas atmosféricas que atingem o solo: (i) Descendente negativa; (ii) Descendente positiva; (iii) Ascendente positiva; (iv) Ascendente negativa. Fonte: Adaptado de [9].

São ilustradas na Figura 1 - (a) as descargas atmosféricas que não atingem o solo, ou seja, no interior da nuvem, entre nuvens e da nuvem para um ponto da atmosfera, representadas por (i), (ii) e (iii), respectivamente.

Do mesmo modo, na Figura 1 - (b) são apresentados os quatro tipos de descargas nuvem-solo, sendo (i) a descarga descendente negativa mais comum de ocorrer, pois as cargas negativas se concentram na parte inferior da nuvem, geralmente resultando em menor distância entre nuvem e solo. Neste caso, as cargas negativas são transferidas para o solo. Por outro lado, as descargas descendentes positivas (ii) geralmente ocorrem quando a parte superior da nuvem, onde se concentram as cargas positivas, se desloca à frente da parte inferior, devido a corrente de ar mais intensa nesta região. Dada a presença de uma estrutura de altura elevada, cargas negativas são induzidas e concentradas na estrutura, podendo assim surgir uma descarga elétrica (nuvem-estrutura). As condições necessárias para causar a descarga descendente positiva a torna mais difícil de ocorrer [7, 10].

As indicações (iii) e (iv) da Figura 1 - (b), referem-se às descargas ascendentes positiva e negativa, respectivamente, que são raramente observadas. Essas descargas se iniciam no solo e transferem cargas em direção à nuvem, geralmente a partir de uma estrutura elevada, como é o caso de montanhas ou torres [9].

A descarga atmosférica se inicia a partir de um canal precursor ionizado, chamado líder escalonado [7, 9, 13]. Na medida que o canal se move em direção ao solo, várias ramificações são observadas e, a certa distância entre a extremidade do canal principal com o solo, a intensidade de campo elétrico resultante faz surgir um ou mais canais ascendentes em direção à descarga, conforme é apresentado na Figura 2. A conexão dos canais provoca a conexão elétrica entre nuvem e solo, surgindo uma corrente de alta intensidade, chamada de corrente de retorno, que aquece o canal principal tornando-o luminoso [9].

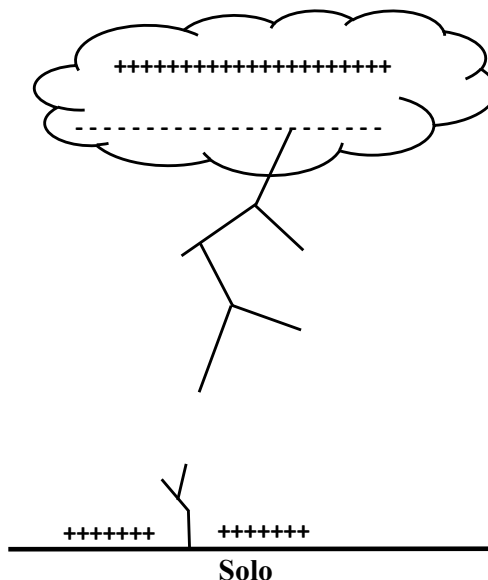


Figura 2 – Propagação de uma descarga atmosférica com canal ascendente movendo em direção ao canal descendente.

No caso das descargas descendentes negativas, é comum a formação de descargas subsequentes no canal principal após a extinção da corrente de retorno. Este fato é menos frequente para as descargas descendentes positivas [1, 7, 14].

Considerando a incidência das descargas atmosféricas no sistema elétrico de potência, pode-se dividi-las em dois tipos: direta e indireta. Os próximos subitens detalham a ocorrência de surtos de tensão na rede elétrica causados pelos dois tipos de descargas atmosféricas.

2.1.1 Descargas Atmosféricas Diretas

As descargas atmosféricas que incidem nos condutores de fase, nas estruturas, nos equipamentos ou nos cabos de blindagem do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica são chamadas de descargas atmosféricas diretas [7, 15, 16]. A incidência deste tipo de descarga causa sobretensões elevadas na rede elétrica, podendo provocar descargas disruptivas em equipamentos, caracterizadas pelo rompimento de um meio dielétrico através de um arco elétrico. Entretanto, as descargas diretas são menos frequentes, pois na maioria das vezes são interceptadas por estruturas elevadas próximas à rede.

A sobretensão causada pela incidência direta da descarga atmosférica depende da corrente de retorno (I_p), da impedância característica da linha (Z_s) e do ponto de incidência (condutor de fase ou cabo de blindagem). Por exemplo, se a descarga atingir o condutor de fase, a partir do ponto de incidência a corrente de retorno se divide em duas, percorrendo a linha em ambas direções e causando o surto de tensão [7], conforme é apresentado na Figura 3.

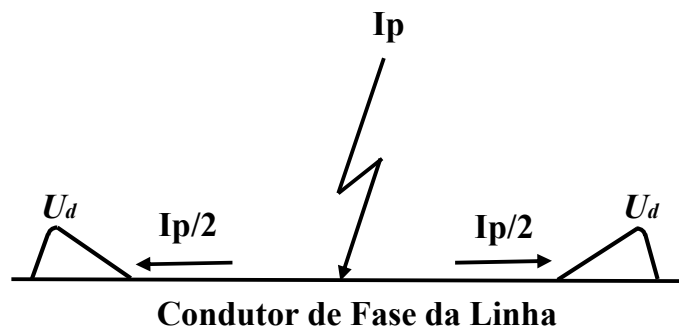


Figura 3 – Propagação do surto de corrente dado a incidência direta de uma descarga atmosférica em um condutor de fase da linha.

O valor da sobretensão resultante (U_d) é dado pela equação (1):

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

A impedância característica da rede pode ser obtida conhecendo-se a indutância e a capacitância características da rede (L e C , respectivamente), conforme equação (2):

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

A descarga disruptiva em equipamentos causada por surtos de tensão provocados por descargas diretas nos condutores de fase são chamadas de *flashover*. Por outro lado, se a descarga atingir diretamente a estrutura que suporta a linha ou o condutor de blindagem, utilizado para evitar a descarga direta no condutor de fase, a sobretensão causada dependerá da impedância característica do condutor de blindagem, da estrutura e da impedância de aterramento da rede. A sobretensão que irá atingir os isoladores e equipamentos como chave seccionadora e chave fusível poderá ser suficiente para provocar a ruptura da isolação e injetar o surto no condutor de fase. Esse tipo de falha dielétrica é chamado de *back-flashover*, sendo mais difícil de ocorrer, pois depende de descargas atmosféricas com corrente de retorno mais elevadas, além de outros fatores. Mais detalhes sobre os tipos de falhas causadas por descargas atmosféricas diretas podem ser encontradas nas referências [7, 17, 18].

2.1.2 Descargas Atmosféricas Indiretas

Para realização de ensaios em equipamentos e componentes do sistema elétrico frente a ocorrência de surtos de tensão causados por descargas atmosféricas, é utilizada a forma de impulso padronizada, representativa de uma descarga direta, com $1,2 \mu\text{s}$ de tempo de frente (t_1) e $50 \mu\text{s}$ tempo de cauda (t_2) [19, 20]. No entanto, a maioria dos surtos originados por descargas atmosféricas ocorrem devido a descargas indiretas, que incidem nas proximidades da rede elétrica e induzem sobretensões capazes de provocar falhas dielétricas em equipamentos ao longo da rede, principalmente no sistema de distribuição de energia.

A indução de sobretensões na linha provocadas por descargas indiretas ocorre devido ao acoplamento eletromagnético entre a descarga e a linha, geralmente em pontos próximos ao ponto de incidência [7]. A amplitude do surto e o seu formato depende de diversos fatores, como por exemplo, parâmetros da corrente de retorno, a distância entre a descarga e a linha, a resistividade do solo e a geometria da linha [21, 22, 23, 24].

Conforme [7], se o solo for considerado um condutor perfeito, sem resistividade, a tensão induzida será proporcional à altura dos condutores, caso contrário, a relação entre a altura dos condutores com a tensão induzida não será linear. A mesma referência apresenta mais detalhes relacionados à influência dos parâmetros no formato e na amplitude do surto de tensão induzido na linha devido a ocorrência de descargas indiretas.

Com base nos parâmetros da descarga, do solo e da linha e através de modelos matemáticos implementados em ferramentas computacionais, é possível estimar os parâmetros da tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas. A análise começa através do cálculo da corrente de retorno, utilizando os modelos apropriados [25]. Por meio dessa análise é

possível determinar os campos eletromagnéticos gerados pela corrente de retorno em diversos pontos da rede. Por fim, a amplitude e o formato do surto de tensão induzido são estimados através dos modelos de acoplamento, utilizados para descrever a interação entre linha e campo eletromagnético gerado [26, 27, 28, 29].

Diversos experimentos relacionando a medição de um surto de tensão induzido em uma linha e a estimativa do seu formato e amplitude através da utilização de métodos computacionais [21, 22, 23, 24, 29], utilizam linhas experimentais variando o número de condutores, geometria, resistência de aterramento, entre outros fatores. A descarga atmosférica é obtida através do lançamento dos foguetes em direção a nuvens. Conectado ao foguete encontra-se um fio metálico, responsável por guiar a descarga elétrica forçada.

Através desses experimentos foi possível observar que as formas de impulso de tensão causadas por descargas indiretas apresentam formatos diferentes da padronizada. Os resultados indicaram variações do tempo de frente entre 1,2 μs e 3,5 μs . Os tempos de cauda variaram entre 4 μs e 10 μs . No entanto, dada a quantidade de fatores que influenciam na tensão induzida, outros formatos de tensões de impulso podem ser observados.

2.2 Avaliação e Formação de Descargas Disruptivas em Eletrodos e Equipamentos com Isolação a Ar

A formação da descarga disruptiva entre condutores isolados por um meio dielétrico é um fenômeno complexo, influenciado por fatores como: tipo do material isolante (líquido, sólido e gasoso), distribuição do campo elétrico, polaridade da tensão, bem como pressão, umidade e temperatura que o arranjo ou equipamento está submetido. Esses fatores são determinantes na suportabilidade dielétrica dos equipamentos. Quando não estudados ou não conhecidos, podem provocar erros no projeto e conseqüentemente redução do nível de confiabilidade da rede em que o dispositivo será instalado.

Dessa maneira, este item apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos, teorias e experimentos relacionadas à formação da descarga disruptiva em diversas configurações de eletrodos isolados a ar, meio dielétrico em que os equipamentos analisados neste trabalho são inseridos.

2.2.1 Formação da Descarga Disruptiva em Eletrodos Isolados a Ar

Grande parte dos equipamentos do sistema elétrico de potência operam em áreas externas, submetidos às condições ambientais típicas da região em que estão instalados. Esses

equipamentos são envolvidos por ar, que apresenta menor rigidez dielétrica se comparado ao isolante utilizado no aparato, como por exemplo: porcelana, polímeros e vidro. No caso das amostras estudadas, que são descritas no capítulo seguinte, ambas apresentam isoladores de porcelana separando os condutores de fase e terra e são instaladas em redes abertas de distribuição. Na ocorrência de sobretensões capazes de romper a isolação externa, a descarga disruptiva surgirá entre os terminais condutores, através de um arco elétrico percorrendo o ar.

Dentre os modelos que explicam o fenômeno físico da descarga disruptiva, destacam-se o de *Townsend* e o modelo *streamer* [25]. *Townsend* estudou a variação da corrente elétrica em um gás, medida entre dois eletrodos de placas paralelas, apresentando campo elétrico uniforme [30]. A teoria levantada por *Townsend* definiu importantes conceitos relacionados à formação da descarga disruptiva, como o coeficiente de ionização primário e secundário e o chamado coeficiente de ionização de *Townsend* (α), abordado nos itens seguintes. No entanto, apesar desse modelo explicar muitos fenômenos relacionados às descargas disruptivas nos gases, sua aplicação não é geral, como no caso de grandes espaçamentos e em campos não uniformes, conforme mencionado em [30].

Embora muitos dos conceitos abordados nesse capítulo se relacionem com o modelo de *Townsend*, a formação da descarga em eletrodos com isolação a gás será apresentada através do modelo *streamer*, que explica mais fielmente a ocorrência de ruptura em dielétricos devido a solicitação de campos elétricos não uniformes. O modelo de *Townsend* é detalhado em [25, 30, 31, 32].

Entre dois condutores isolados a ar, submetidos a um determinado campo elétrico, existirão dois fenômenos opostos, a ionização e a desionização. O processo de ionização provoca o aumento do número de elétrons no meio isolante. Por outro lado, a desionização é oposta, provocando a redução do número de elétrons. A variação entre os processos depende do campo elétrico aplicado, sendo que existirá um valor limite, acima do qual será possível a ionização cumulativa, dando início à avalanche de elétrons e subsequentemente a formação de *streamers* (canais ionizados de baixa condutividade).

Para as condições atmosféricas padronizadas, o valor limite de campo para a ocorrência de ionização cumulativa e início do processo de ruptura da isolação é de aproximadamente 26 kV/cm [25]. Porém, para a ocorrência da ruptura da isolação duas condições devem ser satisfeitas:

- O campo elétrico deve exceder o valor crítico;

- Para uma certa magnitude de campo elétrico, existe um certo valor de comprimento crítico. Se esse comprimento for igual ou maior que o espaçamento entre os eletrodos, a probabilidade de ocorrência da descarga disruptiva será maior.

De maneira resumida, a ocorrência da descarga disruptiva tem início através de um único elétron, movendo sob a influência de um campo elétrico. Através de colisões ionizantes, ocorre a formação de uma avalanche de elétrons propagando-se pelo ar, dando origem ao *streamer*. O *streamer* poderá conectar os eletrodos através de um canal de baixa condutividade, no entanto, não necessariamente ocorrerá a ruptura da isolação. Para que ocorra a disrupção é necessário a termolização do canal [25], processo caracterizado pela diminuição de pressão no *streamer*, aumento da temperatura e da condutividade do filamento.

Apenas com a termolização, em campos elétricos uniformes, ocorrerá a ruptura do dielétrico através de um arco elétrico. Por outro lado, para campos não uniformes surgem as descargas corona, anteriores à descarga disruptiva. Nessa etapa ocorre a formação do *leader*, canal de alta condutividade e de elevada temperatura. Se o canal *leader* atingir a outra extremidade, ou seja, conectando os eletrodos, ocorrerá um colapso de tensão e a isolação será rompida através de um arco elétrico.

Nos tópicos seguintes serão apresentados com mais detalhes os processos descritos anteriormente, visando evidenciar os fatores que influenciam na ocorrência da descarga disruptiva e, conseqüentemente, a suportabilidade dielétrica dos equipamentos.

2.2.2 Formação e Propagação de Streamers

A presença de um elétron livre, movendo-se sob influência do campo elétrico (E_0) aplicado ao dielétrico, poderá dar origem a novos elétrons livres através de colisões ionizantes. Os novos elétrons livres irão gerar outros através do mesmo processo e, por fim, surgirá uma avalanche de elétrons [25].

Considere que o elétron se move no eixo x e, assume-se que, em uma distância x , o número de elétrons é nx , conforme é mostrado na Figura 4, onde os eletrodos são placas paralelas separados a uma distância d , representando um arranjo de campo uniforme.

Sabe-se também que α (coeficiente de ionização de *Townsend*) representa o número de colisões iônicas por unidade de comprimento, dado pela equação (3), onde f_i é a frequência de ionização e v_e é a velocidade de deriva (velocidade média do elétron causada devido a um campo elétrico aplicado) [33].

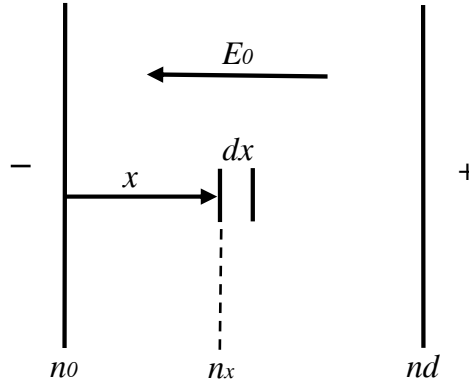


Figura 4 – Incremento de elétrons devido a um incremento da distância.

$$\alpha = \frac{f_i}{v_e} \quad (3)$$

Por outro lado, η é o número de atrações por unidade de comprimento, responsável pela desionização, dado pela equação (4), sendo f_a a frequência de atração.

$$\eta = \frac{f_a}{v_e} \quad (4)$$

Considerando um comprimento adicional dx , conforme apresenta a Figura 4, pode-se determinar o número adicional de elétrons (dn), de acordo com a equação diferencial (5).

$$dn = nx (\alpha - \eta) dx \quad (5)$$

Através de manipulações matemáticas na equação (5), tem-se a equação (6).

$$nx = e^{(\alpha - \eta)x} \quad (6)$$

Analisando a equação (6), repara-se que o número de elétrons, nx , cresce exponencialmente com a distância de propagação. Esse crescimento é chamado de avalanche de elétrons.

Por outro lado, a ionização cumulativa ocorre apenas se o termo $(\alpha - \eta)$ for maior que zero, ou seja, o número de colisões ionizantes é maior do que o número de atrações. Esse termo pode ser representado por $\bar{\alpha}$, chamado de coeficiente efetivo de ionização, resultando na equação (7).

$$nx = e^{\bar{\alpha} x} \quad (7)$$

Assumindo que na ponta da avalanche os elétrons são confinados em uma região esférica de raio R , pode-se dizer que o campo elétrico (Er) ao seu redor é dado pela equação (8), [25]:

$$Er = \frac{e_c e^{\bar{\alpha} x}}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad (8)$$

O termo e_c da equação (8) refere-se à carga eletrônica, e ϵ_0 é a permissividade do meio.

A equação (8) descreve o campo elétrico considerando que a avalanche ocorre em apenas um canal. No entanto, os elétrons avançam em várias ramificações laterais, sendo que a média radial da difusão da avalanche, R_m , provocada pelas ramificações, é dada pela equação (9), conforme [25]. Portanto, R torna-se R_m .

$$R_m = \sqrt{4Dt} \quad (9)$$

O elemento D da equação (9) é o coeficiente de difusão, relacionado ao número de ramificações. Adicionalmente, t é o tempo relacionado ao avanço da avalanche, dado em função da distância percorrida (x) pela velocidade de deslocamento dos elétrons (v_d), conforme mostra a equação (10):

$$t = \frac{x}{v_d} \quad (10)$$

Substituindo a equação (9) e (10) na equação (8), tem-se a equação (11).

$$Er = \frac{e e^{\bar{\alpha} x}}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{v_d}{4Dx} \right) \quad (11)$$

Através da equação (11) pode-se concluir que o aumento do comprimento da avalanche provoca aumento no campo elétrico criado na sua ponta e, se o valor for igual ou maior do que o campo elétrico crítico, a avalanche de elétrons dará início ao canal de baixa condutividade, chamado *streamer*. Na Figura 5 é apresentada a distorção causada no campo elétrico aplicado devido ao campo elétrico originado pela avalanche de elétrons [31].

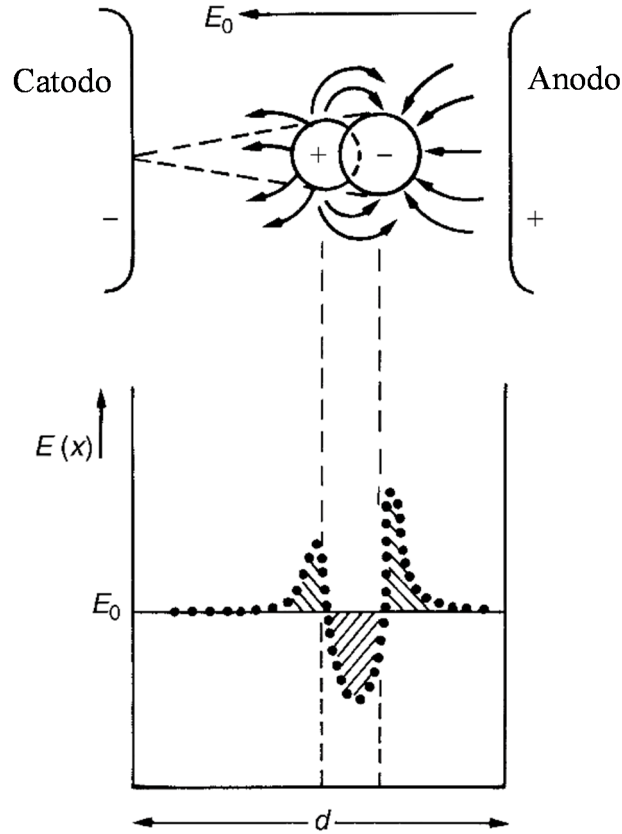


Figura 5 – Distorção no campo aplicado causada pelo campo elétrico originado pela avalanche de elétrons.
Fonte: Adaptado de [31].

A transição da avalanche de elétrons para o canal *streamer* ocorre apenas se o número de elétrons na ponta da avalanche atingir um valor crítico, aproximadamente 10^8 [31]. Neste caso, através da equação (7), pode-se determinar o comprimento crítico da avalanche para ocorrência do *streamer* em campos uniformes, conforme indica a equação (12).

$$nx = e^{\bar{\alpha}x} = 10^8 \quad \therefore \quad \bar{\alpha}x \approx 18 \quad (12)$$

Para arranjos em que o campo caracteriza-se como não uniforme, como no caso dos eletrodos ponta-plano, apresentados na Figura 6, a distância crítica para início do *streamer* é axial e, neste caso $\bar{\alpha}$ não é uma constante, mas sim, função do comprimento x [31]. Tem-se portanto a equação (13).

$$\int_0^x \bar{\alpha}(x) dx \geq 18 \quad (13)$$

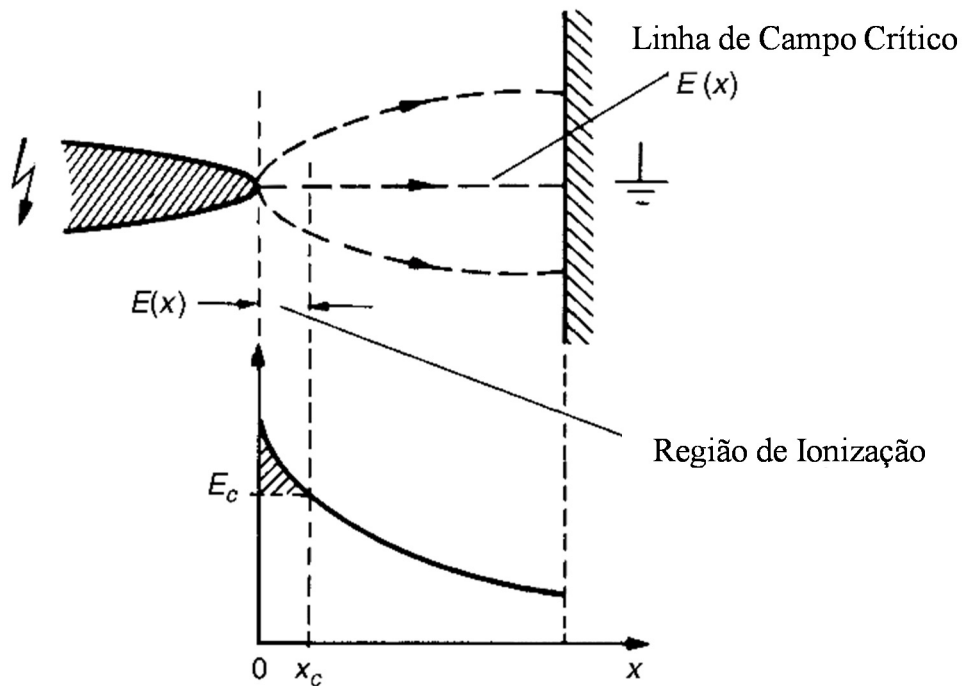


Figura 6 – Representação de um arranjo de campo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].

Na Figura 6 é apresentada também a variação da intensidade do campo ao longo da distância de separação dos eletrodos, considerando que a solicitação de tensão é imposta sobre a ponta, com o plano aterrado. A intensidade de campo máximo se concentra na ponta do eletrodo.

Outro fator que influencia na formação e propagação dos *streamers* é a polaridade da tensão aplicada, quando contínua ou de impulso, sendo determinante na ocorrência da descarga disruptiva. A Figura 7 apresenta um esquemático com a formação de um *streamer* positivo, que se desloca em direção ao catodo, conforme [25].

De acordo com a representação da Figura 7, tem-se os seguintes processos na formação do *streamer* positivo:

- Em **A**, um fóton externo atinge o catodo devido à radiação eletromagnética, liberando um elétron em **B**, esse fenômeno é chamado de efeito fotoelétrico;
- O elétron em **B**, através de colisões iônicas provoca o surgimento de novos elétrons, a repetição desse processo forma a avalanche de elétrons **C**;
- A avalanche se propaga pelo meio aumentando o número de elétrons em sua ponta, conforme **D**. Se, na ponta da avalanche, o número de elétrons for maior ou igual ao valor crítico (10^8), o campo elétrico originado será suficiente para iniciar o *streamer*;

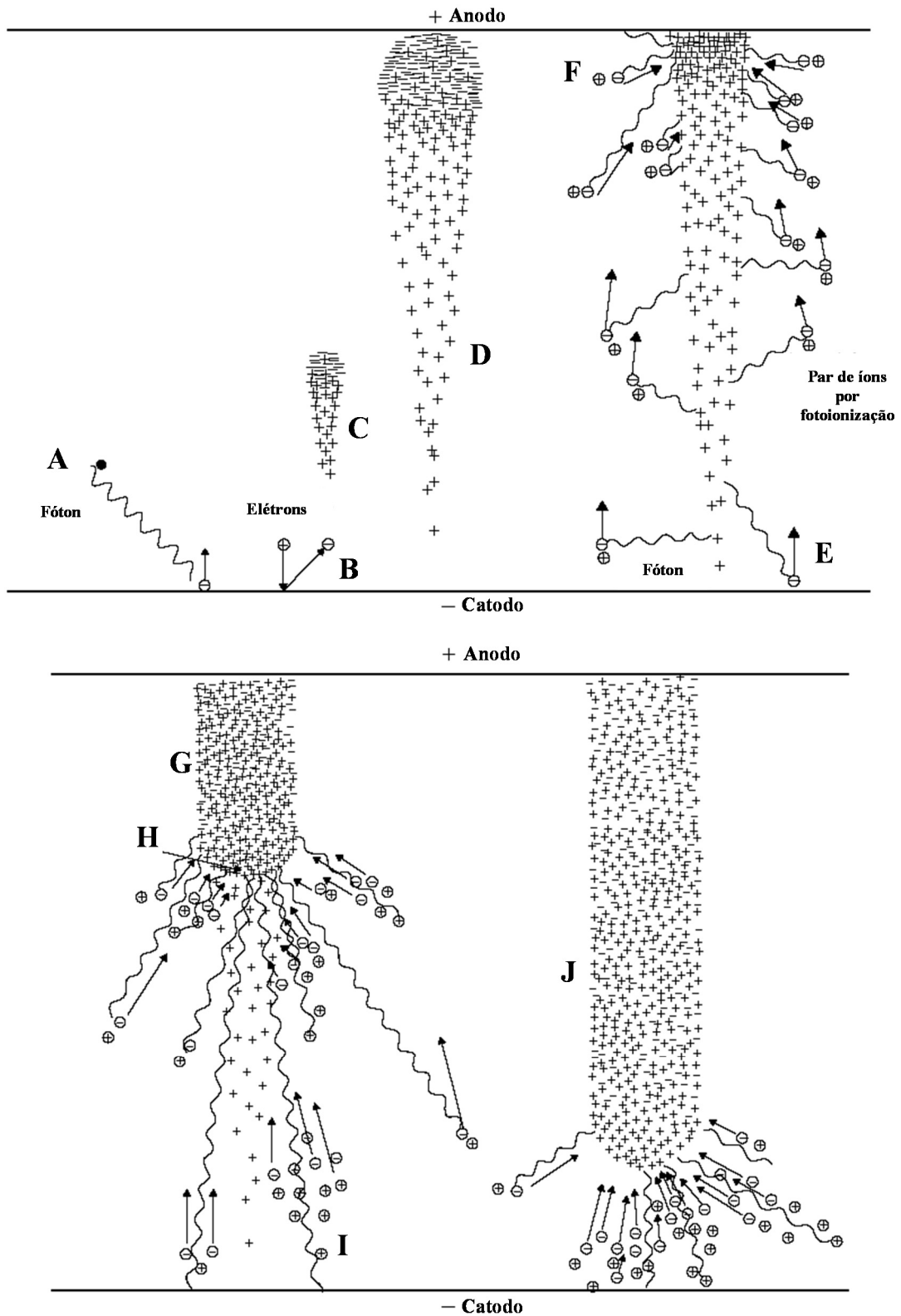


Figura 7 – Formação do *streamer* positivo. Fonte: Adaptado de [25].

- O processo E indica que fótons originados da avalanche produzem elétrons livres através do catodo e do gás isolante;

- Em **F** o espaço de carga positiva próxima ao anodo aumenta o campo elétrico e o *streamer* está na iminência de ocorrer;
- O processo **G** representa o plasma de íons positivos e elétrons, formando o *streamer*;
- A ponta do *streamer* se move em direção ao catodo, processo **H**;
- Em **I** ocorre a produção de elétrons livres devido aos fótons, formando novas avalanches;
- Por fim, em **J** o *streamer* encontra-se próximo ao catodo, na iminência de conectar os eletrodos através de um canal de baixa condutividade;

Na Figura 8 é representada de modo ilustrativo a propagação de um *streamer* positivo em direção ao catodo.

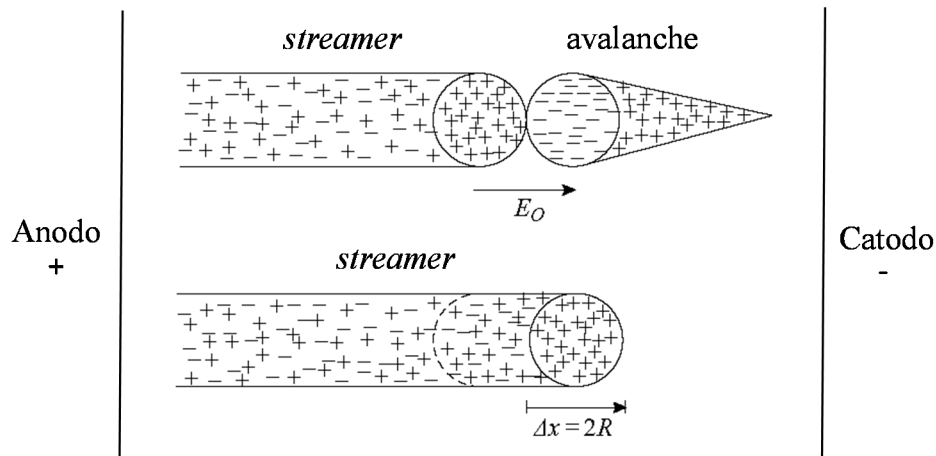


Figura 8 – Propagação do *streamer* positivo. Fonte: Adaptado de [25].

O campo elétrico local é intenso, resultante da concentração de cargas positivas na ponta do *streamer*, atraindo as avalanches secundárias para o canal [25]. Como resultado, as cargas positivas da ponta do *streamer* são neutralizadas e a nova ponta será formada pelas cargas positivas da segunda avalanche de elétrons. A repetição desse processo permite o canal *streamer* atingir o catodo, conectando os eletrodos.

De maneira oposta, a propagação do *streamer* negativo ocorre em direção ao anodo. Porém, parte do processo de formação do canal se assemelha à formação do *streamer* positivo, com cargas positivas movendo em direção ao catodo. A Figura 9 apresenta a formação do *streamer* negativo [25].

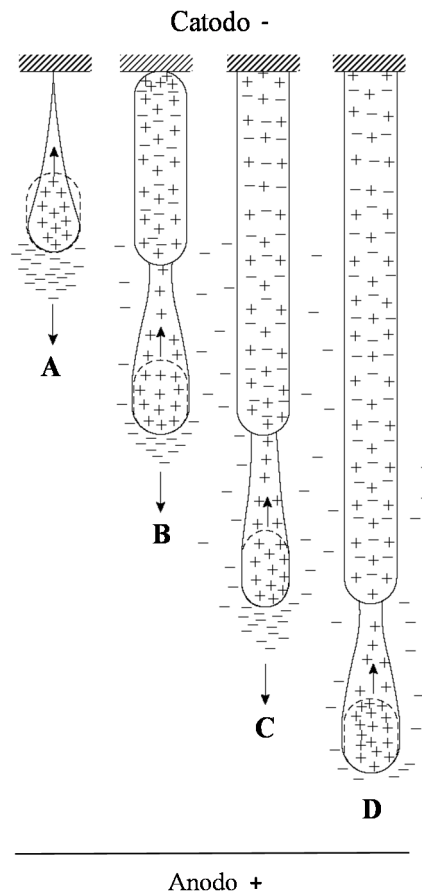


Figura 9 – Formação do *streamer* negativo. Fonte: Adaptado de [25].

De acordo com a representação da Figura 9, tem-se os seguintes processos na formação do *streamer* negativo:

- Em **A**, a avalanche se move em direção ao anodo, deixando para trás cargas positivas próximas ao catodo. Assim que a avalanche atinge um comprimento crítico, a avalanche secundária faz com que as cargas positivas próximas ao catodo, caminhem na sua direção;
- Em **B**, as colisões das cargas positivas com o catodo, provocam a emissão de elétrons, neutralizando as cargas positivas, formando o início do canal de baixa condutividade e conectando a ponta negativa da avalanche com o catodo. O intenso campo elétrico na ponta da avalanche repele as cargas negativas, formando uma nova avalanche a frente do canal de baixa condutividade. As cargas positivas da nova avalanche ficam próximas à ponta negativa do *streamer*, sustentada pelo catodo;
- Assim que essa nova avalanche apresentar um comprimento crítico, as cargas positivas irão neutralizar os elétrons da ponta do canal de baixa condutividade, aumentando o

comprimento do *streamer*, conforme **C** e **D**. O processo se repete até o *streamer* atingir o anodo, conectando os eletrodos

A Figura 10 ilustra de forma mais detalhada a propagação do *streamer* negativo, de acordo com o exposto anteriormente.

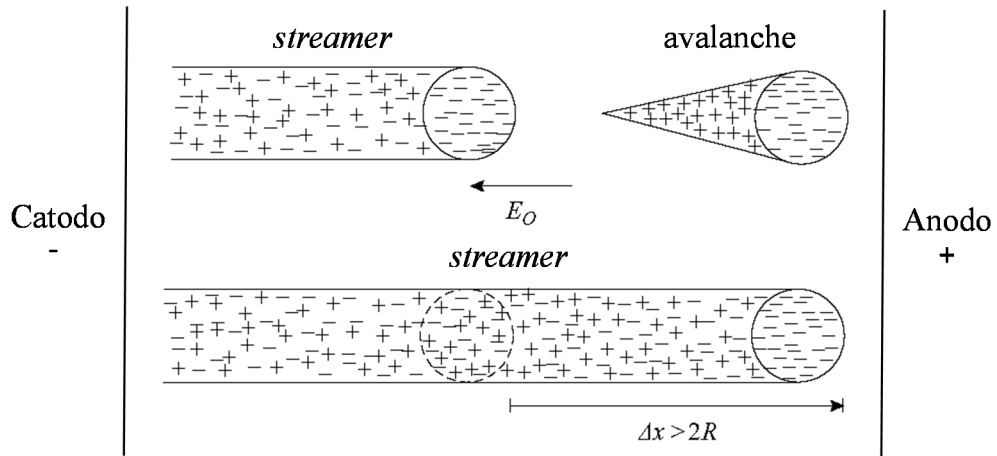


Figura 10 – Propagação do *streamer* negativo. Fonte: Adaptado de [25].

De maneira geral, esse processo é mais complicado de ocorrer se comparado à propagação do *streamer* positivo [25, 31]. No caso do *streamer* negativo, o eletrodo (catodo) deve suprir os elétrons necessários para neutralização das cargas positivas, Figura 10. Por outro lado, no caso do *streamer* positivo, o eletrodo (anodo) apenas absorve os elétrons gerados pelas avalanches secundárias, Figura 8, sendo mais fácil de ocorrer.

Outro fato que evidencia a ocorrência mais fácil do canal de baixa condutividade positivo é que os elétrons se movem em direção à ponta positiva do *streamer*, região onde há maior intensidade de campo elétrico. No caso do *streamer* negativo, os elétrons da avalanche secundária se propagam em uma região de baixa intensidade de campo, pois encontram-se mais distantes da ponta do canal de baixa condutividade, podendo até cessar a propagação do *streamer* [25].

Porém, para arranjos onde o campo elétrico é uniforme, a propagação e posterior disrupção do meio dielétrico ocorre para valores próximos de tensão. Por outro lado, para campos não uniformes, as evidentes diferenças entre a propagação do *streamer* positivo e negativo, tornam a ocorrência da descarga disruptiva em valores diferentes de tensão.

As variações das condições em que o meio está inserido podem alterar os valores de campo elétrico necessários para propagação do *streamer*. Por exemplo, com o aumento da

pressão, o campo elétrico necessário para a propagação do canal também aumenta [34]. No entanto, o foco desse trabalho é a avaliação em condições atmosféricas padronizadas.

A atração das avalanches secundárias em direção ao *streamer* ocorre dentro de uma região, chamada de região de ativação [25], que pode ser representada por uma distância radial onde o campo elétrico devido as cargas da ponta do *streamer* excede o valor de 26 kV/cm. Este é o mínimo campo elétrico necessário para provocar ionizações cumulativas em ar, conforme foi abordado no item 2.2.1.

Todo o processo descrito anteriormente considera que o canal se propaga apenas em um filamento, para simplificar as explicações a respeito dos fenômenos envolvidos. Porém, sabe-se que os *streamers* se propagam em várias ramificações, principalmente em meios onde o campo elétrico é considerado não uniforme, conforme ilustrado na Figura 11.

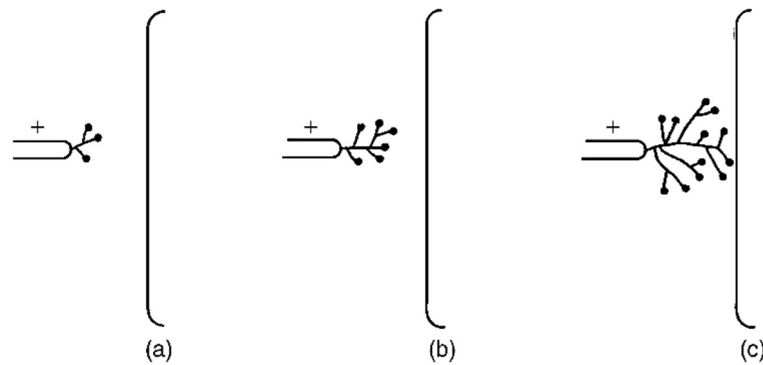


Figura 11 – Propagação do *streamer* em ramificações para arranjo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].

Geralmente, apenas um dos filamentos atinge o eletrodo oposto, sendo que os demais se espalham pelo meio dielétrico, conforme pode ser visualizado na Figura 11. No caso de arranjos que apresentam campos uniformes ou para espaçamentos muito pequenos, as ramificações são poucas ou quase insignificantes. Os efeitos das ramificações serão abordados no subitem 2.2.3.

2.2.3 Transição do Canal Streamer para a Descarga Disruptiva

A ocorrência do *streamer* não necessariamente representará a ocorrência da descarga disruptiva devido à baixa condutividade do canal, que também é chamado de descarga fria, com temperatura próxima à ambiente [25]. Em arranjos uniformes e em pequenos espaçamentos, para que ocorra a descarga disruptiva, o canal deve apresentar alta condutividade. Isso ocorre através da elevação de temperatura do *streamer*, processo chamado de termolização. Neste caso não há a presença de descargas iniciais (coronas), conforme será explicado posteriormente.

De acordo com o exposto no subitem 2.2.2, a ponta do *streamer* apresenta um campo elétrico intenso, seguido por um filamento positivo, que apresenta baixo campo elétrico. Neste filamento, a ocorrência de atrações é maior do que a ocorrência de ionização, reduzindo a propagação de corrente pelo canal com o decorrer do tempo [25].

No entanto, o canal pode aquecer devido a diminuição de pressão causada pela transferência de energia dos íons positivos para os nêutrons [25]. Por sua vez, ocorrerá o incremento do campo elétrico, sendo que, ao chegar em um valor crítico, o processo de ionização superará o processo de atração, aumentando a condutividade e temperatura do canal. Esse processo resultará no colapso de tensão e no aumento brusco da corrente, conforme pode ser visualizado na Figura 12. Para esse caso, a influência da polaridade da tensão é menor, tornando a suportabilidade do meio dielétrico próxima para ambas as polaridades.

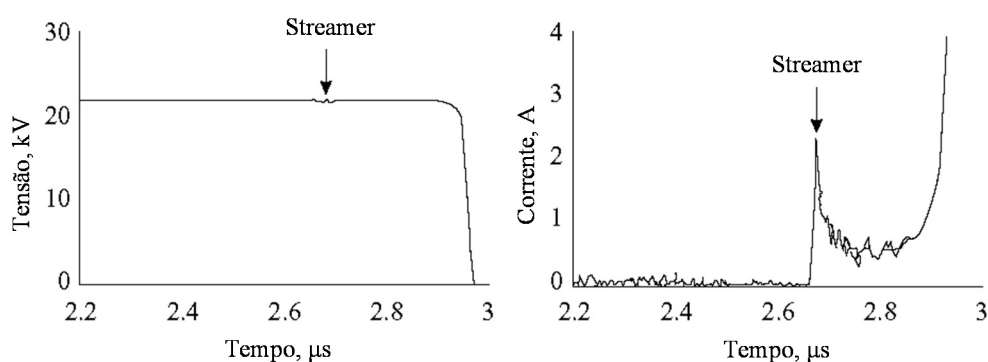


Figura 12 – Comportamento da tensão e corrente com a ocorrência do *streamer* e posterior disrupção da isolamento – Campo uniforme e espaçamento de 10 mm entre eletrodos. Fonte: Adaptado de [25].

A transição do *streamer* para a descarga disruptiva ocorre de forma mais complexa em espaçamentos maiores, que apresentam campos não uniformes. Neste caso, antes do colapso da tensão, ocorre o aparecimento de diferentes descargas em forma de corona, que influenciam na suportabilidade do meio e ocorrem de forma transiente ou estável [31]. Essas descargas se diferem para ambas as polaridades, influenciando na ruptura do dielétrico e apresentando divergências na suportabilidade.

Na Figura 13 é apresentada a variação da tensão por espaçamento entre os eletrodos, considerando a polaridade positiva e o arranjo não uniforme, constituído de ponta arredondada ou esférica de raio igual a 1 cm e o plano [31].

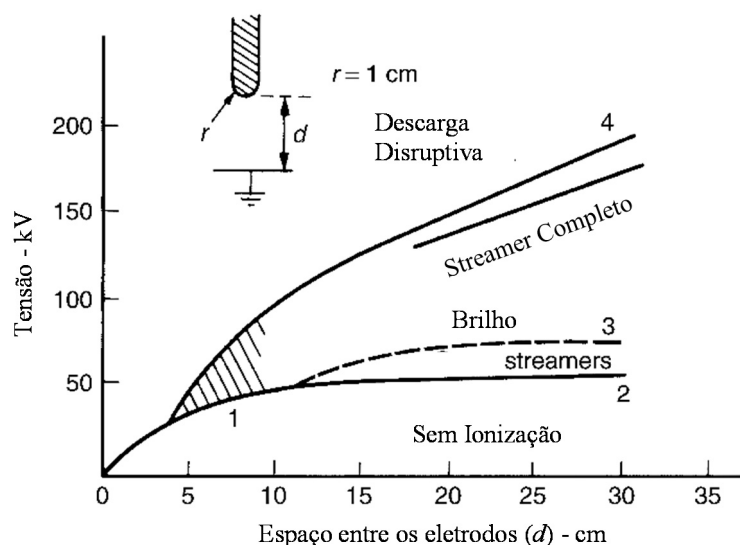


Figura 13 – Variação da tensão de polaridade positiva por espaçamento entre eletrodos em uma configuração de campo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].

Observa-se na Figura 13 que a completa ruptura da isolação acontece na região denominada “Descarga Disruptiva”. Para espaçamentos pequenos não há o surgimento de outras descargas antes da completa ruptura do ar, condição apresentada na curva 1 até o ponto de interseção com a curva 4. A região hachurada entre esse ponto e o espaçamento de 10 cm, representa uma incerteza transitória, na qual podem ocorrer outras descargas. Para espaçamentos acima de 10 cm, na curva 2, iniciam-se os *streamers* ramificados que não atravessam o espaço. Na curva 3 é apresentado o limite para início do corona “brilho” positivo, região onde o campo do anodo torna-se forte suficiente para proporcionar o surgimento de um canal condutor luminoso, estabelecendo um fluxo de corrente [32]. Neste caso, surge o canal com alta condutividade, chamado *leader*, e os *streamers* se propagam a partir desse canal. Com a elevação da tensão o *leader* poderá atingir o terminal aterrado e provocar a descarga disruptiva (a partir da curva 4).

Na Figura 14 é mostrada a variação da tensão por espaçamento entre os eletrodos considerando a polaridade negativa e o arranjo não uniforme, constituído de uma ponta arredondada ou esférica de raio igual a 0,75 mm e o plano, semelhante ao da Figura 13 [31].

De acordo com a Figura 14, as primeiras descargas que ocorrem são os pulsos de *Trichel* (pulsos de corrente), devido ao fato da avalanche de elétrons penetrar uma região de baixa intensidade de campo, cessando sua propagação [32]. Com a elevação da tensão ocorre a diminuição dos pulsos de *Trichel* e, posteriormente, as descargas de corrente passam a apresentar um aspecto contínuo, chamadas de “brilho” negativo, contendo *streamers* ramificados. Nesse momento, surge o canal *leader* com alta condutividade. Os *streamers* se

propagam a partir desse canal. Com a elevação da tensão o *leader* poderá atingir o terminal aterrado e provocar a descarga disruptiva.

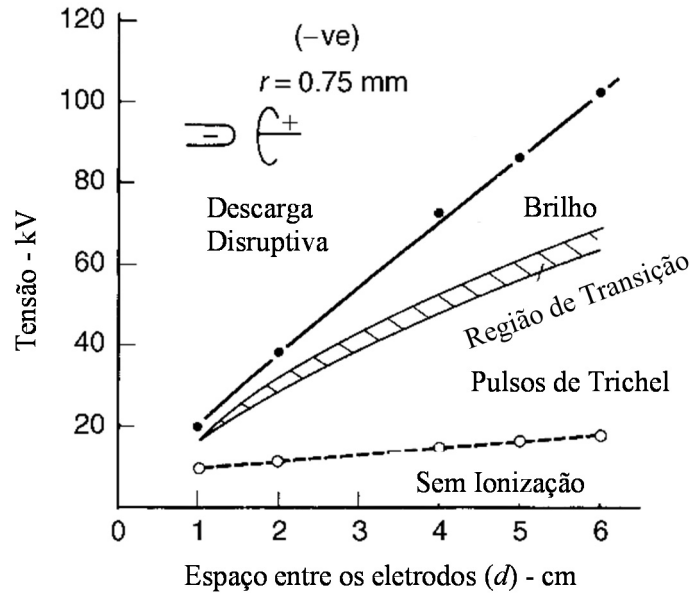


Figura 14 – Variação da tensão de polaridade negativa por espaçamento entre eletrodos em uma configuração de campo não uniforme. Fonte: Adaptado de [31].

Repara-se, comparando a Figura 13 e a Figura 14 para espaçamentos de 1 cm a 6 cm, que a tensão necessária para causar ruptura no arranjo ponta esférica-plano, resultando em campos não uniformes, é maior para a polaridade negativa. Dessa maneira, a fim de estudar a suportabilidade dielétrica, a avaliação da uniformidade do campo elétrico de eletrodos e equipamentos é extremamente importante.

Embora a Figura 13 e a Figura 14 analisadas refiram-se a aplicação de tensão contínua, pode-se afirmar que os processos envolvidos se assemelham ao da aplicação de tensões de impulso.

Um parâmetro importante na avaliação da uniformidade do campo elétrico é o fator de utilização de campo, conforme apresentado em [31, 32, 34, 35]. Esse parâmetro é representado pela equação (14).

$$N = \frac{E_{\text{médio}}}{E_{\text{max}}} \quad (14)$$

Neste caso, $E_{\text{médio}}$ representa o campo médio ao longo do espaçamento entre os eletrodos e E_{max} representa o campo máximo observado. O fator de utilização de campo varia de 0 a 1,

sendo que quanto mais próximo de 0, menos uniforme é a distribuição do campo elétrico. Por outro lado, quanto mais próximo de 1, a distribuição de campo é considerada mais uniforme.

Em uma distribuição uniforme de campo elétrico, a intensidade do campo varia muito pouco ao longo do espaçamento. Dessa maneira, seu valor máximo e médio são próximos e, consequentemente, o resultante de N é próximo de 1. Como exemplo, pode-se citar os arranjos plano-plano e esfera-esfera para certas distâncias de separação, visto que com o aumento da distância o campo torna-se menos homogêneo. O fato da intensidade de campo quase não variar ao longo do espaçamento para arranjos uniformes faz com que a propagação da descarga ocorra sob a mesma influência de campo para ambas as polaridades, resultando em suportabilidade dielétrica semelhante.

Por outro lado, em distribuição de campo não uniforme, a intensidade máxima de campo elétrico está contida próxima a algum ponto do eletrodo onde é aplicada a tensão [31]. Por exemplo, no arranjo ponta-plano com a tensão aplicada na ponta, a intensidade máxima de campo encontra-se neste eletrodo. Sendo assim, há uma discrepância entre o valor máximo de campo elétrico em relação ao valor médio, resultando em N próximo de zero.

É importante ressaltar que a mudança do eletrodo onde é aplicada a tensão poderá influenciar na suportabilidade do meio, devido a mudança nas linhas de campo elétrico. No caso do arranjo ponta-plano, por exemplo, se a tensão for aplicada no eletrodo plano, com a ponta aterrada, a distribuição de campo elétrico será diferente do apresentado quando a tensão é aplicada sobre a ponta, influenciando no fator de utilização de campo elétrico.

De forma aproximada, o campo elétrico médio pode ser calculado com base na distância de separação dos eletrodos (d) e tensão de ruptura (V_r), de acordo com o apresentado na equação (15):

$$E_{\text{médio}} = \frac{V_r}{d} \quad (15)$$

Substituindo a equação (15) na (14), obtém-se a equação (16).

$$N = \frac{V_r}{dE_{\text{max}}} \quad (16)$$

Isolando V_r tem-se a equação (17).

$$V_r = NdE_{\text{max}} \quad (17)$$

Considerando que o processo de formação da descarga disruptiva se inicia no ar com a intensidade de campo elétrico de 26 kV/cm para as condições atmosféricas padronizadas, observa-se na equação (17) que a tensão para ocorrência da disrupção diminui com a redução do fator de utilização de campo.

No subitem 2.2.5 serão apresentados resultados experimentais de ensaios em diversos arranjos de eletrodos, fundamentando as teorias abordadas e exemplificando o parâmetro fator de utilização do campo elétrico.

2.2.4 Descarga Disruptiva Causada por Tensão de Impulso

Conforme apresentado no item 2.1, o surto de tensão provocado por uma descarga atmosférica caracteriza-se por um impulso com tempo de frente variando tipicamente entre 0,1 μ s e 20 μ s [12]. Por outro lado, o valor do tempo de cauda normalizado é de 50 μ s, no entanto, para surtos induzidos é comum o valor ser inferior ao padronizado [7].

De fato, a formação da descarga disruptiva provocada por tensão de impulso é mais complexa do que as provocadas por solicitações de tensão contínua e alternada. Suponha um determinado arranjo no qual a ionização cumulativa é possível para um valor V_s de tensão (valor crítico), neste caso, para que ocorra a ruptura completa da isolação, o valor da tensão deve permanecer um tempo suficiente acima do valor crítico para que todo o processo físico seja completado. Portanto, pode-se concluir que a ocorrência da descarga disruptiva devido a solicitação de tensão de impulso é dependente da tensão de pico e dos tempos de frente e cauda da forma de impulso.

Na Figura 15 é apresentado um oscilograma de tensão com a ocorrência de uma descarga disruptiva devido a aplicação de um impulso de tensão, onde V_p representa o valor de pico da tensão, V_s é o valor crítico de tensão para iniciar a ionização cumulativa e t_d é o tempo entre o instante no qual a tensão atinge V_s e o instante em que ocorre o colapso de tensão [25].

Na Figura 15 observa-se que o valor da tensão apresentou tempo suficiente acima do valor crítico para que a ruptura completa da isolação ocorresse. Se o valor de pico da tensão de impulso fosse menor, o evento poderia não ocorrer. Por outro lado, se o valor fosse maior, o instante da ruptura poderia ser observado com tempo mais curto do que o apresentado. Vale ressaltar que a ocorrência da descarga disruptiva é um fenômeno aleatório e deve ser estudada estatisticamente.

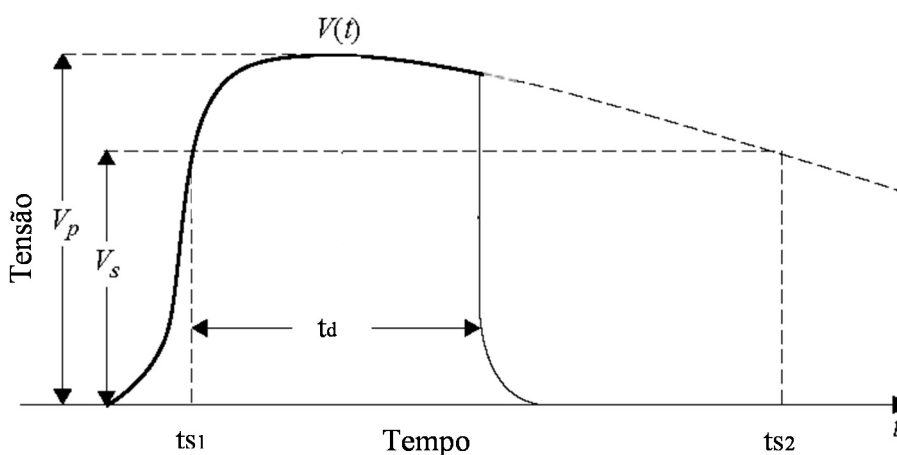


Figura 15 – Forma de impulso de tensão com a ocorrência de uma descarga disruptiva. Fonte: Adaptado de [25].

De acordo com o exposto, se a forma de impulso apresentar tempo de frente rápido e cauda curta, a ocorrência da descarga disruptiva será observada para valores maiores de tensão se comparada com formas de impulso com tempo de frente lento e cauda longa.

Um parâmetro importante na avaliação da descarga disruptiva mediante impulsos de tensão é a análise da área formada acima da tensão crítica (V_s) e abaixo da forma de impulso. Por exemplo, tomando como base a forma de impulso da Figura 15, repara-se que conhecendo a área acima da tensão V_s considerando o tempo t_d , através do método comparativo, ou seja, igualando as áreas formadas, é possível determinar o instante em que ocorrerá a descarga disruptiva devido a um incremento da tensão de pico da forma de impulso. Esse fenômeno é explicado pela teoria do efeito disruptivo [8, 36, 37, 38].

2.2.5 Avaliação da Descarga em Diferentes Configurações de Eletrodos

Considerando a Figura 16, que apresenta um arranjo de eletrodos ponta esférica-plano (plano infinito), separados por uma distância d e com diâmetro da ponta variável, sabe-se que a distribuição de campo é dependente do diâmetro da ponta esférica. Para diâmetros pequenos o campo elétrico apresenta-se como não uniforme, porém, para valores elevados o campo elétrico ao longo do espaçamento é considerado uniforme.

Sabendo-se que, em condições atmosféricas padronizadas, o campo elétrico necessário para dar início ao processo da descarga é de 26 kV/cm e considerando a configuração da Figura 16 com d igual a 10 cm, pode-se traçar o gráfico da Figura 17, representando a tensão de ruptura de acordo com o fator de utilização de campo elétrico [31], equação (17). A variação da uniformidade do campo é obtida com a variação do diâmetro da ponta esférica onde é aplicada a tensão. Na condição de maior uniformidade ($N = 1$ ou 100%) o diâmetro é indicado como

sendo infinito. Sendo assim, tem-se que a disrupção ocorre para a tensão de 260 kV, conforme equação (18):

$$V_r = NdE_{max} = 1 \cdot 10 \cdot 26 = 260 \text{ kV} \quad (18)$$

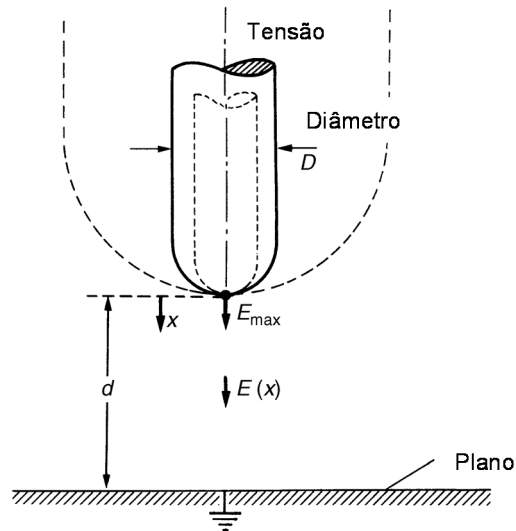


Figura 16 – Configuração ponta esférica-plano. Fonte: Adaptado de [31].

Na Figura 17, a reta tracejada representa a equação (17), as demais curvas são resultados experimentais, ambas relacionadas à aplicação de tensão contínua. Portanto, conclui-se que o comportamento linear da equação é apenas uma aproximação do fenômeno.

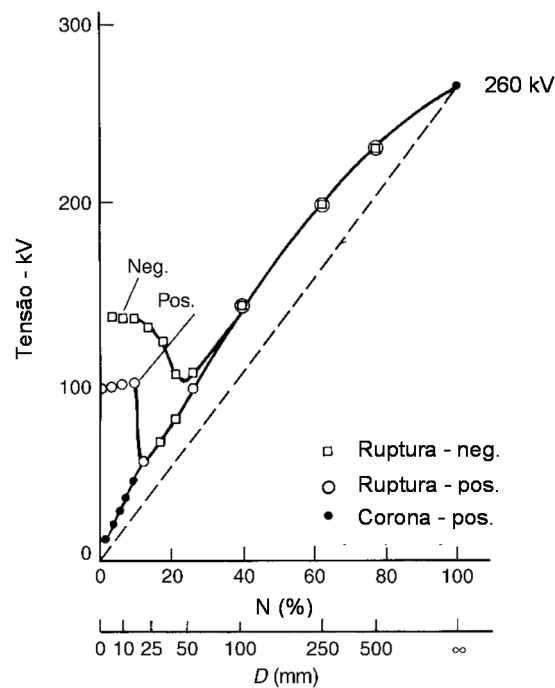


Figura 17 – Tensão de disrupção por fator de utilização de campo. Fonte: Adaptado de [31].

Nota-se na Figura 17, que a tensão de disrupção é influenciada pela uniformidade do campo elétrico. Para maiores valores do fator de utilização de campo, causados pelo aumento do diâmetro do eletrodo ponta esférica, a suportabilidade do arranjo é maior. Repara-se também que para fatores de utilização de campo menores que 30%, a polaridade positiva é mais crítica em relação à negativa. Embora os resultados tomem como base a aplicação de tensão contínua sobre o arranjo, os fenômenos físicos envolvidos na formação da descarga são muito semelhantes ao da solicitação causada por tensão de impulso.

Em relação a impulsos de tensão, causados por descargas atmosféricas, a avaliação da suportabilidade dielétrica é feita estatisticamente, geralmente utilizando a tensão disruptiva crítica (tensão $U_{50\%}$), que refere-se ao pico da tensão de impulso e representa 50% de probabilidade de ocorrência da descarga disruptiva. No *Capítulo 3* é apresentado o procedimento para obtenção da $U_{50\%}$ e aborda mais detalhes sobre o parâmetro.

O arranjo esfera-esfera é muito utilizado em equipamentos para ensaios em alta tensão e para medição da tensão de disrupção, pois em certos espaçamentos esse arranjo apresenta campo elétrico uniforme, sendo neste caso a tensão de disrupção aproximadamente igual para ambas as polaridades.

No entanto, o arranjo passa a apresentar campo não uniforme à medida que se aumenta o espaçamento entre as esferas. Dessa maneira, para determinado diâmetro há um valor máximo de espaçamento a ser utilizado. As dimensões construtivas da configuração esfera-esfera a ser utilizada em equipamentos de ensaios e medições em alta tensão podem ser encontradas na norma IEEE 4TM - 2013 [19]. Essa norma considera aceitável um espaçamento correspondente ao raio das esferas. Acima disso as tensões $U_{50\%}$ das polaridades positiva e negativa se diferem consideravelmente. Na Tabela 1 são apresentados alguns valores da tensão $U_{50\%}$ para ambas as polaridades, variando o espaçamento e considerando dois arranjos de esfera-esfera, um com diâmetro das esferas de 10 cm e outro com 15 cm.

Os valores marcados com (*), contidos na Tabela 1, representam as tensões $U_{50\%}$ em que a distância de separação entre as esferas supera o valor correspondente ao seu raio. Neste caso, o campo elétrico não uniforme provoca divergências entre os valores da tensão disruptiva crítica para as polaridades.

Tabela 1 – Tensão $U_{50\%}$ para arranjo esfera-esfera em ambas polaridades, considerando variação do espaçamento. Fonte: Adaptado de [19].

Espaçamento (cm)	Diâmetro - 10 cm			Diâmetro - 15 cm		
	$U_{50\%}$ - neg. (kV)	$U_{50\%}$ - pos. (kV)	Diferença (%)	$U_{50\%}$ - neg. (kV)	$U_{50\%}$ - pos. (kV)	Diferença (%)
0,5	16,8	16,8	0,0	16,8	16,8	0,0
0,8	26	26	0,0	26	26	0,0
1,2	37,4	37,4	0,0	37,4	37,4	0,0
1,6	48,1	48,1	0,0	48,1	48,1	0,0
2,2	64,5	64,5	0,0	64,5	64,5	0,0
2,8	79,5	80,5	1,2	80,5	80,5	0,0
4,0	105	109	3,7	110	111	0,9
5,5	131*	139*	5,8	143	147	2,7
6,5	144*	156*	7,7	161	168	4,2
7,0	150*	163*	8,0	169	178	5,1
7,5	155*	170*	8,8	177	187	5,3
10,0	-	-	-	209*	226*	7,5
11,0	-	-	-	219*	238*	8,0
12,0	-	-	-	229*	249*	8,0
* Tensões $U_{50\%}$ em que a distância de separação das esferas supera o valor correspondente ao seu raio.						

Conforme a Tabela 1, no arranjo em que ambas as esferas apresentam 10 cm de diâmetro, repara-se que para espaçamentos de até 2,2 cm, os resultados da tensão $U_{50\%}$ são iguais em ambas as polaridades, indicando uniformidade do campo elétrico. Acima disso a dispersão do campo elétrico ao longo do espaçamento faz com que a polaridade negativa seja mais crítica do que a polaridade positiva. A partir desse ponto percebe-se também um aumento na dispersão entre as polaridades com o aumento da distância de separação, ou seja, ocorre redução no fator de utilização de campo elétrico.

O mesmo fato ocorre no arranjo com as esferas de 15 cm de diâmetro. Neste caso, espaçamentos de até 2,8 cm resultam em valores iguais de tensão entre as polaridades, porém, para valores maiores a polaridade negativa se torna mais crítica. Em maiores espaçamentos, esse comportamento não uniforme da configuração esfera-esfera se assemelha a configuração ponta-ponta ou haste-haste [19].

São apresentados na Tabela 2 os resultados da tensão $U_{50\%}$ para ensaios envolvendo a configuração haste-haste [32]. Repara-se que a característica não uniforme do arranjo faz com que a polaridade negativa se torne mais crítica. Outro fato observado é que a dispersão entre os resultados para ambas as polaridades aumenta com o aumento do espaçamento, comportamento este, semelhante ao apresentado anteriormente para a configuração esfera-esfera.

Tabela 2 – Tensão $U_{50\%}$ variando o espaçamento entre eletrodos haste-haste. Fonte: Adaptado de [32].

Espaçamento (cm)	$U_{50\%}$ - neg. (kV)	$U_{50\%}$ - pos. (kV)	Diferença (%)
2,5	38,84	41,43	6,67
3,0	44,43	48,28	8,67
3,5	48,67	54,21	11,38
4,0	52,69	59,71	13,32
4,5	56,48	64,01	13,33
5,0	59,11	67,72	14,57
5,5	62,39	71,55	14,68
6,0	65,22	74,87	14,80

A referência [34] apresenta um estudo comparativo da suportabilidade dielétrica, levando em consideração três diferentes arranjos de eletrodos em ar: plano-plano, esfera-plano e ponta-plano, conforme a Figura 18. Os eletrodos planos são em formato de disco e apresentam diâmetro de 9 cm. O diâmetro da esfera é de 2,4 cm.

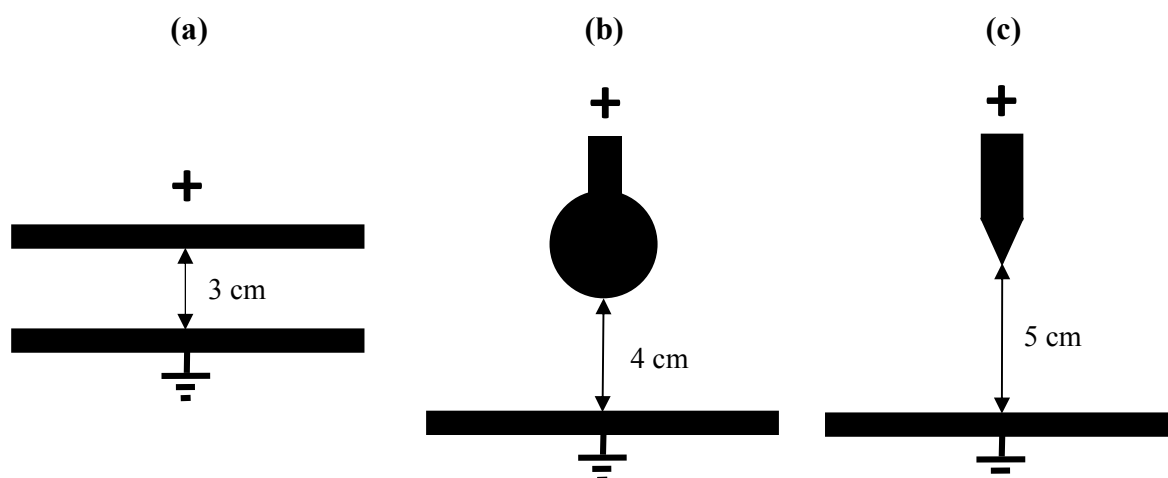


Figura 18 – Arranjos de eletrodos: (a) Plano-plano com espaçamento de 3 cm; (b) Esfera-plano com espaçamento de 4 cm; (c) Ponta-plano com espaçamento de 5 cm. Fonte: Adaptado de [34].

Para determinação do parâmetro tensão $U_{50\%}$, foi utilizada a forma de impulso padronizada, porém, apenas na polaridade positiva, com os impulsos aplicados nos eletrodos plano, esfera e ponta para cada configuração, conforme a sequência apresentada no parágrafo anterior e na Figura 18. Os eletrodos opostos foram aterrados.

A Tabela 3 contém os resultados obtidos, sendo a tensão $U_{50\%}$ em quilovolts, o campo máximo (E_{max}) em quilovolts por centímetro, obtido através de simulações utilizando o programa COMSOL® e o fator de utilização de campo elétrico (N), calculado para os

espaçamentos de 3 cm, 4 cm e 5 cm para as configurações plano-plano, esfera-plano e ponta-plano, respectivamente. Os ensaios levam em consideração também a variação da pressão na qual o arranjo está submetido.

Tabela 3 – Avaliação da suportabilidade dielétrica de três arranjos de eletrodos submetidos a impulsos de tensão.
Fonte: Adaptado de [34].

Pressão (Mpa)	Plano-Plano: 3 cm			Esfera-Plano: 4 cm			Ponta-Plano: 5 cm		
	$U_{50\%}$ (kV)	E_{max} (kV/cm)	N	$U_{50\%}$ (kV)	E_{max} (kV/cm)	N	$U_{50\%}$ (kV)	E_{max} (kV/cm)	N
0,10	81,84	60	0,452	72,8	65	0,281	65,33	376	0,035
0,15	112,62	82		89,57	80		85,13	489	
0,20	139,97	102		111,73	99		105,18	605	
0,25	162,37	118		129,42	115		126,52	727	

Repara-se que o aumento da pressão causa aumento na suportabilidade dielétrica dos arranjos avaliados. Para a pressão de 0,10 Mpa, aproximadamente a pressão padronizada pela norma IEC 60060-1 [20] (760 mmHg), embora o espaçamento da configuração plano-plano apresente-se como o menor, sua suportabilidade é maior se comparada aos demais. Por outro lado, o arranjo ponta-plano com maior espaçamento entre as configurações, apresenta-se como o mais crítico, ou seja, suportabilidade dielétrica menor que as demais. Esse fato pode ser explicado através do fator de utilização de campo elétrico. No caso da configuração ponta-plano, o campo elétrico é menos uniforme (menor N), resultando em menor suportabilidade dielétrica.

Em outro estudo, apresentado na referência [35], foi avaliada a suportabilidade dielétrica de um arranjo ponta esférica-plano, submetidos à forma de impulso de tensão padronizada para ambas polaridades. O arranjo foi inserido em um compartimento fechado, onde o meio isolante inicialmente foi ar ambiente e depois ar seco, ou seja, sem influência de umidade. A análise também levou em consideração a variação da pressão dentro do recipiente. O eletrodo ponta esférica apresenta 4,5 mm de diâmetro, enquanto que, o eletrodo plano foi confeccionado em forma de disco com 50 mm de diâmetro. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 19.

Os espaçamentos utilizados na avaliação são considerados pequenos, porém, a não uniformidade do campo continua evidente devido ao arranjo utilizado, com a polaridade positiva mais crítica. Os valores do fator de utilização de campo para cada espaçamento e na condição ar ambiente são apresentados na Tabela 4.

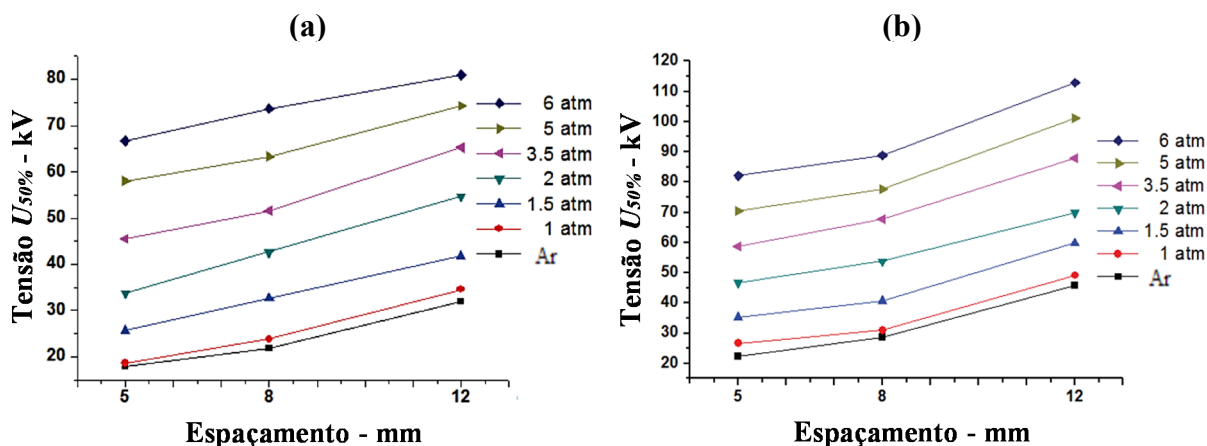


Figura 19 – Tensão crítica de ruptura por variação do espaçamento e pressão: (a) Polaridade positiva e (b) Polaridade negativa. Fonte: Adaptado de [35].

Tabela 4 – Fator de utilização de campo para o arranjo analisado considerando variação do espaçamento. Fonte: Adaptado de [35].

Espaçamento (mm)	Fator de utilização de campo - N
5	0,34
8	0,25
12	0,17

Nota-se que o fator de utilização de campo diminui com o aumento do espaçamento entre os eletrodos, pois o campo torna-se menos uniforme, confirmando a teoria abordada anteriormente.

Outro fato observado é que o aumento da não uniformidade do campo elétrico no arranjo apresentado, que se assemelha à configuração ponta-plano, faz com que ocorra maior dispersão entre os valores da tensão $U_{50\%}$ entre as polaridades. Por exemplo, para a curva inferior, em preto na Figura 19, representativa dos ensaios com ar ambiente, o resultado da tensão $U_{50\%}$ para o espaçamento de 5 mm é de aproximadamente 18 kV e 23 kV nas polaridades positiva e negativa, respectivamente, resultando em uma discrepância de 27,7%. Por outro lado, para o espaçamento de 12 mm, o $U_{50\%}$ é aproximadamente 32 kV para polaridade positiva e 45 kV para negativa, resultando em uma discrepância de 40,6%.

Conclusões semelhantes às apresentadas nesse subitem podem ser encontradas no trabalho [30], no qual foram ensaiados diversos arranjos de eletrodos ponta-plano. Nesses resultados também é possível verificar que, para espaçamentos pequenos, a tensão disruptiva crítica se assemelha em ambas as polaridades. Com o aumento do espaçamento, a polaridade positiva torna-se mais crítica.

Outros resultados avaliando a influência da polaridade, do arranjo dos eletrodos, da uniformidade do campo, do tipo de dielétrico, do tipo de solicitação (tensão contínua ou de impulso) e das condições que o arranjo é submetido podem ser verificados nas referências [39, 40, 41, 42].

3 Procedimentos para Avaliação da Suportabilidade Dielétrica das Amostras

A avaliação da suportabilidade dielétrica de equipamentos que apresentam isolamento auto-recuperante frente a surtos causados por descargas atmosféricas pode ser feita estatisticamente. Um dos parâmetros utilizados consiste na tensão disruptiva crítica (tensão $U_{50\%}$). No caso de equipamentos com isolamento não auto-recuperante, no qual o dielétrico pode ser afetado após a extinção do arco elétrico, a aferição da suportabilidade dielétrica é realizada através da aplicação de uma sequência específica de impulsos, tomando como referência o Nível Básico de Isolamento (NBI) e a norma de ensaio do equipamento em questão.

Em relação às amostras analisadas nesse trabalho, descritas no item seguinte, a norma IEC 60060-1 as classifica como isolamento externa e auto-recuperante, por operarem em rede de distribuição e apresentarem o ar ambiente como meio dielétrico [20]. Neste trabalho, a avaliação da suportabilidade toma como base a tensão $U_{50\%}$ obtida mediante análise estatística de resultados experimentais, adotando o método dos acréscimos e decréscimos (*Up and Down*), descrito no item 3.3.

Outro importante parâmetro utilizado na avaliação da suportabilidade de equipamentos com isolamento auto-recuperante é a característica tensão de pico (ou de disrupção) por tempo até a ocorrência do colapso de tensão, chamada de *Curva $V \times t$* ⁽¹⁾. Para esse caso, embora algumas normas mencionem a realização do ensaio [19, 20], não há procedimentos definidos que determinem a obtenção da curva, principalmente referente ao número de níveis de tensão e o número de pontos [16]. Dessa maneira, este trabalho definiu um procedimento próprio de ensaio para obtenção das *Curvas $V \times t$* para cada forma de impulso, polaridade e equipamento ensaiado, conforme é apresentado no item 3.4.

Neste capítulo são apresentados também as formas de impulso utilizadas na avaliação da suportabilidade dielétrica das amostras, item 3.2, bem como os procedimentos de correção da tensão disruptiva para as condições ambientais padronizadas, a fim de comparar resultados de ensaios realizados em ambientes distintos.

3.1 Amostras Ensaeadas

As amostras ensaiadas são chaves seccionadoras e chaves fusíveis de média tensão, nas classes 15,0 kV e 24,2 kV. Esses equipamentos são amplamente utilizados em redes aéreas de

(1) Mais detalhes sobre a definição e obtenção da Curva $V \times t$ são abordados no item 3.4.

distribuição de energia elétrica, com a finalidade de execução de manobras na linha e proteção, respectivamente.

As chaves seccionadoras avaliadas são do tipo “faca”, instaladas em pontos estratégicos, objetivando a abertura da linha, dada a necessidade de manutenção ou devido a ocorrência de algum tipo de falha. Na Figura 20 é apresentado o desenho do equipamento ensaiado e as marcações indicadas detalham os seus principais componentes.

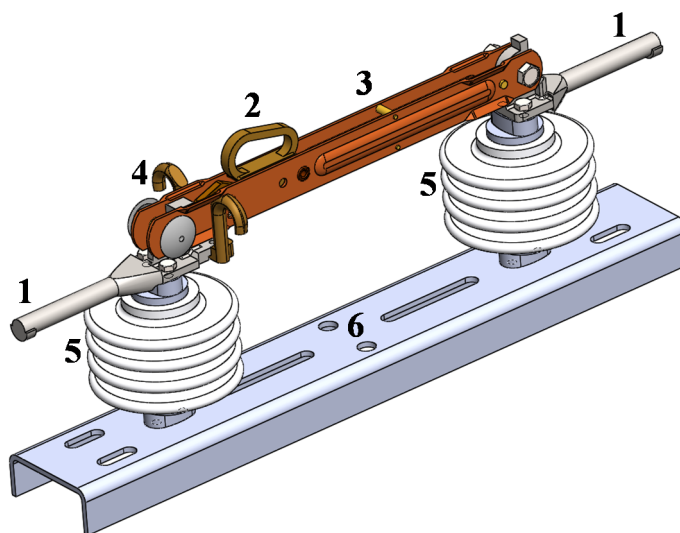


Figura 20 – Chave seccionadora de média tensão na classe 15,0 kV: 1 - Terminais; 2 - Olhal para manobra manual (abertura e fechamento); 3 - Haste de abertura e fechamento; 4 - Gancho de fixação da haste; 5 - Isoladores de porcelana; 6 - Base do equipamento, fixada na estrutura da rede.

São apresentadas na Figura 21 as chaves seccionadoras na posição e em que foram ensaiadas, com a haste de abertura na condição fechada, portanto, ambos os isoladores são solicitados pelos impulsos de tensão. A seta ilustrativa vermelha indica o ponto onde os impulsos de tensão foram aplicados (ponto de conexão com a linha) e a seta verde indica o ponto aterrado (base da amostra).

Adicionalmente, é apresentada também na Figura 21 a distância de arco (d_a), constituída na menor distância entre o ponto onde é aplicado o impulso de tensão e o ponto aterrado. Esse parâmetro é utilizado nas formulações relacionadas à correção da tensão disruptiva para os valores normalizados de temperatura, umidade e pressão. No caso das chaves seccionadoras de classes 15,0 kV e 24,2 kV, as distâncias de arco são 0,15 m e 0,20 m, respectivamente.

Do mesmo modo que as chaves seccionadoras, as chaves fusíveis de média tensão são amplamente utilizadas nas redes de distribuição e instaladas em pontos estratégicos. A função principal desse equipamento é proteger os transformadores contra sobrecorrentes originadas por curtos-circuitos.

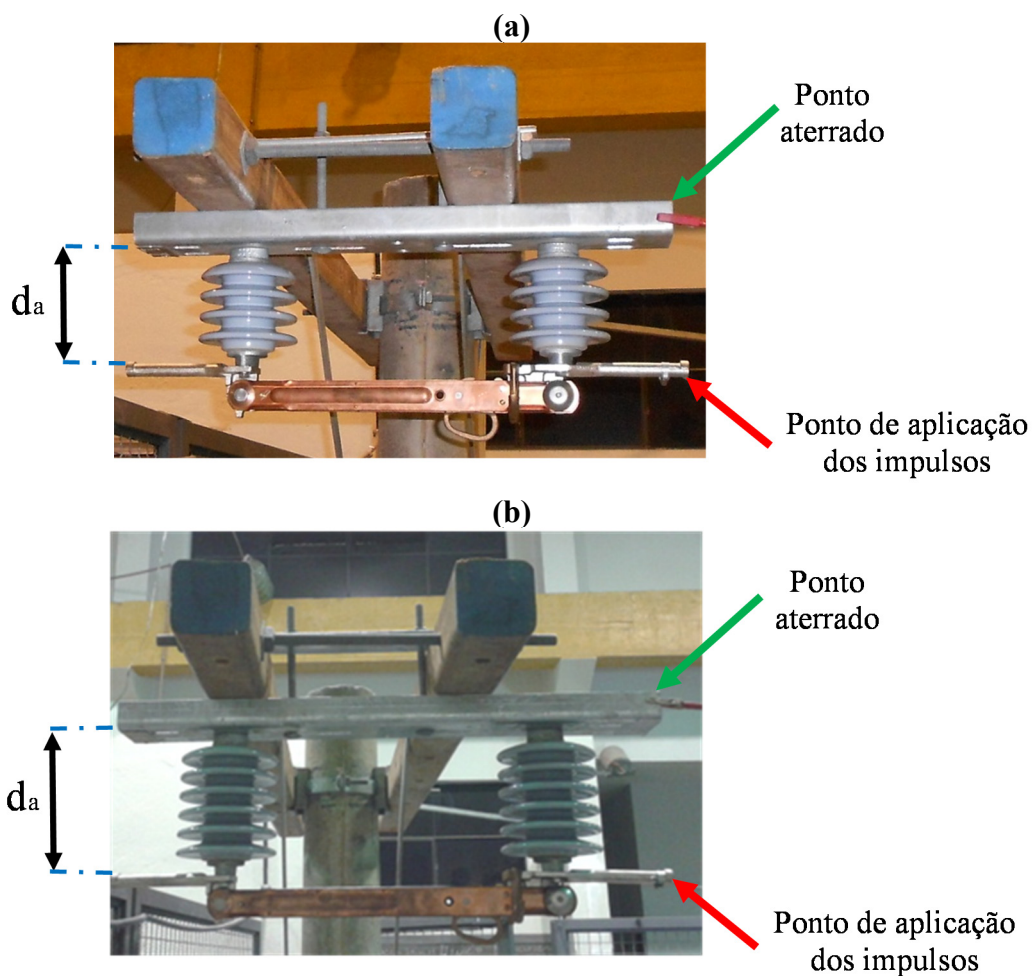


Figura 21 – Chaves seccionadoras: (a) Classe 15,0 kV (b) Classe 24,2 kV.

O elo fusível existente no equipamento se rompe dada a passagem de uma corrente elevada em um determinado intervalo de tempo, assim, a fase em que o equipamento está inserido é aberta, protegendo os dispositivos instalados a jusante. Na Figura 22 é ilustrada a chave fusível, indicando seus principais elementos. Repara-se que o ponto de fixação do equipamento com a estrutura, ponto 9, encontra-se conectado ao cento do isolador. Portanto, para melhor avaliação da isolação, pode-se indicar o isolador como composto de duas partes, superior e inferior.

São apresentadas na Figura 23 as chaves fusíveis de classe 15,0 kV e 24,2 kV analisadas neste trabalho. A seta ilustrativa na cor vermelha representa o terminal superior de entrada onde foram aplicados os impulsos de tensão. A seta verde representa o suporte de fixação do equipamento, sendo este o ponto que permaneceu aterrado durante os ensaios. A indicação (d_a), refere-se a distância de arco que, neste caso, são de 0,160 m e 0,205 m para as chaves de classe 15,0 kV e 24,2 kV, respectivamente.

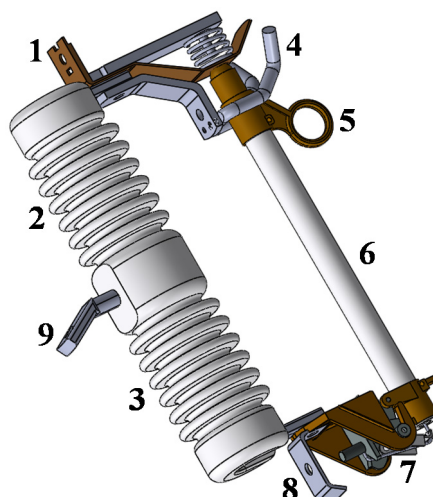


Figura 22 – Chave fusível de média tensão na classe de 15,0 kV: 1 - Terminal superior (entrada); 2 - Isolador de porcelana superior; 3 - Isolador de porcelana inferior; 4 - Gancho de fixação do porta-fusível; 5 - Olhal para manobra manual; 6 - Cartucho ou porta-fusível; 7 - Articulação; 8 - Terminal inferior (saída); 9 - Ponto de fixação do equipamento com a estrutura da rede.

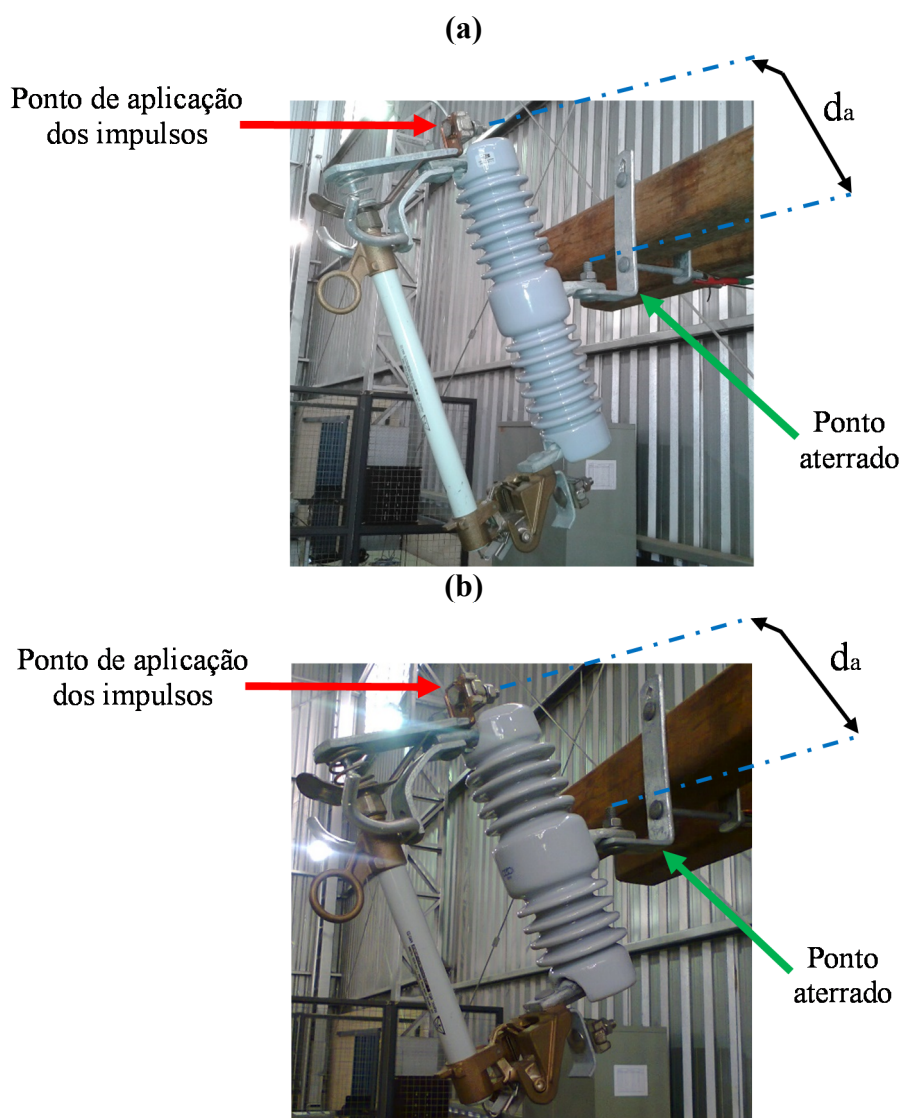


Figura 23 – Chaves fusíveis: (a) Classe 15,0 kV; (b) Classe 24,2 kV.

Os ensaios foram realizados com o elo fusível devidamente instalado, conectando os terminais de entrada e saída. Sendo assim, ambos os isoladores (superior e inferior) foram solicitados pelos impulsos de tensão.

3.2 Formas de Impulso Utilizadas

Conforme exposto no item 2.3, a fim de avaliar a suportabilidade dielétrica das chaves seccionadoras e chaves fusíveis frente a surtos induzidos por descargas atmosféricas indiretas, foram utilizadas neste trabalho cinco formas de impulso não padronizadas, tomando como base a variação do tempo de frente entre rápido, padronizado e lento, bem como tempos de cauda curtos e padronizado.

São apresentadas na Tabela 5 os valores dos tempos de frente e cauda para as formas de impulso utilizadas. A forma de impulso padronizada também foi utilizada com a finalidade de referência para a comparação entre os resultados obtidos.

Tabela 5 – Formas de impulso utilizadas no trabalho.

Formas de Impulso		Descrição
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	
0,5	5	Tempo de frente rápido e cauda curta
0,5	20	Tempo de frente rápido e cauda curta
1,2	10	Tempo de frente padronizado e cauda curta
1,2	50	Padronizada
3,0	16	Tempo de frente lento e cauda curta
5,0	50	Tempo de frente lento e cauda padronizada

Tais formas foram obtidas através do gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI, composto basicamente de um circuito RC (resistivo e capacitivo) e que apresenta seis estágios, com tensão e energia máxima de 450 kV e 1,26 kJ, respectivamente. Os tempos de frente e cauda são obtidos mediante alteração de um conjunto de resistores que compõe o gerador de impulsos.

O *Anexo A* contém o diagrama elétrico do gerador de impulsos com as indicações dos seus componentes. Através da Tabela 20, presente também no *Anexo A*, é possível verificar os valores de resistência utilizados para obtenção das formas. Mais detalhes a respeito da geração de tensões de impulso atmosférico estão presentes na referência [43].

As formas de impulso não padronizadas utilizadas neste trabalho, são representativas de surtos causados por descargas atmosféricas indiretas. Por exemplo, as correntes de retorno secundárias de uma descarga atmosférica negativa, podem gerar surtos na rede elétrica com tempos de frente e cauda rápidos, justificando a escolha das formas $0,5 \times 5 \mu\text{s}$ e $0,5 \times 20 \mu\text{s}$.

Além disso, outras combinações de tempo de frente e cauda não presentes na Tabela 5, resultam em baixa eficiência do gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI, tornando inviável suas utilizações neste trabalho. Mais detalhes a respeito das formas de impulso capazes de serem reproduzidas pelo gerador de impulsos do LAT-EFEI estão presentes em [7].

No caso das duas formas de impulso com tempo de frente rápido ($0,5 \mu\text{s}$), é observado uma sobre-elevação da tensão de pico devido a indutâncias parasitas presentes no circuito [7]. Estas formas de impulso foram processadas e analisadas através de um programa computacional de análise de impulsos atmosféricos, denominado IAP – *Impulse Analyzer Program*. Esse programa está validado segundo a IEC 61083-2, [44], sendo apresentado com mais detalhes em [43]. Portanto, o IAP fornece os parâmetros da forma de impulso aplicada na amostra (tensão de ensaio, tempo de frente e tempo de cauda). Os resultados obtidos e apresentados no *Capítulo 4* e *Anexo B*, consideram a utilização do programa.

3.3 Método dos Acréscimos e Decréscimos para Obtenção da Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$

Existem vários métodos para determinar a tensão disruptiva crítica, como por exemplo, o método dos níveis múltiplos e o método das descargas sucessivas, ambos descritos na norma IEC 60060-1 [20]. Por outro lado, o método mais utilizado e também apresentado na norma indicada anteriormente é o método dos acréscimos e decréscimos. Se comparado aos demais, o método dos acréscimos e decréscimos apresenta ótima exatidão no resultado obtido e é experimentalmente simples de se realizar [7]. Portanto, este trabalho utiliza o método dos acréscimos e decréscimos normalizado para obtenção da tensão $U_{50\%}$.

A fim de apresentar o método, faz-se uso da Tabela 6. No procedimento padronizado por norma, o primeiro nível de tensão u_0 , conforme Tabela 6, não deve apresentar descarga disruptiva na isolação do equipamento ensaiado. Nesse nível é necessário pelo menos duas aplicações de tensão ao longo de todo o ensaio. O valor de pico da tensão deve ser elevado em um passo Δu fixo, passando para o nível u_1 . Caso não ocorra descarga disruptiva, a tensão é novamente acrescida em Δu passando para o nível u_2 , do contrário, a tensão é decrescida em

Δu , retornando ao nível u_0 . O procedimento se repete até completar 35 aplicações, número superior ao mínimo recomendado por norma, que é de 15 aplicações [7, 20].

Neste trabalho, as formas de impulso são registradas por meio de um osciloscópio digital e o valor da tensão de pico é obtido por meio do programa de análise IAP.

A correção da tensão de pico para as condições atmosféricas padronizadas é realizada, conforme apresentado com mais detalhes no item 3.4. Dessa maneira, os valores de temperatura, umidade e pressão são anotados durante a realização do ensaio.

Tabela 6 – Método dos acréscimos e decréscimos padronizado, sendo: X - ocorrência da descarga disruptiva; 0 - não ocorrência da descarga disruptiva. Fonte: [7].

	<i>Aplicações</i>												
<i>Tensão Aplicada</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				
$\vdots$													

A partir do ensaio realizado, de acordo com o método normalizado, a estimativa da tensão $U_{50\%}$ é dada pela equação (19), considerando que a probabilidade de ocorrência do evento (descarga disruptiva) é representada por uma distribuição normal.

$$U_{50\%} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{N_t} u_i k_{ui} \quad (19)$$

Na equação (19), n_t representa o número total de aplicações, fixada em 35. N_t é o número de níveis de tensão aplicados, que neste caso, variou entre 4 e 7. A nomenclatura u_i corresponde ao valor de pico da tensão de impulso para o nível i e k_{ui} é o número de aplicações em cada nível sem levar em consideração o tipo de ocorrência (descarga disruptiva ou não).

Através da equação (19), pode-se determinar o desvio padrão (σ), conforme equação (20).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_t - 1} \sum_{i=1}^{N_t} (u_i - U_{50\%})^2} \quad (20)$$

O procedimento adotado para determinar o intervalo de confiança com base nos dados obtidos nos ensaios é a resolução do método de distribuição de *Weibull* utilizando as técnicas iterativas de verossimilhança, apresentadas com mais detalhes nas referências [7, 32]. Os resultados contidos no *Capítulo 4* foram obtidos mediante as equações (19) e (20) descritas anteriormente e uso de um programa computacional desenvolvido em Matlab[®] pelo LAT-EFEI, denominado “*Método de Ensaio e Análise Estatística – MEAE*” [45].

3.4 Curva Característica Tensão de Pico por Tempo de Disrupção – Curva V_{xt}

A característica tensão de pico por tempo até a ocorrência da disrupção (*Curva V_{xt}*) é um parâmetro importante na avaliação da suportabilidade dielétrica de isolações auto-recuperantes. Entretanto, não há um procedimento padronizado indicando o número de aplicações de impulso e níveis de tensão que a curva deve apresentar.

Basicamente, o procedimento experimental para obtenção da *Curva V_{xt}* ocorre através da aplicação de impulsos de tensão variando e registrando o valor de pico da tensão de impulso ou tensão de disrupção, se a ruptura da isolação ocorrer na região de frente da forma de impulso. Adicionalmente, também é anotado o tempo correspondente ao ponto inicial (t_{b0}) até o instante de ocorrência do colapso de tensão, conforme ilustrado na Figura 24.

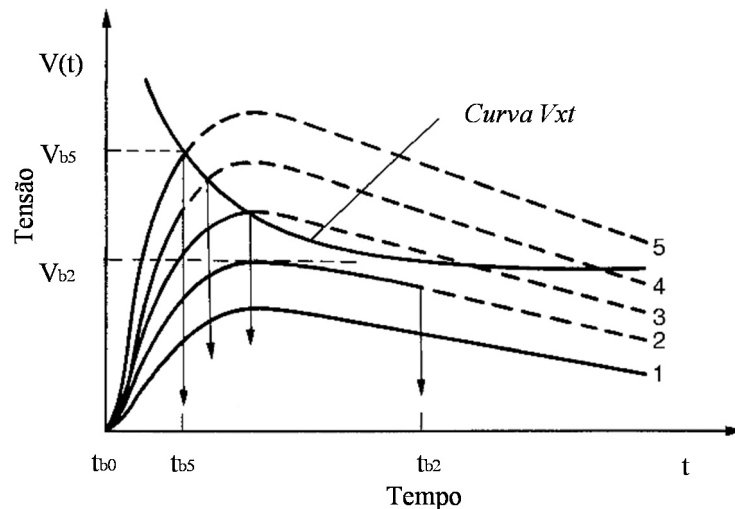


Figura 24 – Obtenção da *Curva V_{xt}* . Fonte: Adaptado de [31].

Repara-se na Figura 24 que a forma de impulso apresentada em “1” não foi suficiente para causar a ruptura da isolação. Por outro lado, em “2”, a disrupção ocorreu na cauda do impulso, no instante t_{b2} , portanto, anota-se t_{b2} e V_{b2} (valor de pico da tensão de impulso). No caso da curva “5”, a ocorrência da disrupção é observada na frente da forma, no instante t_{b5} , que deve ser anotado juntamente com a tensão de disrupção (V_{b5}).

Dada a não existência de um procedimento padrão, é comum encontrar na literatura a característica tensão por tempo de disrupção apresentando variações na quantidade de níveis e aplicações de tensão, o que influencia no aspecto final da curva. Por exemplo, com uma quantidade elevada de pontos pode ser possível traçar uma curva de tendência média, bem como curvas de limite inferior e superior, resultando na análise mais detalhada da suportabilidade dielétrica. Uma quantidade reduzida de pontos possibilita também a obtenção de uma curva de tendência média, porém, com menos detalhes, o que pode influenciar na avaliação final.

As referências [46, 47] avaliam *Curvas Vxt* para isoladores de porcelana do tipo pino de média tensão frente a formas de impulso não padronizadas. Esses trabalhos utilizam uma abordagem simplificada, ou seja, uma quantidade reduzida de pontos. Nestes casos, as *Curvas Vxt* são obtidas basicamente através de curvas de tendência, relacionando os pontos. O mesmo ocorre para o estudo apresentado na referência [48], avaliando as *Curvas Vxt* para isoladores do tipo disco, utilizados em linhas de transmissão. Os isoladores são ensaiados separadamente e em cascata (conjunto de 2 e 3 discos), sendo aplicados cinco níveis de tensão e um impulso por nível, totalizando cinco pontos, conforme é apresentado na Figura 25.

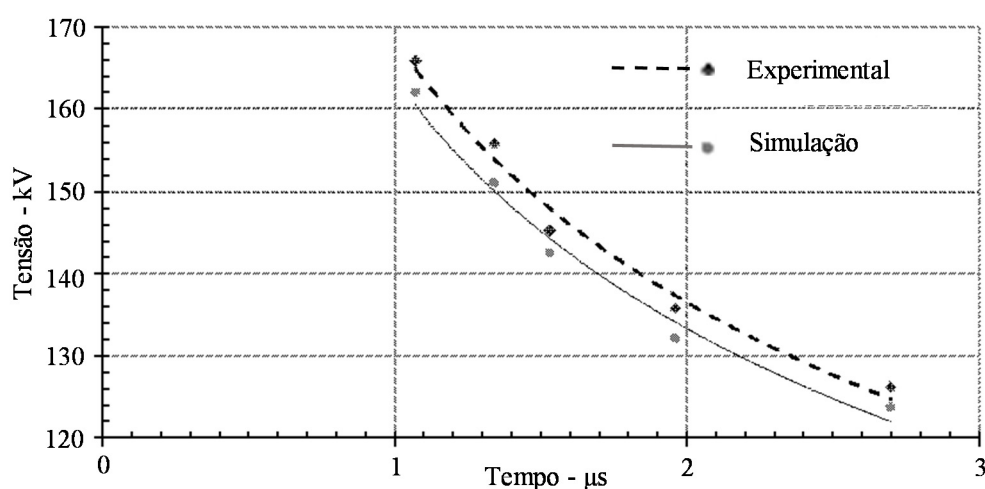


Figura 25 – *Curva Vxt* de um isolador tipo disco aplicando a forma de impulso padronizada na polaridade positiva. Fonte: Adaptado de [48].

Embora a curva de tendência seja uma aproximação da característica tensão de pico por tempo até a disrupção, a qual apresenta menor precisão, com base nela os autores avaliaram a suportabilidade dielétrica dos equipamentos e abordaram os modelos do efeito disruptivo para simulações computacionais, comparando as curvas obtidas nas simulações com as curvas de tendência resultantes de ensaios em laboratório.

Outros autores adotam uma metodologia mais completa a fim de obter mais detalhes e uma aproximação real da característica V_{xt} . Pode-se citar como exemplo, os resultados apresentados na referência [49]. Neste caso, as *Curvas V_{xt}* foram obtidas adotando uma quantidade maior de pontos, com a finalidade de avaliar a influência da variação do tempo de frente da forma de impulso em um espaçamento entre eletrodos do tipo meia esfera. Os resultados obtidos no referido trabalho são apresentados na Figura 26. Os pontos em azul, vermelho e roxo referem-se às curvas resultantes das formas de impulso $1,2 \times 50 \mu s$, $0,58 \times 50 \mu s$ e $0,09 \times 50 \mu s$, respectivamente. O trabalho também avaliou o método do efeito disruptivo.

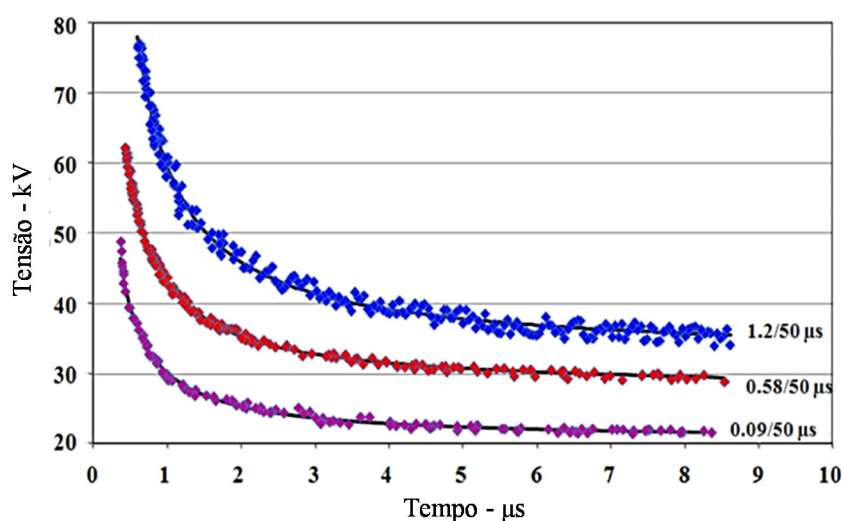


Figura 26 – *Curvas V_{xt}* variando o tempo de frente, obtidas entre eletrodos meia esfera com espaçamento de 1 cm. Fonte: Adaptado de [49].

Para avaliar a suportabilidade das chaves seccionadoras e chaves fusíveis, este trabalho utiliza uma metodologia desenvolvida pelo LAT-EFEI, sendo que parte dos resultados foram publicados, conforme referências [15, 16]. Do mesmo modo, *Lopes* em seu trabalho, também utilizou da metodologia para avaliar a suportabilidade dielétrica e abordar um modelo matemático do efeito disruptivo em isoladores de porcelana, dos tipos pino e pilar, classes de tensão 15,0 kV e 24,2 kV [8].

Para traçar a curva, foram feitas cinco aplicações em cada nível de tensão [15, 16]. O primeiro nível de tensão, refere-se a 80% da tensão $U_{50\%}$ obtida no ensaio *Up and Down*. Geralmente não ocorrem disrupções neste caso, obtendo-se a forma de impulso plena e garantindo-se o nível de tensão onde se iniciam as descargas. Em seguida, acrescenta-se um valor ΔU fixo na tensão inicial e aplicam-se mais cinco impulsos. O passo ΔU varia entre 2 kV a 5 kV dependendo da forma de impulso. O valor da tensão de pico (ou tensão disruptiva) e o tempo até a ocorrência da disrupção, caso haja a ocorrência, são anotados e, assim, um ponto é marcado no gráfico. Novamente, acrescenta-se o mesmo valor ΔU de tensão e mais cinco impulsos são aplicados. O procedimento se repete até o nível de tensão próximo ao limite do gerador de impulsos ou até se obter um padrão bem definido para a *Curva $V \times t$* .

A tensão máxima fornecida pelo gerador de impulsos de tensão do LAT-EFEI é de 450 kV, mas o valor real disponível a ser aplicado na isolação varia de acordo com a eficiência do sistema, que depende do conjunto de resistores utilizados para a obtenção das formas de impulso desejadas. A eficiência do gerador de impulsos para as formas avaliadas nesse trabalho varia entre 68% e 92%, conforme pode ser verificado na Tabela 20 presente no *Anexo A*.

Assim como no método *Up and Down*, a correção da tensão para as condições atmosféricas padronizadas deve ser considerada. Deste modo, os valores de temperatura, umidade e pressão são anotados a cada cinco impulsos aplicados.

Considerando toda variação possível, ou seja, dois equipamentos ensaiados, duas classes distintas de tensão, ambas polaridades e seis formas de impulso, a quantidade de *Curvas $V \times t$* obtidas no trabalho totalizam 48. Essas curvas são apresentadas no *Capítulo 4* e no *Anexo B*.

3.5 Correção da Tensão Disruptiva para as Condições Atmosféricas Padronizadas

A ocorrência da descarga disruptiva sofre influência das condições atmosféricas a que o dispositivo ou equipamento está submetido. Dessa maneira, a fim de se comparar resultados obtidos em diferentes ambientes é utilizada a correção da tensão disruptiva para as condições atmosféricas padronizadas pela norma IEC 60060-1, [20], conforme é apresentado na Tabela 7.

A tensão disruptiva corrigida (U_0) é obtida considerando o fator de correção para as condições atmosféricas padronizadas (K_t) e a tensão disruptiva mensurada (U_e) durante o ensaio, conforme equação (21):

Tabela 7 – Valores normalizados das condições atmosféricas. Fonte: [20].

Grandeza	Nomenclatura	Valores Padronizados
Umidade (g/m ³)	H ₀	11
Pressão (mmHg)	P ₀	760
Temperatura (°C)	T ₀	20

$$U_0 = \frac{U_e}{K_t} \quad (21)$$

O fator de correção (K_t) é resultante do produto de outros dois fatores, que são o fator de correção da densidade do ar (k_1) e o fator de correção da umidade do ar (k_2), conforme apresenta a equação (22).

$$K_t = k_1 k_2 \quad (22)$$

O fator de correção k_1 depende da densidade relativa do ar (δ) e do expoente m , de acordo com o apresentado na equação (23):

$$k_1 = \delta^m \quad (23)$$

Neste caso, a densidade relativa do ar pode ser dada pela equação (24), na qual P e T referem-se, respectivamente, à pressão e temperatura verificada durante a realização do ensaio.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \left(\frac{273 + T_0}{273 + T} \right) \quad (24)$$

Por outro lado, para determinar o valor do expoente m é necessário estimar o parâmetro g , relacionado às descargas iniciais e apresentado pela equação (25).

$$g = \frac{U_{50\%}}{500 d_a k \delta} \quad (25)$$

A tensão $U_{50\%}$ apresentada na equação (25) refere-se a tensão disruptiva crítica obtida no ensaio “*Up and Down*”, sem nenhum tipo de correção. A distância de arco do equipamento é representada por d_a . Adicionalmente, o parâmetro k é dependente do tipo de tensão aplicada

na isolação. Para impulsos de tensão, k é relacionado a umidade (H) e a densidade do ar, conforme equação (26), respeitando sua condição. Nesse caso, durante a realização dos ensaios, verificou-se que a condição estabelecida pela equação (26) foi atendida.

$$k = 1 + 0,010 \left(\frac{H}{\delta} - 11 \right) \quad \text{se} \quad 1 \text{ g/m}^3 < \frac{H}{\delta} < 20 \text{ g/m}^3 \quad (26)$$

O parâmetro k , também é utilizado a fim de determinar o coeficiente de correção relacionado a umidade (k_2), conforme equação (27).

$$k_2 = k^w \quad (27)$$

Ambos os expoentes, m e w , são obtidos conhecendo-se g , conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficientes m e w relacionados ao parâmetro g . Fonte: [20].

g	m	w
< 0,2	0	0
0,2 até 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 até 1,2	1,0	1,0
1,2 até 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
> 2,0	1,0	0

Com base nas formulações apresentadas, é possível determinar o fator de correção K_i e aplicá-lo nos resultados.

4 Resultado dos Ensaios e Análises

Neste capítulo é apresentado os resultados das tensões $U_{50\%}$ e *Curvas Vxt* para as chaves seccionadoras e chaves fusíveis de média tensão. A princípio, a análise dos resultados é feita separadamente para cada equipamento. Em seguida, os equipamentos são avaliados entre si, considerando também os resultados obtidos por *Lopes* para os isoladores dos tipos pino e pilar de média tensão, apresentados nas referências [6, 7, 8].

4.1 Resultados e Análises das Tensões $U_{50\%}$

4.1.1 Chaves Seccionadoras

As tensões $U_{50\%}$ obtidas para as chaves seccionadoras são apresentadas na Figura 27. As barras na vertical (em azul) da Figura 27 referem-se aos intervalos de confiança.

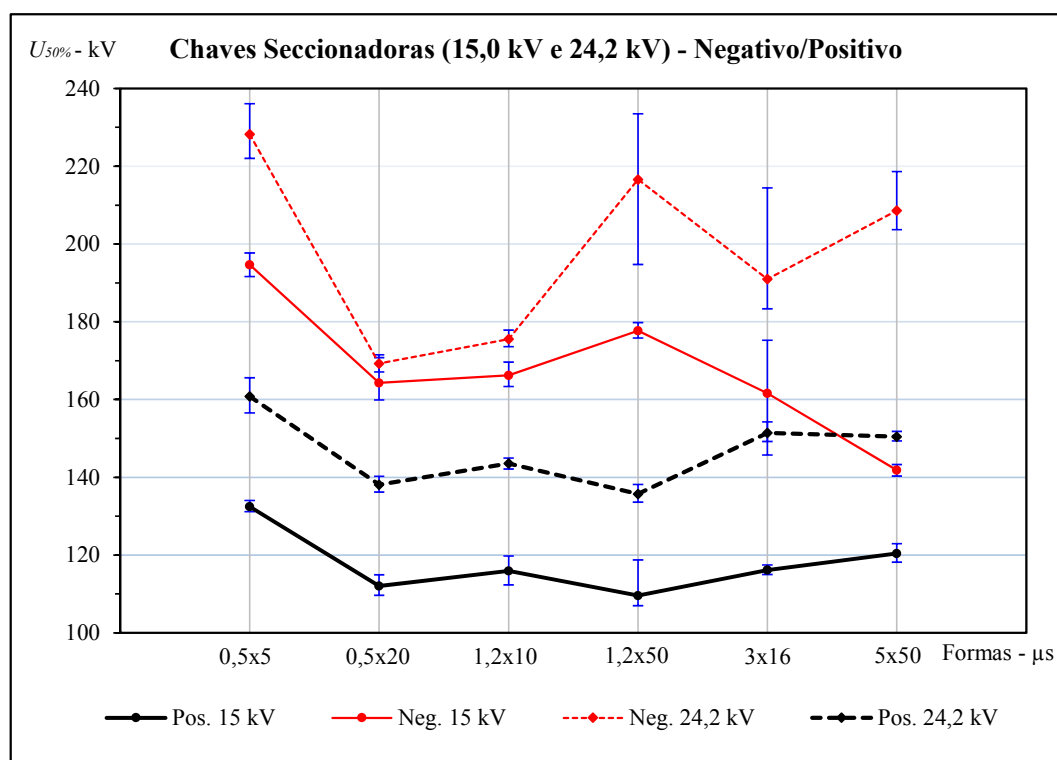


Figura 27 – Tensões $U_{50\%}$ das chaves seccionadoras de classes 15 kV e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul.

Na Tabela 9 e na Tabela 10 são detalhados os valores das tensões $U_{50\%}$ e seus respectivos intervalos de confiança. Neste caso, a Tabela 9 refere-se a chave seccionadora de classe 15 kV e a Tabela 10 refere-se a chave seccionadora de classe 24,2 kV. A denominação $\Delta U_{50\%}$ indica

as diferenças dos resultados, em porcentagem, das formas não padronizadas em relação à padrão.

Tabela 9 – Tensões $U_{50\%}$: Chave seccionadora, classe 15,0 kV.

Forma de Impulso		Chave Seccionadora 15,0 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	132,5	20,9	131,2	134,0	194,7	9,6	191,6	197,7
0,5	20,0	112,1	2,2	109,7	114,9	164,3	-7,6	159,9	170,8
1,2	10,0	115,9	5,8	112,3	119,8	166,2	-6,5	163,4	169,7
1,2	50,0	109,6	-	107,0	118,8	177,7	-	175,8	179,8
3,0	16,0	116,2	6,0	115,0	117,4	161,6	-9,1	145,8	175,3
5,0	50,0	120,4	9,8	118,2	122,9	141,9	-20,2	140,4	143,3

Tabela 10 – Tensões $U_{50\%}$: Chave seccionadora, classe 24,2 kV.

Forma de Impulso		Chave Seccionadora 24,2 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	160,8	18,5	156,5	165,6	228,3	5,4	222,0	236,1
0,5	20,0	138,1	1,7	136,2	140,7	169,3	-21,8	167,1	171,5
1,2	10,0	143,6	5,8	142,1	144,9	175,6	-18,9	173,6	177,9
1,2	50,0	135,7	-	133,7	138,1	216,6	-	194,7	233,5
3,0	16,0	151,4	11,6	149,2	154,2	191,0	-11,8	183,4	214,5
5,0	50,0	150,4	10,8	149,3	151,8	208,6	-3,7	203,7	218,6

Analisando a Figura 27, a Tabela 9 e a Tabela 10, observa-se que para as chaves seccionadoras, a polaridade crítica é a positiva, ou seja, a qual resulta em menor suportabilidade dielétrica à isolação do equipamento. Nesse caso, é evidente também uma alta discrepância entre as tensões $U_{50\%}$ obtidas para cada polaridade, conforme pode ser verificado na Tabela 11, que apresenta a redução da tensão $U_{50\%}$ em quilovolts e em porcentagem, considerando como base o maior valor, ou seja, os resultados para a polaridade negativa.

Por exemplo, considerando a Tabela 11, a forma de impulso 0,5 x 5 μ s e a chave seccionadora de classe 15,0 kV, repara-se que a suportabilidade dielétrica da polaridade positiva é 62,2 kV menor do que a polaridade negativa, ou seja, uma redução de 32,0%.

De acordo com a Tabela 11, em média, a diferença observada para a chave seccionadora de classe 15,0 kV é de 55,7 kV, representando uma redução da suportabilidade de 29,3%

comparando a polaridade positiva com a negativa. No caso da chave seccionadora de classe 24,2 kV, a divergência média é de 51,5 kV, representando 25,4%.

Tabela 11 – Diferença de resultados entre as polaridades para as chaves seccionadoras, considerando como base de cálculo o maior valor de $U_{50\%}$.

Formas de Impulso		Diferença Entre Polaridades			
		Chave Seccionadora 15,0 kV		Chave Seccionadora 24,2 kV	
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	(kV)	(%)	(kV)	(%)
0,5	5,0	62,2	32,0	67,4	29,5
0,5	20,0	52,2	31,8	31,2	18,4
1,2	10,0	50,3	30,3	32,0	18,2
1,2	50,0	68,1	38,3	80,9	37,3
3,0	16,0	45,4	28,1	39,6	20,7
5,0	50,0	21,5	15,1	58,2	27,9
Média		55,7	29,3	51,5	25,4

Nas pontas dos terminais da seccionadora há um relevo arredondado. Durante a realização dos ensaios, as descargas disruptivas foram observadas com maior frequência nessa região, partindo em direção a base plana do equipamento, conforme a Figura 28. Desse modo, o arranjo do equipamento apresentou comportamento semelhante ao verificado para eletrodos ponta-plano e esfera-plano, com a polaridade positiva mais crítica, conforme descrito no item 2.2. Este fato pode explicar a diferença de suportabilidade dielétrica comparando as polaridades, dada a não uniformidade do campo elétrico contido entre os terminais da seccionadora e sua base plana.

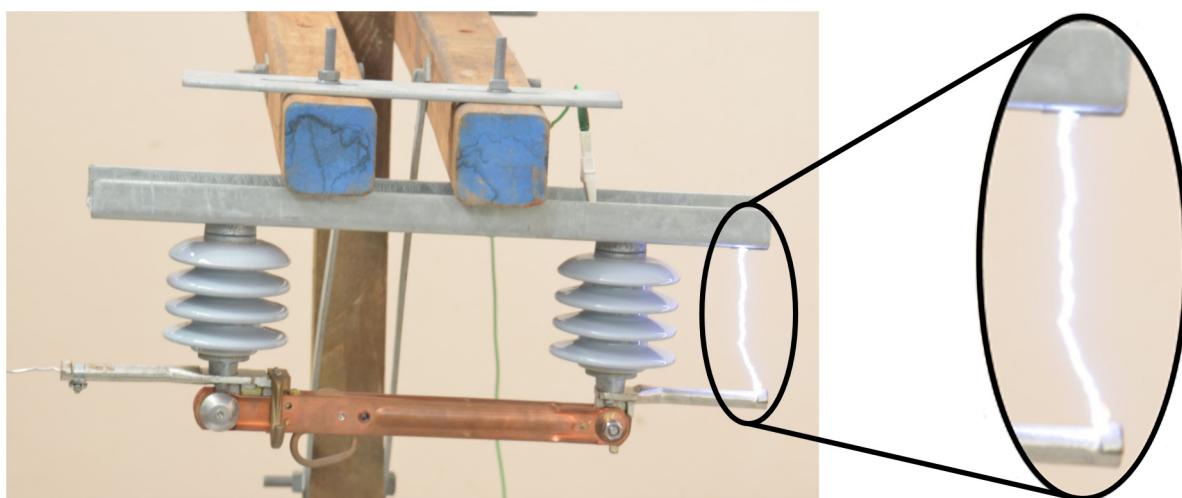


Figura 28 – Ponto de maior ocorrência das descargas disruptivas nas chaves seccionadoras.

Comparando as formas de impulso, nota-se que a forma $0,5 \times 5 \mu\text{s}$ é a menos crítica para a isolação ensaiada, com suportabilidade dielétrica 20,9% e 9,6% maior se comparada com a forma padrão para a chave de classe 15,0 kV na polaridade positiva e negativa, respectivamente. Do mesmo modo, considerando a seccionadora de classe 24,2 kV e forma de impulso $0,5 \times 5 \mu\text{s}$, a suportabilidade dielétrica observada na polaridade positiva e negativa, respectivamente, é de 18,5% e 5,4% maior se comparada com a forma $1,2 \times 50 \mu\text{s}$.

Isso pode ser explicado de acordo com o que foi apresentado no subitem 2.2.4, indicando a formação da descarga para solicitações de tensão de impulso. De fato, a combinação de tempo de frente rápido e cauda curta representa menor tempo no qual a isolação fica submetida a solicitação de tensão. Para que ocorra todo o processo de formação das descargas preliminares até a completa ruptura da isolação, é necessário um valor de pico da tensão maior se comparado com as demais formas de impulso utilizadas nesse trabalho.

Na polaridade positiva, a forma de impulso padrão apresentou-se como a mais crítica para ambas as classes. Por outro lado, o mesmo não é observado para a polaridade negativa, sendo as formas $5 \times 50 \mu\text{s}$ e $0,5 \times 20 \mu\text{s}$ as mais críticas para a chave seccionadora de classe 15,0 kV e 24,2 kV, respectivamente.

Vale ressaltar que a interseção dos intervalos de confiança indicam que os resultados são estatisticamente iguais. Por exemplo, conforme a Figura 27 e a Tabela 10, na polaridade negativa para a chave seccionadora de classe 24,2 kV, os intervalos de confiança das formas $1,2 \times 50 \mu\text{s}$, $3 \times 16 \mu\text{s}$ e $5 \times 50 \mu\text{s}$ se interceptam, indicando que os resultados de ambas são estatisticamente iguais.

4.1.2 Chaves Fusíveis

As tensões $U_{50\%}$ obtidas para as chaves fusíveis são apresentadas na Figura 29, na Tabela 12 e na Tabela 13. As barras na vertical (em azul) da Figura 29 referem-se aos intervalos de confiança.

Do mesmo modo que o apresentado para as chaves seccionadoras, a Tabela 12 e a Tabela 13 detalham os valores das tensões $U_{50\%}$ e seus respectivos intervalos de confiança.

Considerando a Figura 29, a Tabela 12 e a Tabela 13, observa-se a ocorrência de inversão da polaridade crítica se comparada com a chave seccionadora, ou seja, nesse caso a polaridade negativa representa menor suportabilidade dielétrica ao equipamento.

De modo geral, o desempenho dielétrico das chaves fusíveis assemelha-se ao comportamento apresentado pelos eletrodos ponta-ponta, haste-haste e esfera-esfera, conforme

indica o subitem 2.2.5, no qual a não uniformidade do campo elétrico para maiores espaçamentos faz com que a polaridade negativa se torne mais crítica.

Embora a distância de arco apresente-se entre dois parafusos, um no terminal de entrada e outro na base de fixação do equipamento com a cruzeta de sustentação da rede, a ocorrência do arco elétrico foi observado em variados pontos do equipamento, e não necessariamente entre duas pontas, conforme ilustrado na Figura 30.

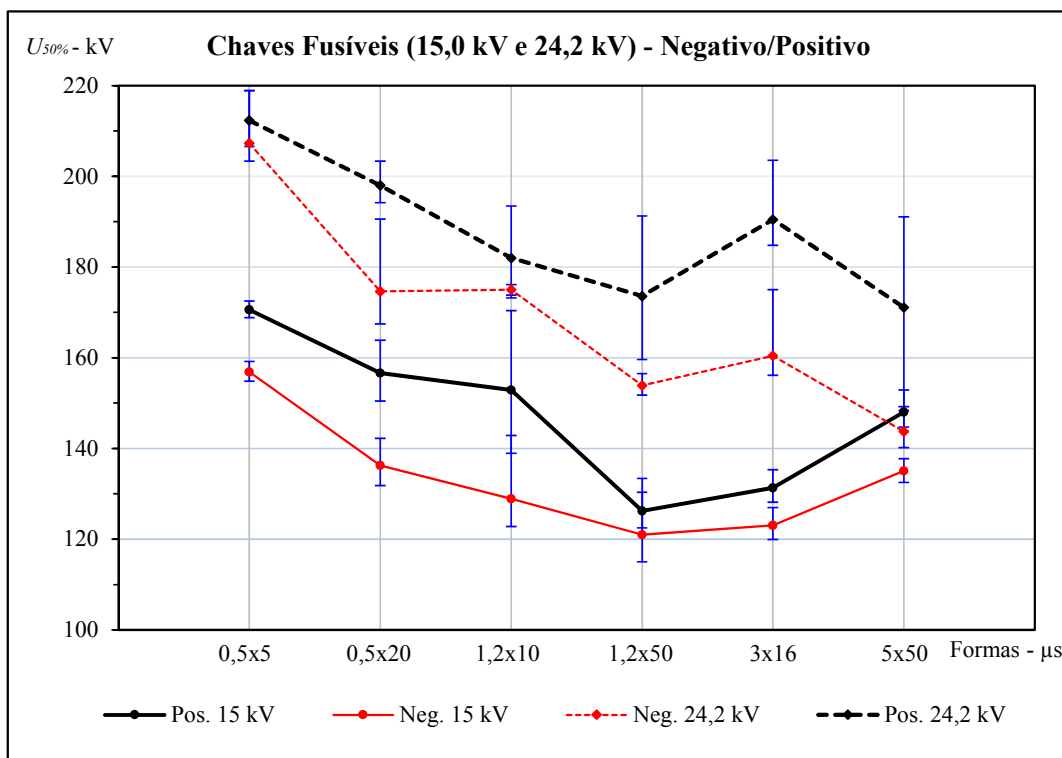


Figura 29 – Tensões $U_{50\%}$ das chaves fusíveis de classes 15 kV e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul.

Tabela 12 – Tensões $U_{50\%}$: Chave fusível, classe 15,0 kV.

Forma de Impulso		Chave Fusível 15,0 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μs)	t_2 (μs)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	170,6	35,1	168,8	172,5	156,9	29,7	154,8	159,2
0,5	20,0	156,6	24,0	150,5	163,9	136,3	12,6	131,8	142,2
1,2	10,0	152,9	21,1	138,9	170,4	128,9	6,5	122,8	142,9
1,2	50,0	126,3	-	122,5	130,3	121,0	-	115,0	133,4
3,0	16,0	131,3	4,0	128,2	135,3	123,0	1,7	120,0	127,0
5,0	50,0	148,0	17,3	144,7	152,9	135,1	11,7	132,5	137,8

Tabela 13 – Tensões $U_{50\%}$: Chave fusível, classe 24,2 kV.

Forma de Impulso		Chave Fusível 24,2 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	212,3	22,3	206,6	218,9	207,3	34,7	203,4	218,9
0,5	20,0	198,0	14,1	194,2	203,3	174,6	13,5	167,5	190,6
1,2	10,0	182,0	4,8	173,2	193,5	175,0	13,7	173,9	176,1
1,2	50,0	173,6	-	159,6	191,3	153,9	-	151,8	156,5
3,0	16,0	190,5	9,7	184,8	203,6	160,5	4,3	156,1	175,0
5,0	50,0	171,1	-1,4	148,4	191,1	143,7	-6,6	140,8	149,2

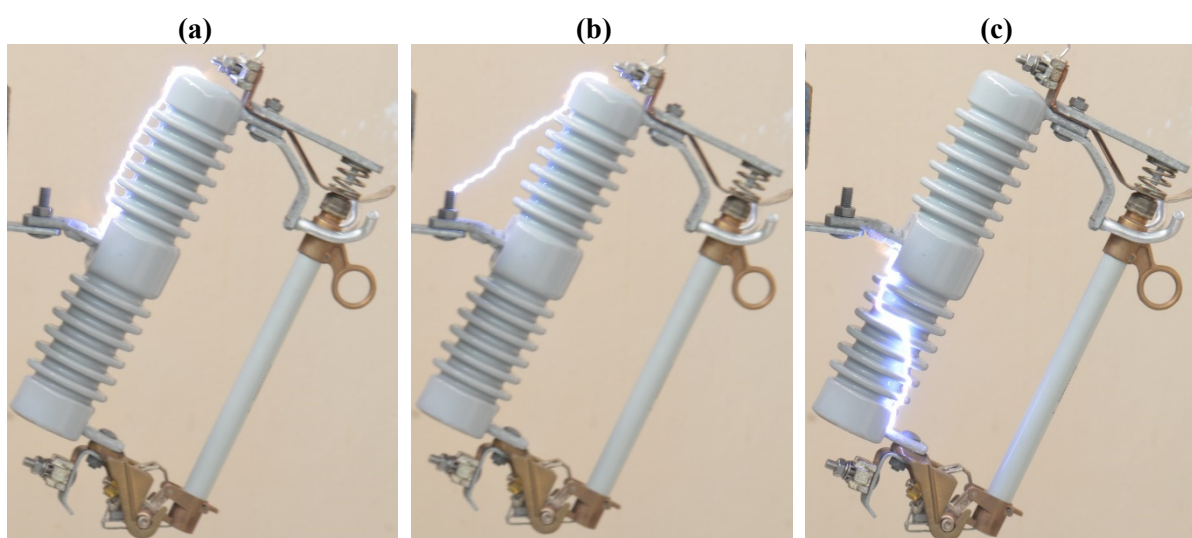


Figura 30 – Disrupção na chave fusível de classe 24,2 kV: (a) Descarga disruptiva rente ao isolador superior; (b) Descarga disruptiva no isolador superior, atingindo o parafuso de fixação do equipamento com a cruzeta; (c) Descarga disruptiva percorrendo o isolador inferior.

Na Tabela 14 é indicado os valores das diferenças dos resultados entre as polaridades, do mesmo modo que foi exposto para as chaves seccionadoras. Nesse caso, o valor em porcentagem considera o quanto a diferença em tensão representa no resultado de maior suportabilidade, ou seja, na polaridade positiva.

Observa-se na Tabela 14 que a discrepância entre as polaridades é menor se comparada com a chave seccionadora. Em média, para a chave fusível de classe 15,0 kV a diferença observada entre as polaridades é de 14,3 kV, resultando em 9,3% de redução. Por outro lado, para a chave fusível de classe 24,2 kV, a diferença observada é de 18,7 kV, ou seja, uma redução na média de 10,9%.

Em relação as formas de impulso, percebe-se uma tendência semelhante à apresentada pela chave seccionadora, com aumento da suportabilidade dielétrica do equipamento quando solicitado pela forma 0,5 x 5 μ s. No caso da classe 15,0 kV, para a polaridade positiva e

negativa, respectivamente, a forma 0,5 x 5 μ s apresentou 35,1% e 29,7% maior suportabilidade se comparada com a forma de impulso padrão. Em relação a chave de 24,2 kV, a suportabilidade da forma 0,5 x 5 μ s é 22,3% maior do que a forma padrão na polaridade positiva e 34,7% maior na polaridade negativa.

Tabela 14 – Diferença de resultados entre as polaridade para as chaves fusíveis, considerando como base de cálculo o maior valor de $U_{50\%}$.

Forma de Impulso		Diferença Entre Polaridades			
		Chave Fusível 15,0 kV		Chave Fusível 24,2 kV	
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	(kV)	(%)	(kV)	(%)
0,5	5,0	13,7	8,0	5,0	2,4
0,5	20,0	20,3	13,0	23,4	12,0
1,2	10,0	24,0	15,7	7,0	4,0
1,2	50,0	5,3	4,2	19,7	12,3
3,0	16,0	8,3	6,3	30,0	16,3
5,0	50,0	12,9	8,7	27,4	18,4
Média		14,3	9,3	18,7	10,9

A forma 1,2 x 50 μ s é a mais crítica em todos os casos, com exceção dos resultados para a chave fusível de classe 24,2 kV, polaridade negativa, na qual a 5 x 50 μ s apresentou-se como a mais crítica. Porém, observando a Figura 29, grande parte dos resultados são estatisticamente iguais, pois os intervalos de confiança se interceptam.

4.2 Resultados e Análises das *Curvas Vxt*

As *Curvas Vxt* obtidas nos ensaios são apresentadas separadamente no *Anexo B*. Por outro lado, os subitens 4.2.1 e 4.2.2, apresentam os resultados obtidos para as chaves seccionadoras e chaves fusíveis, respectivamente, considerando as curvas para cada forma de impulso contidas em um único gráfico, porém, separadas por polaridade da solicitação e classe de tensão.

4.2.1 Chaves Seccionadoras

Na Figura 31 e na Figura 32 são apresentadas as *Curvas Vxt* obtidas para as chaves seccionadoras de classes 15,0 kV e 24,2 kV, respectivamente.

Observando as curvas, repara-se na mesma tendência indicada pelos resultados das tensões $U_{50\%}$, ou seja, no caso das chaves seccionadoras, a polaridade positiva apresenta-se

como a mais crítica se comparada com a negativa, com os pontos representativos de descargas disruptivas ocorrendo para valores inferiores de tensão.

De acordo com a Figura 31 e a Figura 32, é verificado um padrão de agrupamento entre os resultados da polaridade positiva para as seis formas de impulso. Comportando de modo distinto, os resultados da polaridade negativa são mais dispersos. Por exemplo, considerando o mesmo instante de disrupção, as formas de impulso com tempo de frente longo ($5 \times 50 \mu\text{s}$ e $3 \times 16 \mu\text{s}$) apresentam pontos de disrupção com valores maiores de tensão se comparadas com as demais formas de impulso.

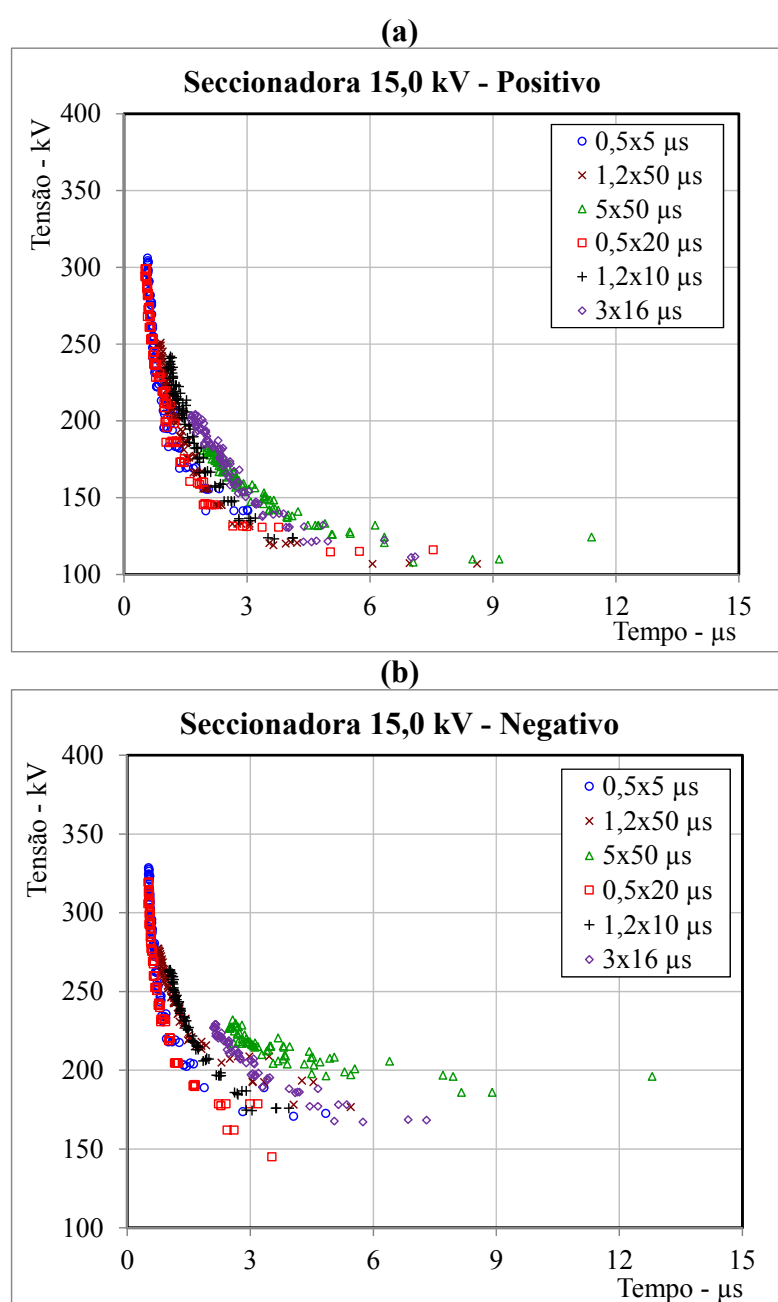


Figura 31 – Curvas V_{xt} obtidas para a chave seccionadora de classe 15,0 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.

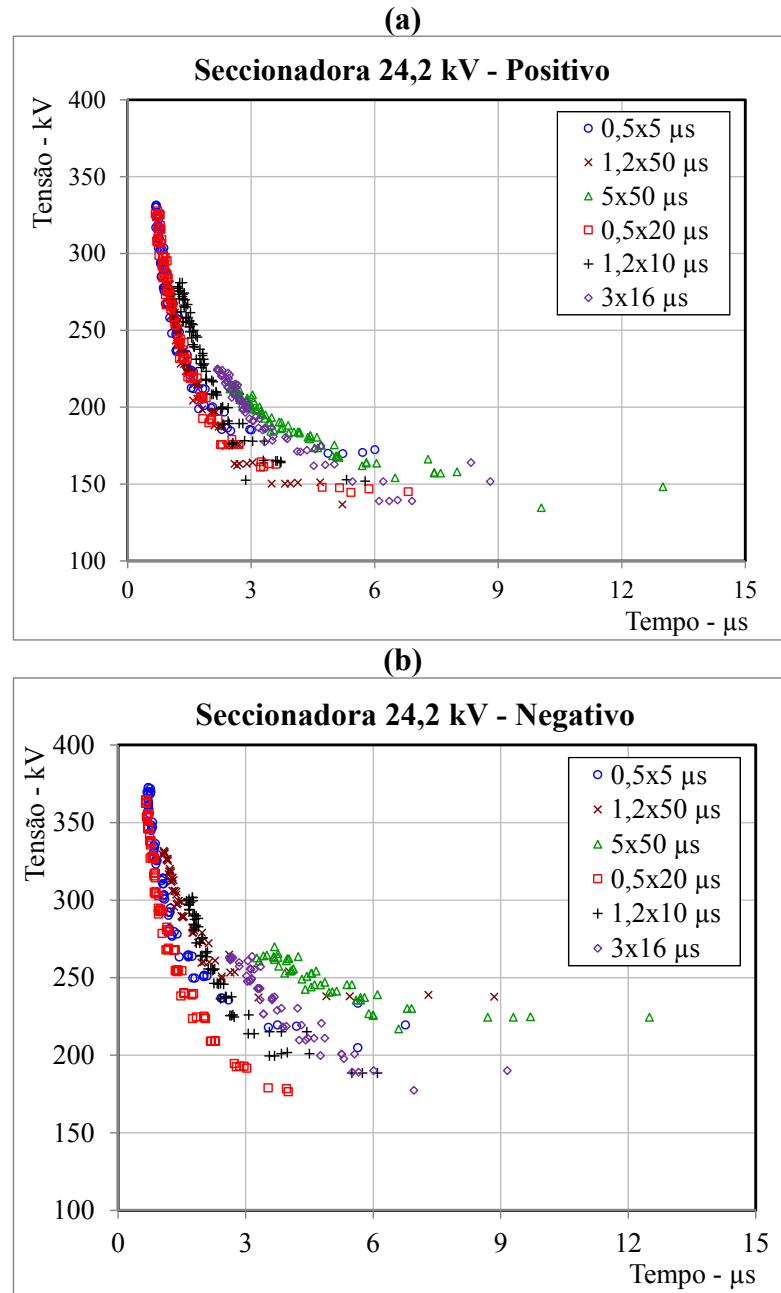


Figura 32 – *Curvas V_{xt}* obtidas para a chave seccionadora de classe 24,2 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.

Em geral, há uma tendência de encontro das *Curvas V_{xt}* para valores elevados de tensão, fato não visível para as formas 5 x 50 μs e 3 x 16 μs . Isso ocorre dada a limitação de tensão e baixa eficiência do sistema para tais formas de impulso, conforme pode ser verificado na Tabela 20 presente no *Anexo A*, a qual apresenta as eficiências para cada forma utilizada.

A ocorrência da disrupção é observada para valores de tempo menores que 15 μs , com dispersão maior no tempo de disrupção para valores menores de tensão, próximos da $U_{50\%}$.

4.2.2 Chaves Fusíveis

São apresentadas na Figura 33 e na Figura 34 as *Curvas V_{xt}* obtidas para as chaves fusíveis de classes 15,0 kV e 24,2 kV, respectivamente.

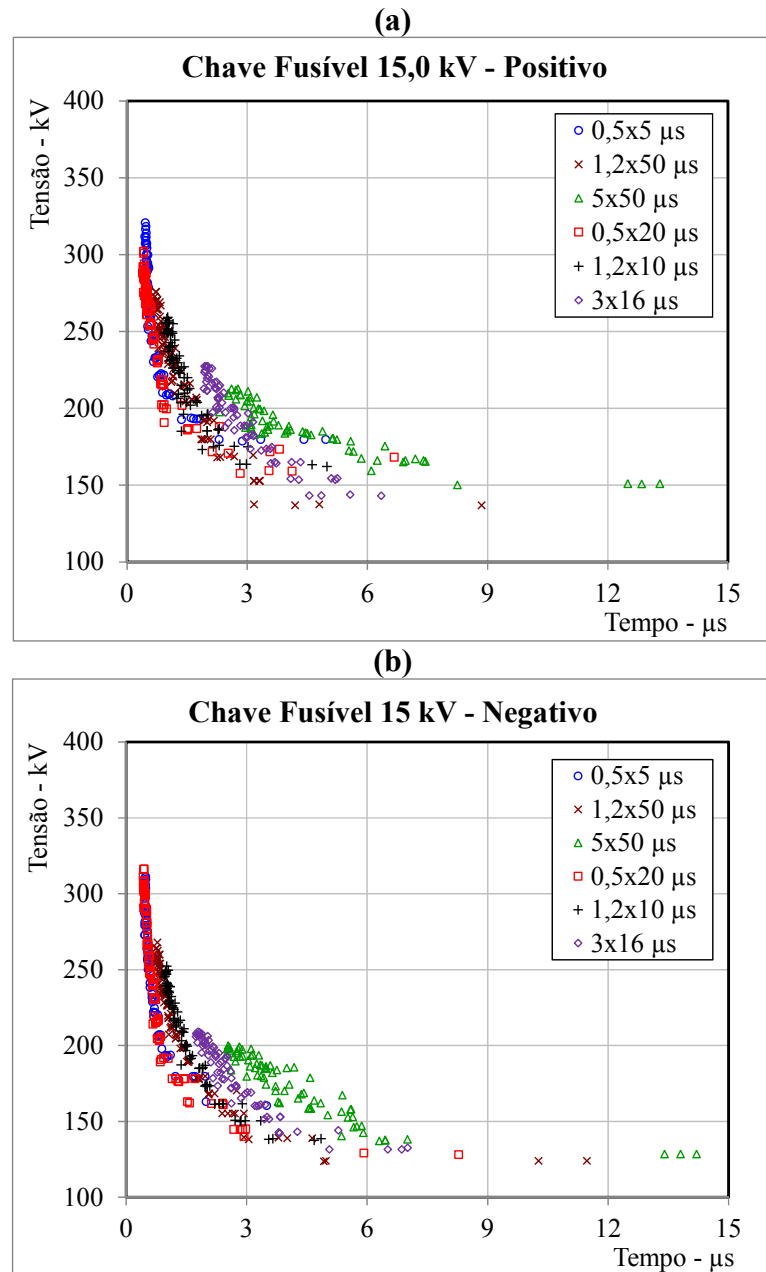


Figura 33 – *Curvas V_{xt}* obtidas para a chave fusível de classe 15,0 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.

Analisando-se a Figura 33 e a Figura 34, nota-se que a polaridade negativa é mais crítica se comparada com a positiva, conforme observado para as tensões $U_{50\%}$. Porém, de modo geral, a diferença entre polaridades é menor do que a apresentada nos resultados das chaves seccionadoras.

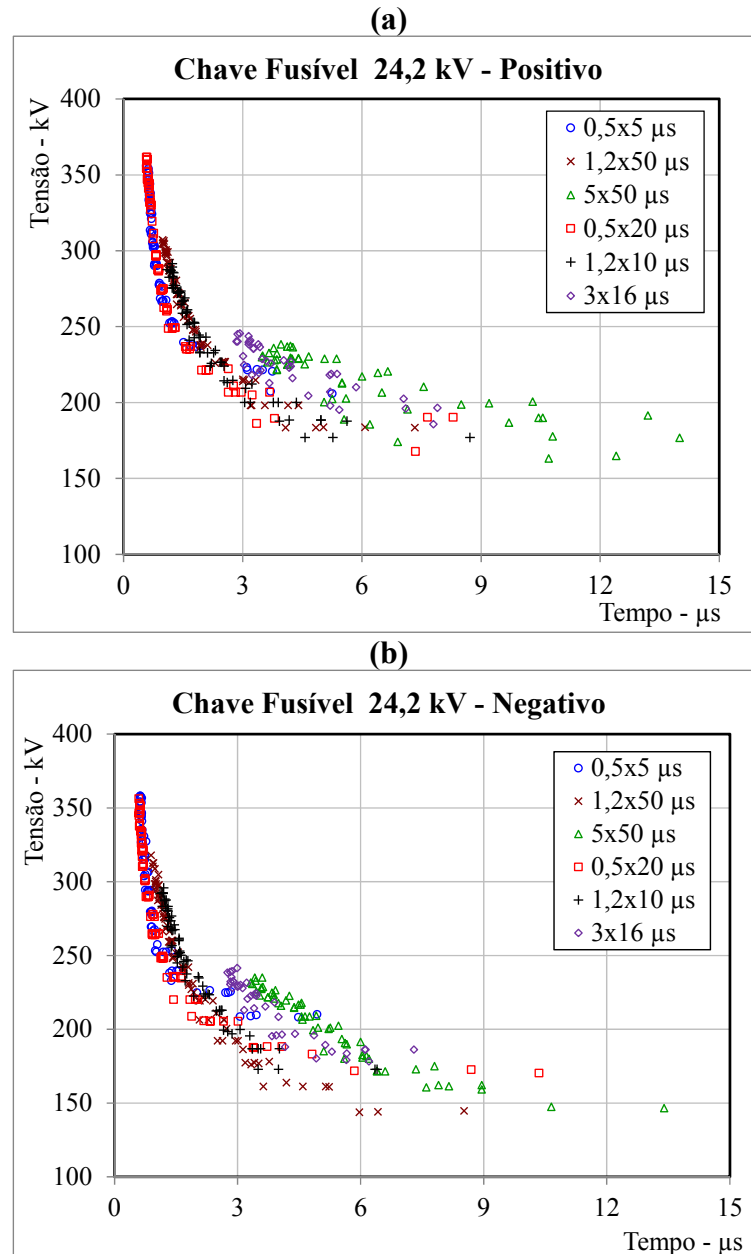


Figura 34 – Curvas V_{xt} obtidas para a chave fusível de classe 24,2 kV: (a) Polaridade positiva; (b) Polaridade negativa.

No caso das chaves fusíveis, independentemente da polaridade, as *Curvas V_{xt}* comportam-se de forma semelhante, com dispersão menos acentuada se comparada com os resultados da polaridade negativa das chaves seccionadoras. Há também uma tendência de encontro das curvas para valores elevados de tensão.

Do mesmo modo que o apresentado para as chaves seccionadoras, a ocorrência da ruptura é observada para valores de tempo inferiores a 15 μs , com dispersão maior no tempo de ruptura para valores menores de tensão, próximos da tensão $U_{50\%}$.

Dadas as altas temperaturas causadas pelas descargas disruptivas e a grande quantidade de impulsos aplicados, nas chaves fusíveis foram notados pequenos danos no cimento que

compõe a junção entre o isolador e os componentes metálicos dos terminais de entrada, de saída e a base do equipamento. Os detalhes dos danos causados são apresentados na Figura 35.

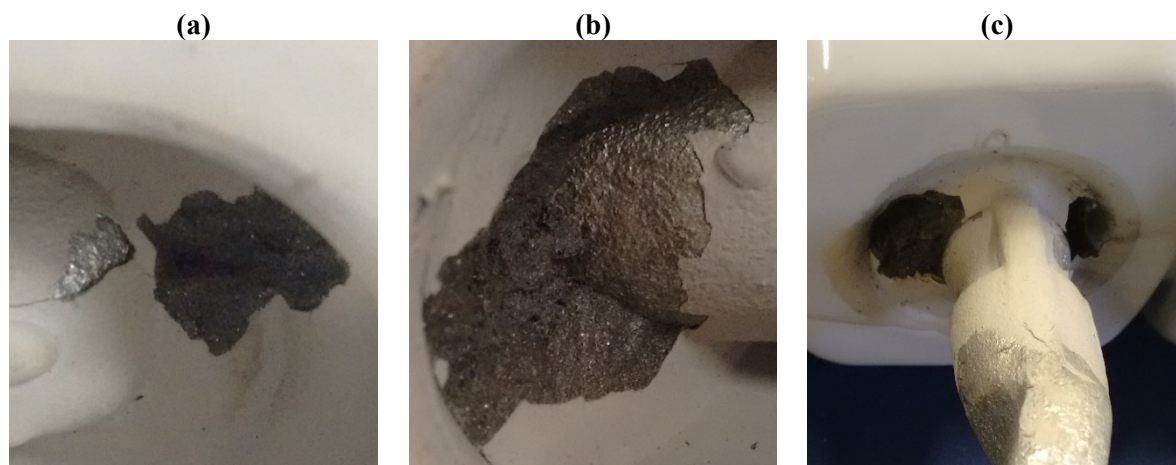


Figura 35 – Danos causados na chave fusível de classe 15,0 kV: (a) Terminal de entrada; (b) Terminal de saída; (c) Base do equipamento, no centro do isolador.

Esses pequenos danos foram superficiais e pontuais, sendo que durante a realização dos ensaios não foram verificadas alterações no comportamento dielétrico do equipamento, portanto, não influenciaram nos resultados e em suas análises.

A fim de comprovar o exposto no parágrafo anterior, foram determinadas as tensões $U_{50\%}$ para as chaves fusíveis após a obtenção das *Curvas V_{xt}* e constatação dos danos. Esses novos ensaios foram realizados apenas para a forma de impulso padronizada, sendo a que apresenta-se como a mais crítica na maioria dos resultados para as chaves fusíveis. Os dados estão presentes na Tabela 15 e na Figura 36. Considerando os intervalos de confiança, observa-se na Tabela 15 e na Figura 36 que a suportabilidade dos equipamentos não se alterou devido aos danos observados.

Tabela 15 – ANTES: tensões $U_{50\%}$ utilizadas na avaliação das chaves fusíveis, antes da realização dos ensaios para levantamento das *Curvas V_{xt}* . APÓS: tensões $U_{50\%}$ novas, referentes à ensaios realizados após obtenção das *Curvas V_{xt}* . Resultados obtidos para a forma de impulso padrão.

Chave Fusível	Ensaio	Positivo			Negativo		
		$U_{50\%}$ (kV)	Intervalo de confiança (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	Intervalo de confiança (kV)	
15,0 kV	APÓS	133,4	129,5	136,4	124,7	122,2	127,2
	ANTES	126,3	122,5	130,3	121,0	115,0	133,4
24,2 kV	APÓS	171,3	166,2	189,3	152,0	147,8	158,7
	ANTES	173,6	159,6	191,3	153,9	151,8	156,5

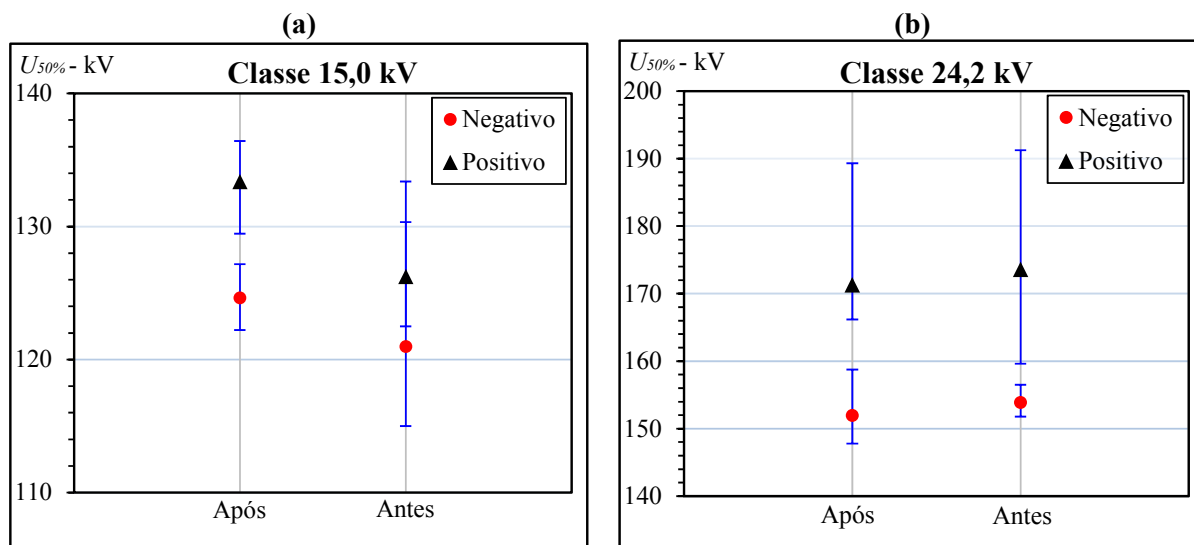


Figura 36 – Tensões $U_{50\%}$ após e antes da realização dos ensaios para obtenção das *Curvas V_{xt}* , utilizando a forma de impulso 1,2x50 μ s: (a) Chave fusível de classe 15,0 kV; (b) Chave fusível de classe 24,2 kV.

4.3 Comparação com os Resultados dos Isoladores de Porcelana dos Tipos Pino e Pilar

São apresentados no *Anexo C*, as tensões $U_{50\%}$ dos isoladores de porcelana do tipo pino e pilar, classes 15,0 kV e 24,2 kV, para as formas de impulso analisadas nesse trabalho. Esses resultados foram obtidos por *Lopes* [6, 7].

De fato, se comparados com as chaves seccionadoras e chaves fusíveis, os isoladores são presentes em maior número no sistema de distribuição de energia elétrica. Porém, a presença de um componente com menor suportabilidade dielétrica interfere no nível de isolamento da rede como um todo, mesmo que esse dispositivo represente uma parcela reduzida dos componentes que compõe o sistema.

Dessa forma, esse item pretende comparar os resultados obtidos para as chaves seccionadoras, chaves fusíveis e os isoladores de porcelana dos tipos pino e pilar, separando-os por classe de tensão.

4.3.1 Classe 15,0 kV

A fim de auxiliar na comparação dos resultados, a Tabela 16 contém as distâncias de arco dos equipamentos da classe 15,0 kV.

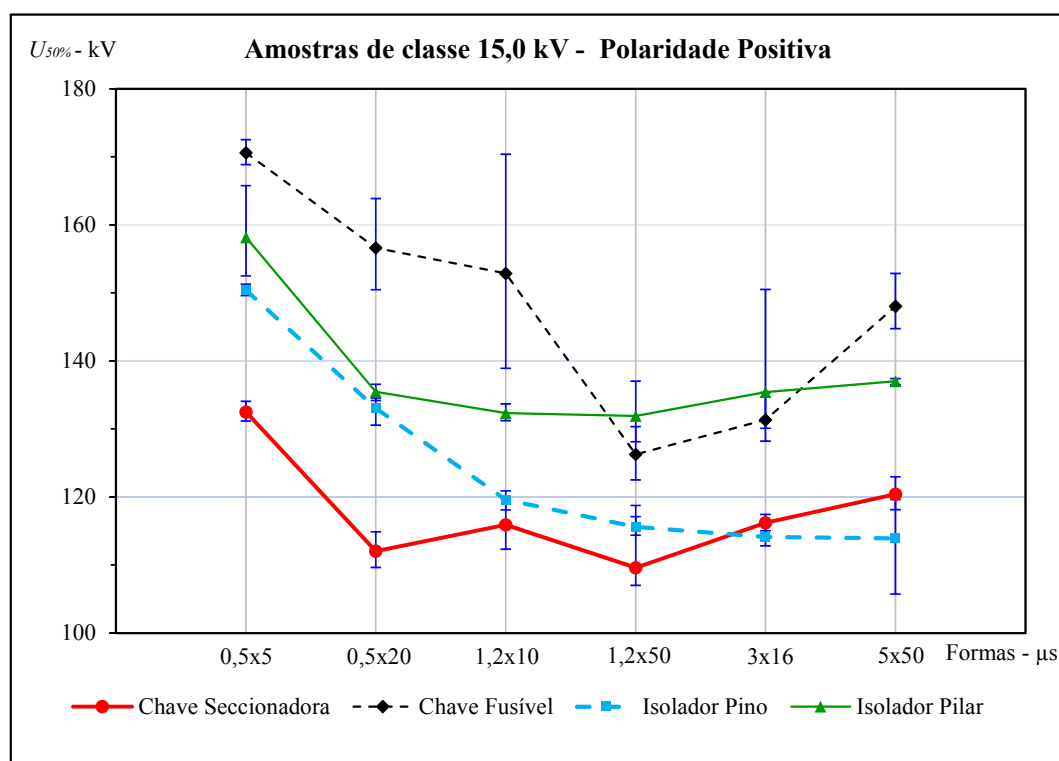
São apresentadas na Figura 37 e na Figura 38 as tensões $U_{50\%}$ para as polaridades positiva e negativa, respectivamente, da chave seccionadora, chave fusível e isoladores do tipo pino e pilar, na classe 15,0 kV.

Tabela 16 – Distâncias de arco para os equipamentos da classe 15,0 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].

Equipamento	Chave Seccionadora	Chave Fusível	Isolador Pino	Isolador Pilar
Distância de arco (<i>da</i>) (cm)	15,0	16,0	14,0	17,0

Primeiramente, nota-se, comparando-se a Figura 37 e a Figura 38, que o comportamento dielétrico dos isoladores de porcelana de ambos os tipos é semelhante ao apresentado pela chave seccionadora, sendo a polaridade positiva mais crítica para a isolação dos equipamentos.

Em geral, na polaridade positiva, Figura 37, a suportabilidade dielétrica dos equipamentos está contida em uma faixa de aproximadamente 106 kV a 173 kV. Do mesmo modo, para a polaridade negativa, Figura 38, a faixa da suportabilidade dielétrica envolvendo todos os equipamentos está entre 115 kV e 222 kV.

Figura 37 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 15,0 kV na polaridade positiva. Fonte: O autor (2017) e [7].

Analisando a Figura 37, caso o surto de tensão resultante de uma descarga atmosférica seja de polaridade positiva, o equipamento com pior desempenho dielétrico é a chave seccionadora. Porém, para algumas formas de impulso, as tensões $U_{50\%}$ desse equipamento são estatisticamente iguais às encontradas para o isolador do tipo pino. Por outro lado, o

equipamento com melhor desempenho dielétrico é a chave fusível, mas para algumas formas de impulso os resultados são estatisticamente iguais ao isolador do tipo pilar.

Na polaridade negativa, Figura 38, conforme a Tabela 16, embora a chave fusível tenha a segunda maior distância de arco (16 cm), este equipamento apresenta o pior desempenho dielétrico entre os demais, ou seja, se o surto provocado na rede de distribuição de classe 15,0 kV for negativo, a chave fusível será o componente mais crítico. Entretanto, considerando o melhor desempenho, destaca-se o isolador do tipo pilar, com suportabilidade dielétrica elevada em relação aos demais. Esse equipamento também apresenta a maior distância de arco na classe 15,0 kV.

Em relação ao isolador do tipo pilar, verifica-se também uma alta discrepância nos resultados entre as polaridades. Isso pode estar relacionado com a distribuição de campo elétrico. Porém, para melhor avaliação do campo elétrico são necessárias simulações computacionais a fim de verificar sua uniformidade. Essa avaliação será realizada em trabalhos futuros, conforme mencionado no item 5.2 presente no *Capítulo 5*.

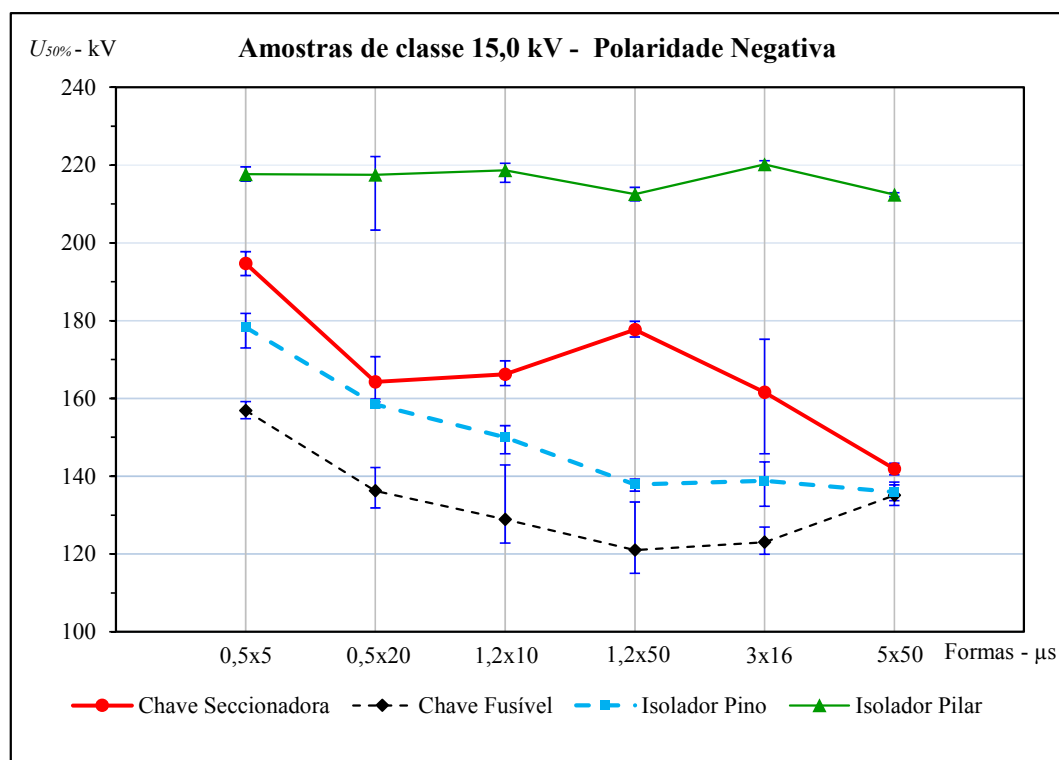


Figura 38 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 15,0 kV na polaridade negativa. Fonte: O autor (2017) e [7].

Em relação ao desempenho dielétrico dos equipamentos frente as formas de impulso utilizadas, a Tabela 17 apresenta a forma de impulso mais crítica para cada equipamento e polaridade, levando em consideração o valor inferior do intervalo de confiança.

Tabela 17 – Formas de impulso mais críticas para os equipamentos da classe 15,0 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].

Equipamento	Polaridade	$U_{50\%}$ (kV)	Erro (-) (kV)	Erro (+) (kV)	Forma de Impulso (μ s)
Chave Seccionadora	Pos.	109,6	2,6	9,2	1,2 x 50
	Neg.	141,9	1,5	1,5	5 x 50
Chave Fusível	Pos.	126,3	3,8	4,1	1,2 x 50
	Neg.	121,0	6,0	12,4	1,2 x 50
Isolador Pino	Pos.	113,9	8,2	5,7	5 x 50
	Neg.	138,8	6,5	4,9	3 x 16
Isolador Pilar	Pos.	131,9	3,8	5,1	1,2 x 50
	Neg.	217,5	14,2	4,7	0,5 x 20

Nota-se, através da Tabela 17, que dos oito casos mais críticos, seis são relacionados com as formas que apresentam o valor da cauda padronizado (50 μ s). Neste caso, metade dos resultados mais críticos são observados para a forma de impulso padrão e dois para a forma 5 x 50 μ s. As exceções são relacionadas aos isoladores pino e pilar na polaridade negativa, para os quais as formas de impulso críticas são a 3 x 16 μ s e a 0,5 x 20 μ s, respectivamente.

De forma geral, a forma de impulso 0,5 x 5 μ s é a menos crítica para todos os equipamentos, com algumas exceções relacionadas ao intervalo de confiança, o que indica resultados estatisticamente iguais.

4.3.2 Classe 24,2 kV

Do mesmo modo que o apresentado no subitem 4.3.1, a fim de auxiliar na comparação dos resultados, a Tabela 18 contém as distâncias de arco dos equipamentos da classe de tensão de 24,2 kV.

Na Figura 39 e na Figura 40 são apresentadas as tensões $U_{50\%}$ para as polaridades positiva e negativa, respectivamente, da chave seccionadora, chave fusível e isoladores do tipo pino e pilar, na classe 24,2 kV.

Tabela 18 – Distâncias de arco para os equipamentos da classe 24,2 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].

Equipamento	Chave Seccionadora	Chave Fusível	Isolador Pino	Isolador Pilar
Distância de arco (da) (cm)	20,0	20,5	19,0	20,0

Primeiramente, nota-se um padrão de comportamento semelhante ao observado para a classe 15,0 kV. Comparando a Figura 39 e a Figura 40, repara-se que o comportamento dielétrico dos isoladores de porcelana de ambos os tipos é semelhante ao apresentado pela chave seccionadora, sendo a polaridade positiva mais crítica para a isolação dos equipamentos.

Em geral, a faixa de suportabilidade dielétrica envolvendo todos os equipamentos está contida aproximadamente entre 125 kV e 219 kV para a polaridade positiva e 140 kV e 260 kV para a polaridade negativa.

Avaliando a Figura 39, se a ocorrência de uma descarga atmosférica causar um o surto de polaridade positiva, verifica-se nos resultados para a classe 24,2 kV que a chave seccionadora e o isolador do tipo pino apresentam-se como os equipamentos mais críticos. De fato, em certas formas de impulso há uma alternância de equipamento crítico. Porém, para outras formas os resultados são estatisticamente iguais.

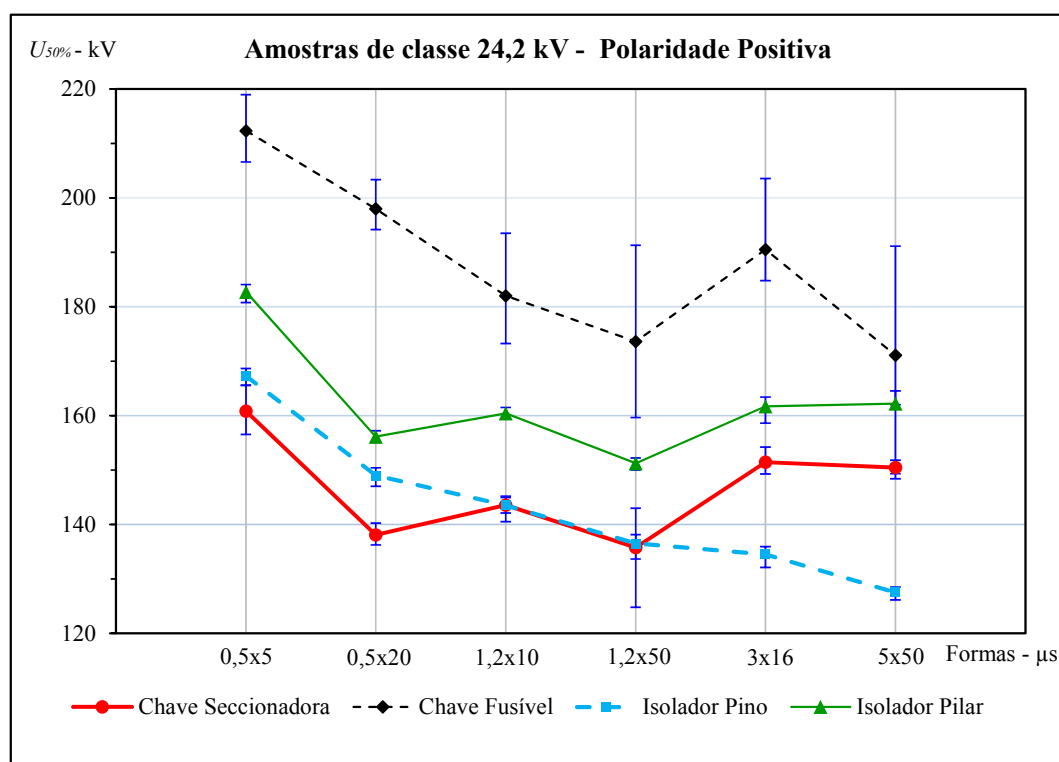


Figura 39 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 24,2 kV na polaridade positiva. Fonte: O autor (2017) e [7].

Por outro lado, o equipamento com melhor desempenho dielétrico para a polaridade positiva é a chave fusível, a qual, segundo a Tabela 18, apresenta a maior distância de arco (20,5 cm). De forma contrária, este equipamento é o mais crítico considerando a polaridade negativa, Figura 40.

Do mesmo modo que o observado para a rede de classe 15,0 kV, o desempenho dielétrico frente a impulsos de tensão do isolador do tipo pilar de classe 24,2 kV é melhor se comparado aos demais equipamentos.

Outro fato observado é que a chave seccionadora apresenta a mesma distância de arco do isolador do tipo pilar, entretanto, seu desempenho dielétrico é menor, ou seja, o arranjo desse equipamento influencia de modo a reduzir sua suportabilidade dielétrica.

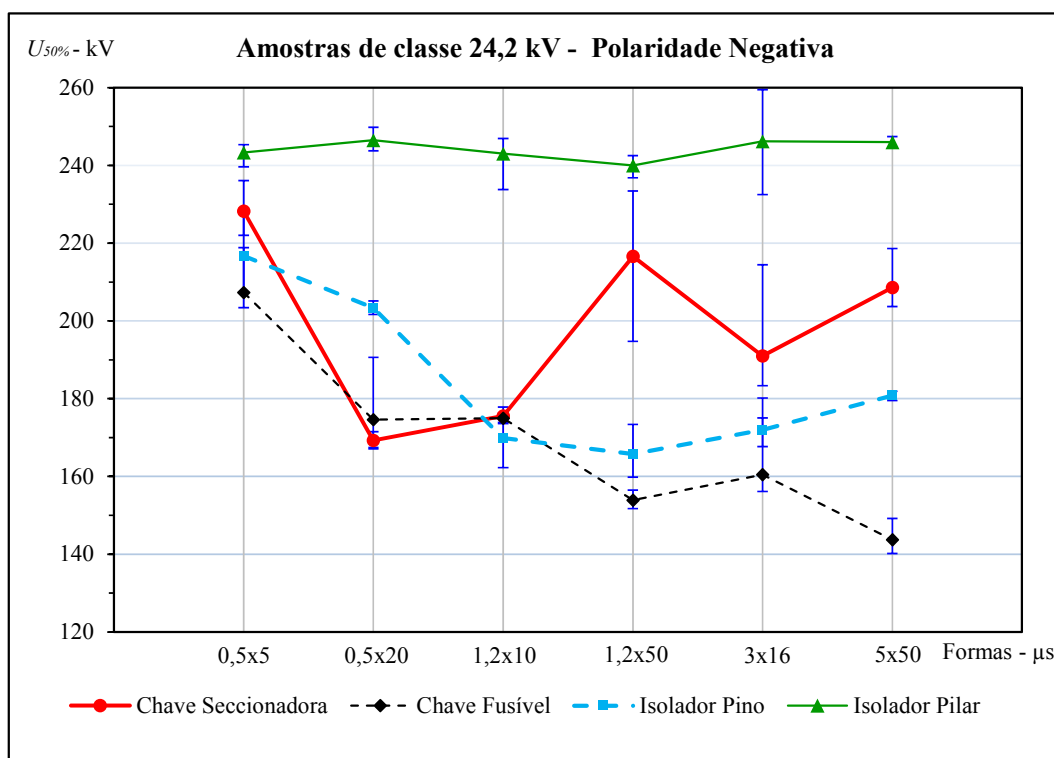


Figura 40 – Comparação das tensões $U_{50\%}$ entre os equipamentos, considerando a classe 24,2 kV na polaridade negativa. Fonte: O autor (2017) e [7].

Em relação às formas de impulso, a Tabela 19 apresenta a mais crítica para cada equipamento e polaridade, levando em consideração o intervalo de confiança.

Coincidentemente ao observado na classe 15 kV, repara-se através da Tabela 19 que dos oito casos mais críticos, seis são relacionados com as formas que apresentam o valor do tempo de cauda padronizado (50 μs). Neste caso, metade dos resultados críticos observados para a forma de impulso padrão e dois para a forma 5 x 50 μs . As exceções são relacionadas à chave seccionadora e isolador pilar na polaridade negativa, na qual as formas de impulso críticas são as 0,5 x 20 μs e 3 x 16 μs , respectivamente.

De forma geral, o desempenho dielétrico das amostras é melhor quando elas são solicitadas pela forma de impulso 0,5 x 5 μs , com algumas exceções relacionadas ao intervalo de confiança, as quais indicam resultados estatisticamente iguais.

Tabela 19 – Formas de impulso mais críticas para os equipamentos da classe 24,2 kV. Fonte: O autor (2017) e [7].

Equipamento	Polariade	$U_{50\%}$ (kV)	Erro (-) (kV)	Erro (+) (kV)	Forma de Impulso (μs)
Chave Seccionadora	Pos.	135,73	2,09	2,40	1,2 x 50
	Neg.	169,29	2,18	2,20	0,5 x 20
Chave Fusível	Pos.	171,09	22,73	20,01	5 x 50
	Neg.	143,73	3,56	5,46	5 x 50
Isolador Pino	Pos.	136,50	11,70	6,50	1,2 x 50
	Neg.	165,80	6,00	7,60	1,2 x 50
Isolador Pilar	Pos.	151,20	1,20	1,00	1,2 x 50
	Neg.	246,20	13,70	13,30	3 x 16

5 Conclusões

A avaliação da suportabilidade dielétrica de equipamentos da rede de distribuição de energia elétrica frente a formas de impulso não padronizadas é importante, visto que surtos de tensão induzidos na rede podem apresentar amplitude suficiente para causar falhas dielétricas em equipamentos. Estas falhas podem resultar em desligamentos indevidos e danos para a concessionária de energia e consumidor.

Os parâmetros obtidos e avaliados neste trabalho objetivam auxiliar os estudos de coordenação de isolamento de redes de distribuição, uma vez que avaliam o comportamento da isolação auto-recuperante dos equipamentos comumente utilizados na rede, quando submetidos a surtos de tensão não padronizados. Considerando uma representação direta da isolação, pode-se utilizar os parâmetros tensão $U_{50\%}$ e *Curva Vxt*. Porém, para uma representação completa do fenômeno da disrupção através do modelo do efeito disruptivo, estes parâmetros representam a base para realização da modelagem [8].

Para as concessionárias de energia elétrica, o conhecimento do nível real de isolamento dos equipamentos instalados na rede, permite estimar a taxa de desligamentos causada por sobretensões induzidas devido às descargas atmosféricas indiretas.

De maneira geral, a análise dos resultados indica que os ensaios dielétricos de impulso atmosférico nas chaves seccionadoras e chaves fusíveis são mais críticos quando realizados com a forma de impulso padrão, se comparada com as demais formas avaliadas nesse trabalho.

Porém, levando em conta a polaridade da solicitação, verifica-se que para a chave seccionadora, a polaridade positiva é mais crítica, apresentando diferença de suportabilidade se comparada com a polaridade negativa. Este é o mesmo padrão observado para os isoladores de porcelana dos tipos pino e pilar. Portanto, a forma de impulso $1,2 \times 50 \mu s$ na polaridade positiva pode representar as demais quando se necessita ensaiar a chave seccionadora na condição mais crítica.

Por outro lado, a polaridade negativa apresenta-se como a mais crítica para a chave fusível, com uma pequena diferença entre polaridades se comparada com a chave seccionadora, ou seja, as disrupções ocorrem para valores relativamente próximos de tensão, conforme pode ser visto nas *Curvas Vxt* obtidas. Portanto, a fim de se ter o caso mais crítico para a chave fusível, pode-se utilizar a forma padrão na polaridade negativa.

A combinação do tempo de frente rápido com cauda curta, representada neste trabalho pelas formas $0,5 \times 5 \mu s$ e $0,5 \times 20 \mu s$, proporcionam um intervalo de tempo menor no qual as solicitações do impulso permanecem aplicadas na isolação. Esta combinação de fatores

contribui para a redução da probabilidade de ocorrência da disrupção para certos níveis de tensão e, conseqüentemente, um aumento no valor da tensão $U_{50\%}$ em relação à forma padrão, conforme apresentado no *Capítulo 4*.

Em relação a alteração da polaridade crítica entre as chaves seccionadoras e chaves fusíveis, tem-se como fator determinante a disposição física dos componentes que compõe estes dispositivos (isolantes e metálicos), alterando a distribuição de campo elétrico, o qual influencia na formação da descarga disruptiva.

Basicamente, a chave seccionadora apresenta comportamento dielétrico semelhante aos eletrodos ponta-plano e esfera-plano onde a não uniformidade do campo elétrico faz com que a polaridade positiva seja a mais crítica. Neste caso, as descargas disruptivas foram observadas com maior frequência no ponto onde se determinou a distância de arco.

Comportando-se de forma contrária, a chave fusível apresenta padrão dielétrico semelhante ao verificado para eletrodos ponta-ponta, haste-haste e esfera-esfera, no qual para grandes espaçamentos o campo elétrico não uniforme faz com que a polaridade negativa apresente-se como a mais crítica. Entretanto, a ocorrência das descargas disruptivas foi observada alternando-se em diversos pontos do equipamento, surgindo entre componentes metálicos de formatos distintos.

Da comparação entre os equipamentos e componentes (isoladores), separados pela classe de tensão da rede, conclui-se que, em geral, os isoladores de porcelana do tipo pilar apresentam melhor desempenho dielétrico perante os demais equipamentos. Outro fato observado em alguns casos, é que as chaves seccionadoras e as chaves fusíveis apresentam-se com piores desempenhos dielétricos, mesmo com as distâncias de arco próximas aos dos isoladores do tipo pilar. Por exemplo, na classe 24,2 kV, a chave fusível é a mais crítica na polaridade negativa. Porém, a distância de arco dessa amostra é a maior se comparada aos demais equipamentos.

Conclui-se, portanto, que além da distância de separação entre os condutores, a configuração física e arranjo geométrico dos componentes do equipamento (metálicos e isolantes) são determinantes na sua suportabilidade dielétrica. Sendo assim, cada equipamento deve ser ensaiado para que seu comportamento dielétrico seja corretamente conhecido.

5.1 Publicações na Área

Este trabalho resultou em duas publicações e apresentações em congressos internacionais. Primeiramente, foram apresentados resultados parciais das chaves

seccionadoras, publicados no *XVI ERIAC 2015 – Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ*. Do mesmo modo, no ano de 2016 foram apresentados resultados parciais das chaves fusíveis no *IEEE Electrical Insulation Conference – IEC 2016*.

- G. H. Faria, G. P. Lopes, E. T. W. Neto, M. L. B. Martinez, “*Estudo do Comportamento da Isolação de Chaves Seccionadoras de Média Tensão Frente à Ocorrência de Surtos Não Padronizados*”. CIGRÉ – XVI ERIAC, 2015.
- G. P. Lopes, G. H. Faria, E. T. W. Neto, M. L. B. Martinez, “*Lightning Withstand of Medium Voltage Cut-out Fuses Stressed by Nonstandard Impulse Shapes*”. IEEE Electrical Insulation Conference – EIC, 2016.

5.2 Trabalhos Futuros

A fim de explicar a formação da descarga elétrica nos equipamentos analisados nesse trabalho, bem como a inversão da polaridade crítica, propõe-se avaliar a distribuição do campo elétrico ao longo da isolação dos equipamentos mediante solicitação de tensão de impulso com os formatos avaliados nesse trabalho. Essa avaliação poderá ser feita através de simulações computacionais utilizando o programa COMSOL[®], que aplica o método de elementos finitos para cálculo e é capaz de indicar a distribuição do campo elétrico bem como a intensidade máxima apresentada.

Com base nessas informações é possível calcular o fator de utilização de campo elétrico, indicando sua uniformidade. Pretende-se também determinar a causa da ocorrência de descargas disruptivas em pontos distintos na chave fusível, bem como avaliar a presença de barreiras dielétricas entre os condutores. Através desse estudo é possível propor modificações no arranjo do equipamento, resultando em melhorias na sua suportabilidade dielétrica.

A fim de avaliar os resultados obtidos para os equipamentos analisados nesse trabalho, outro estudo importante refere-se ao método do efeito disruptivo, que utiliza uma modelagem matemática para determinar a característica V_{xt} , tornando possível sua implementação em programas computacionais. Portanto, para trabalhos futuros também é proposto aplicar o método desenvolvido no LAT-EFEI [8].

Outro assunto de grande relevância é a avaliação da suportabilidade dielétrica frente a formas de impulso não padronizadas para isoladores poliméricos, dado a crescente utilização de redes compactas, constituídas basicamente de equipamentos com isolação polimérica de alta densidade.

Referências

- [1] O. P. Junior e I. D. A. Pinto, *Relâmpagos*, São Paulo: Brasiliense, 2008.
- [2] V. L. Coelho, *Análise do Desempenho de Redes Aéreas de Distribuição de Média Tensão Frente à Ação das Descargas Atmosféricas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [3] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 14039:2005 - Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV”, Rio de Janeiro.
- [4] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 6939:2000 - Coordenação de Isolamento - Procedimento”, Rio de Janeiro.
- [5] Relatório Final de Projeto, “Coordenação de Isolamentos em Redes de Média Tensão Com Neutros Ressonantes”, COD ANEEL: PD-0396-0033/2011, 2014.
- [6] G. P. Lopes, J. A. D. Pedro e M. L. B. Martinez, *Evaluation of CFO for Medium Voltage Insulators Submitted to Non-Standard Impulse Shapes - Experimental Results*, IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 419-423, 2013.
- [7] G. P. Lopes, *Avaliação do Comportamento Dielétrico de Isoladores de Média Tensão Frente à Sobretensões Induzidas de Origem Atmosférica*, Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- [8] G. P. Lopes, *Modelagem Estatística do Efeito Disruptivo para Isoladores de Média Tensão*, Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [9] V. Cooray, *Lightning Protection*, London: Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [10] V. A. Rakov e M. A. Umah, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, nº 3, 2006.
- [11] W. A. Fernandes, *Características dos Relâmpagos Gerados por Nuvens de Tempestades em Ambientes Sob a Influência das Queimadas em Rondônia*, Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial - INPE, São José dos Campos, 2006.
- [12] IEC - International Electrotechnical Commission, “IEC 60071-1 Insulation Coordination - Part 1: Definitions, Principles and Rules”, Suíça, 2006.
- [13] J. R. Lucas, *High Voltage Engineering*, Sri Lanka: Department of Electrical Engineering, University of Moratuwa, 2001.
- [14] S. Visacro Filho, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*, São Paulo: Artliber Ltda, 2005.

- [15] G. H. Faria, G. P. Lopes, E. T. W. Neto e M. L. B. Martinez, *Estudo do Comportamento da Isolação de Chaves Seccionadoras de Média Tensão Frente à Ocorrência de Surtos Não Padronizados*, CIGRÉ - XVI ERIAC. Argentina, Maio de 2015.
- [16] G. P. Lopes, G. H. Faria, E. T. W. Neto e M. L. B. Martinez, *Lightning Withstand of Medium Voltage Cut-out Fuses Stressed by Nonstandard Impulse Shapes*, IEEE: EIC - Electrical Insulation Conference. Canadá, Junho de 2016.
- [17] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 1999.
- [18] J. A. Soares, M. A. O. Shoroeder e S. Visacro, *Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, nº 2, Abril de 2005.
- [19] IEEE - Power Engineering Society, “IEEE Std 4-2013 Standard for High-Voltage Testing Techniques”, IEEE Power and Energy Society, Nova York, 2013.
- [20] IEC - International Electrotechnical Commission, “IEC 60060-1 High-voltage Test Techniques - Part 1: General Definitions and Test Requirements”, Suíça, 2010.
- [21] C. A. Nucci, F. Rachidi, M. V. Ianoz e C. Mazzetti, *Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 35, nº 1, Fevereiro de 1993.
- [22] C. A. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz e C. Mazzetti, *Comparison of Two Coupling Models for Lightning-Induced Overvoltage Calculations*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, nº 1, Janeiro de 1995.
- [23] C. A. Nucci, *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*, Cigré, Electra, nº 161, Agosto de 1995.
- [24] C. A. Nucci, *Lightning-induced Voltages on Overhaed Power Lines, Part II: Coupling Models for the Evaluation of Induced Voltages*, Cigré, Electra, nº 162, Outubro de 1995.
- [25] V. Cooray, *The Lightning Flash*, London: Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [26] S. Rusk, *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, 1958.
- [27] P. Chowdhuri e E. T. B. Gross, *Voltage Surges Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes*, Proceedings of IEEE, vol. 114, nº 12, Dezembro de 1967.
- [28] A. K. Agrawal, S. H. Gurbaxani e P. H. J., *Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field*, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, nº 2, Maio de 1980.

- [29] A. Piantini e J. M. Janiszewski, *Induced Voltages on Distribution Lines Due to Lightning Discharges on Nearby Metallic Structures*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, nº 5, Setembro de 1998.
- [30] J. A. d. S. Cardoso, *Ensaio de Suportabilidade Dielétrica de Diferentes Eletrodos e Espaçamentos ao Ar Livre e Dentro de Pannel Metálico Sob Impulso Atmosférico e Tensão Alternada*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [31] W. Z. J. K. E. Kuffel, *High Voltage Engineering - Fundamentals*, Toronto: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [32] C. Salles, *Correção de Umidade para Ensaio de Impulso Atmosférico em Pequenos Espaçamentos em Ar*, Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.
- [33] N. G. Trinh, *Partial Discharge XIX: Discharge in Air Part I: Physical Mechanisms*, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, nº 2, pp. 23-29, Março de 1995.
- [34] M. S. Kamarudin, N. H. Radzi, S. A. Zulkifli e R. Abd-Rahman, *Experimental Investigation on Air Breakdown under Lightning Impulses with Various Electrode Configurations*, Clean Energy and Technology (CEAT) - IEEE, Novembro de 2014.
- [35] J. H. Kwon, C. W. Seo, Y. M. Kim e K. J. Lim, *Lightning Impulse Breakdown Characteristic of Dry-Air/Silicone Rubber hybrid Insulation in Rod-Plane Electrode*, Journal of Electrical Engineering and Technology, pp. 1181-1187, 2015.
- [36] M. Darveniza e A. E. Vlastos, *The Generalized Integration Method for Predicting Impulse Volt-Time Characteristics for Non-standard Wave Shapes - A Theoretical Basis*, IEEE - Transactions on Electrical Insulation, vol. 23, nº 3, 1988.
- [37] T. Yamagiwa e J. Ozawa, *Generalization of Equal Voltage-Time Area Criterion for Estimating Voltage-Time Characteristics of Various Arrangements in SF6 Gas*, IEEE - International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1985.
- [38] A. R. Jones, *Evaluation of the Integration Method for Analysis of Nonstandard Surge Voltages. Power Apparatus and Systems, Part III*, Transactions of the AIEE American Institute of Electrical Engineers, Agosto de 1954.
- [39] T. Wen, Q. Zhang, Y. Qin, F. Tao, Y. Jia, X. Tan, H. You e T. Wang, *Influence of Voltage Polarity on Breakdown of SF6 Rod-plate Gap Under VFTO and Standard LI*, IEEE - International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Outubro de 2015.
- [40] M. G. Hogg, I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. P. Wilson, M. J. Given e T. Wang, *Electrical Breakdown of Short Non-uniform Air Gaps*, IEEE - Pulsed Power Conference (PPC), Junho de 2013.

- [41] L. Jing, W. Hua e Y. Zhonggan, *The Influence of Ions on Electrical Breakdown in Air*, IEEE - Properties and Applications of Dielectric Materials, Setembro de 1988.
- [42] Z. Qiu., J. Ruan, D. Huang e Z. Pu., *A Prediction Method for Breakdown Voltage of Typical Air Gaps Based on Electric Field Features and Support Vector Machine*, IEEE - Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, nº 4, 2015.
- [43] M. P. Pereira, *Desenvolvimento de Sistema Automático para Ensaio de Impulso de Tensão em Equipamentos Elétricos*, Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- [44] IEC - International Electrotechnical Commission, “IEC 61083-2 - Instruments and Software Used for Measurement in High-voltage and High-current Test - Part 2: Requirements for Software for Tests with Impulse Voltages and Currents”, Suíça, 2013.
- [45] E. F. Pavinatto, F. D. Lima, F. E. Spersola e M. L. Martinez, *A Software for the Statistical Analysis of the Results of Lightning Impulse Testing*, Dielectric Materials, Measurements and Applications, Setembro de 2000.
- [46] M. Shigihara e A. Piantini, *Volt-time Curves of 24 kV Porcelain Insulators under Non-Standard Impulse Waveshapes*, ICLP - International Conference on Lightning Protection, September Estoril, Portugal, 2016.
- [47] M. Shigihara, A. Piantini, M. C. E. S. Ramos, C. P. Braz, C. Mazzeti e A. Ancajima, *A Proposal for the Prediction of the Volt-Time Curves of MV Insulators Based on the Disruptive Effect Model*, XIII SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, Brasil, 2015.
- [48] K. Inthoulath e C. Banmongkol, *A Simulation of Breakdown Characteristics of Suspension Insulators under Standard Lightning Impulse Voltages*, TENCON - IEEE Region 10 Conference, Outubro de 2014.
- [49] G. Krithika e S. Usa, *V-t Characteristics Using Extended Disruptive Effect Model for Impulses of Varying Front Times*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, nº 4, 2015.

ANEXO A – Obtenção das Formas de Impulso Através do Gerador de Impulsos de Tensão do LAT-EFEI

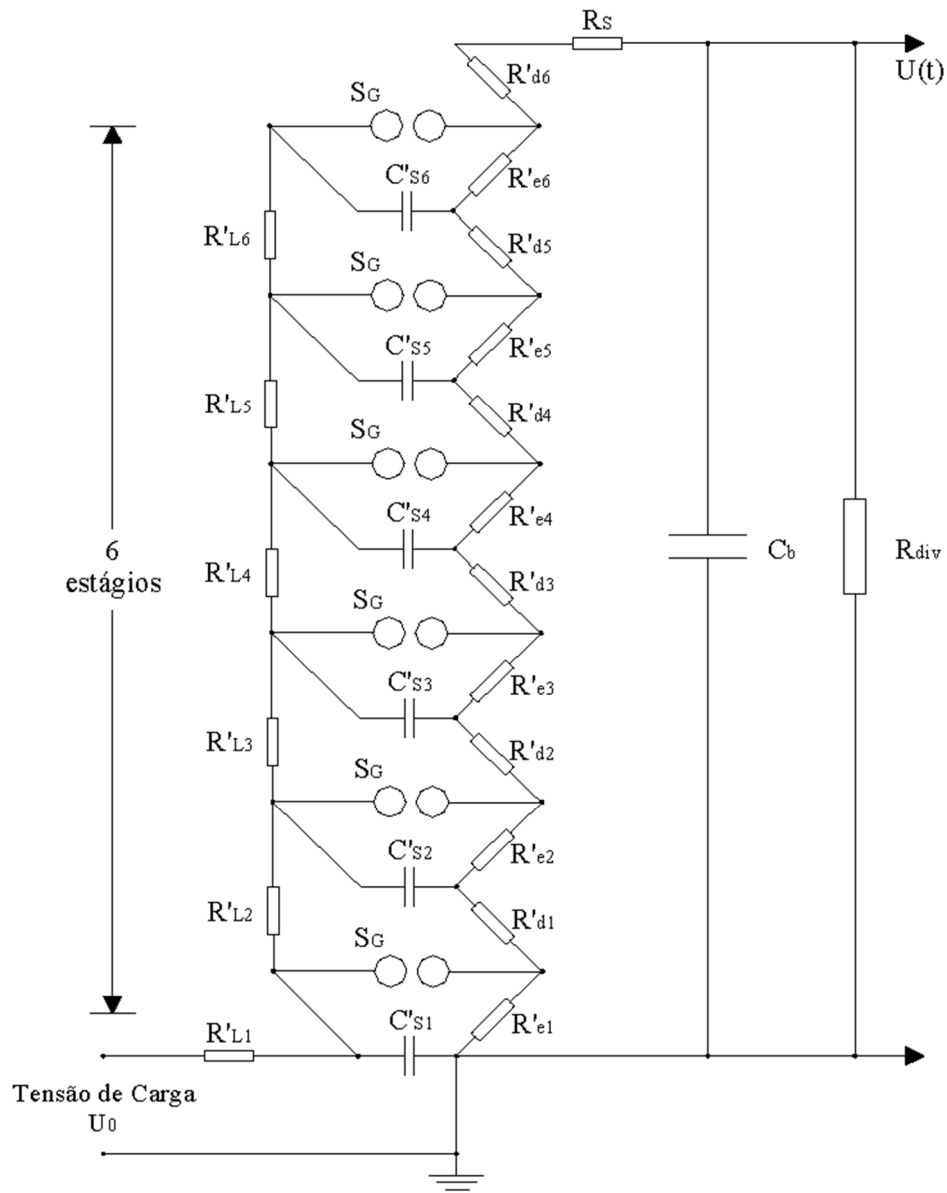


Figura 41 – Diagrama elétrico do gerador de impulsos do LAT-EFEI. Fonte: [7].

Neste caso tem-se que [7]:

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 surto;

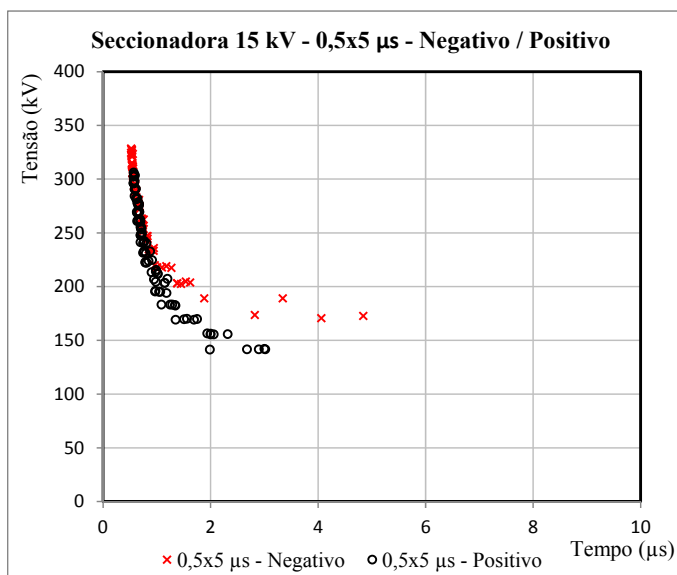
Tabela 20 – Formas de impulso utilizadas no trabalho. Fonte: Adaptado de [7].

Forma de Impulso		Resistores Utilizados			Eficiência. (%)
t_1 (μs)	t_2 (μs)	R'_d (Ω)	R'_e (Ω)	R_s (Ω)	
0,5	5,0	3 x 10, 3 x 25	6 x 100	70	88
0,5	20,0	6 x 10	6 x 400	140	90
1,2	10,0	6 x 50	6 x 150	280	79
1,2	50	3 x 10, 3 x 25	6 x 1265	350	90
3,0	16,0	6 x 350	3 x 50, 3 x 100	350	68
5,0	50,0	6 x 350	6 x 1000	140	74

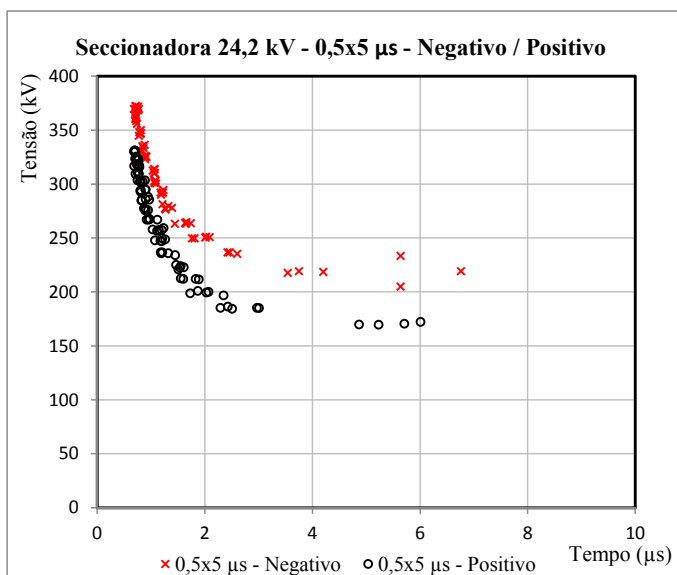
ANEXO B – Curvas Vxt Obtidas nos Ensaios.

Forma de Impulso: $0,5 \times 5 \mu s$

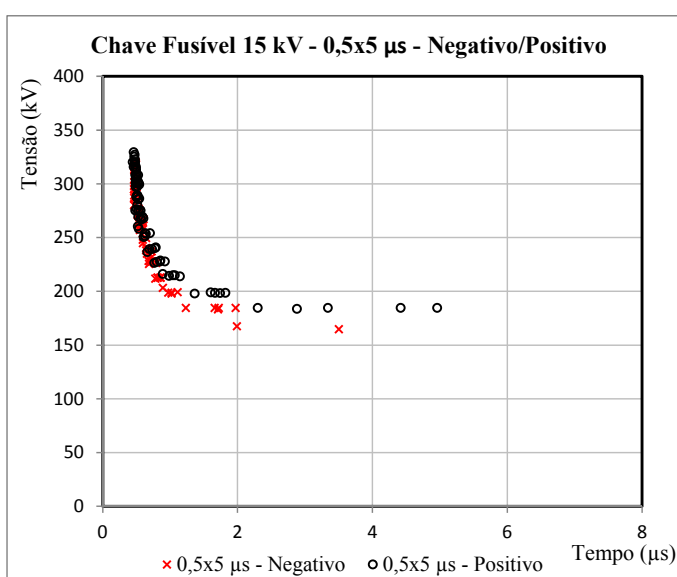
Chave Seccionadora, classe 15,0 kV



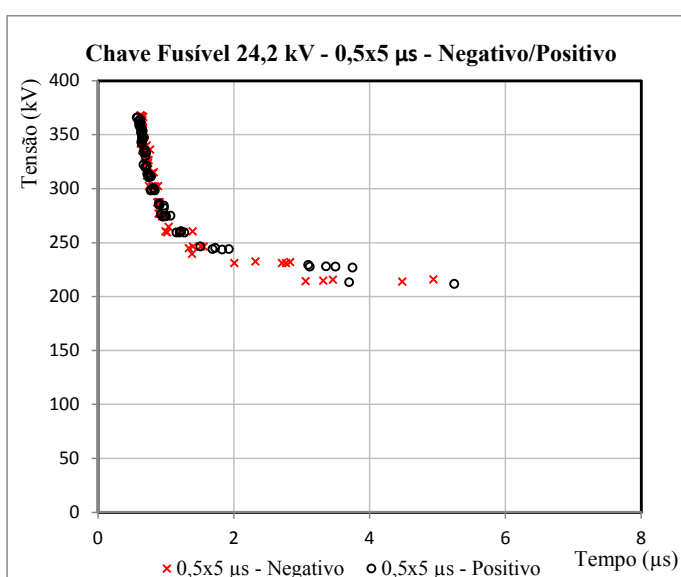
Chave Seccionadora, classe 24,2 kV



Chave Fusível, classe 15,0 kV

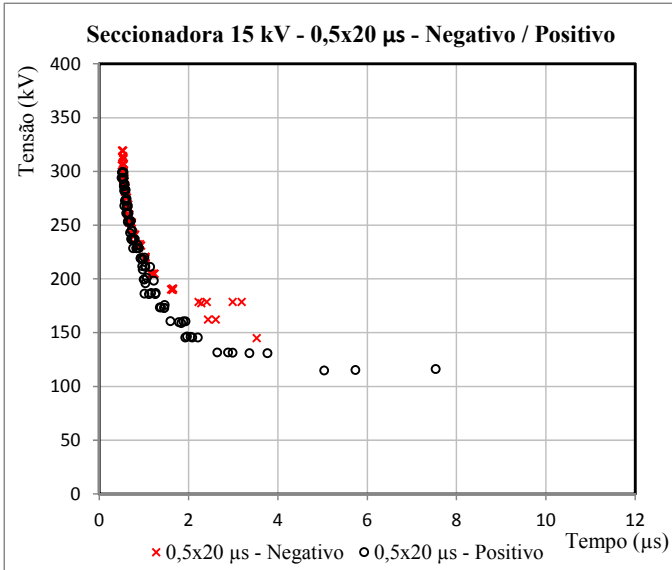


Chave Fusível, classe 24,2 kV

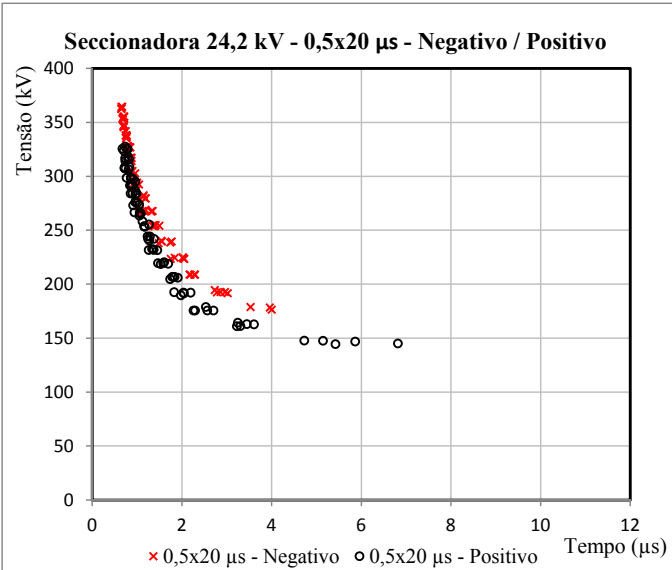


Forma de Impulso: 0,5 x 20 μ s

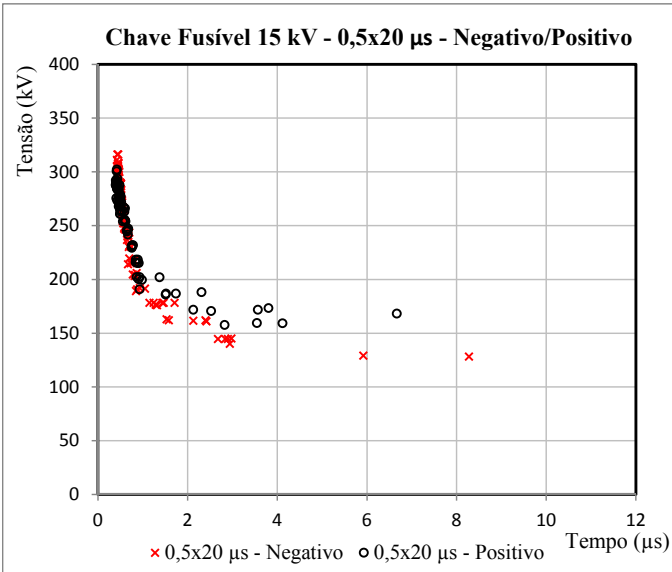
Chave Seccionadora, classe 15,0 kV



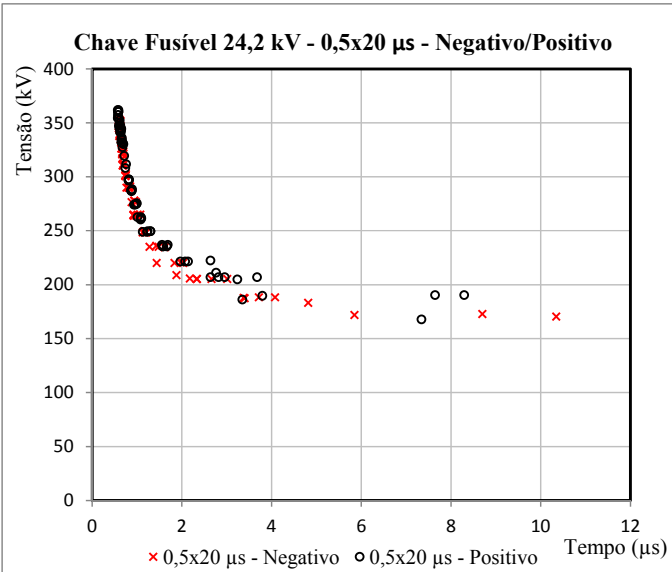
Chave Seccionadora, classe 24,2 kV



Chave Fusível, classe 15,0 kV

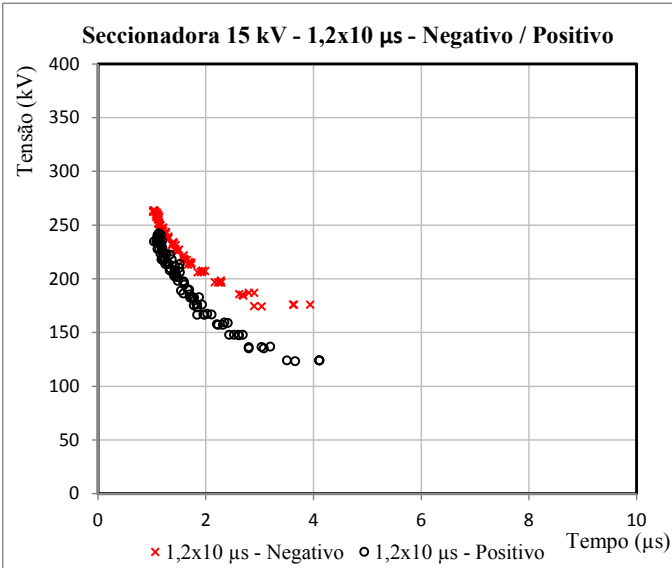


Chave Fusível, classe 24,2 kV

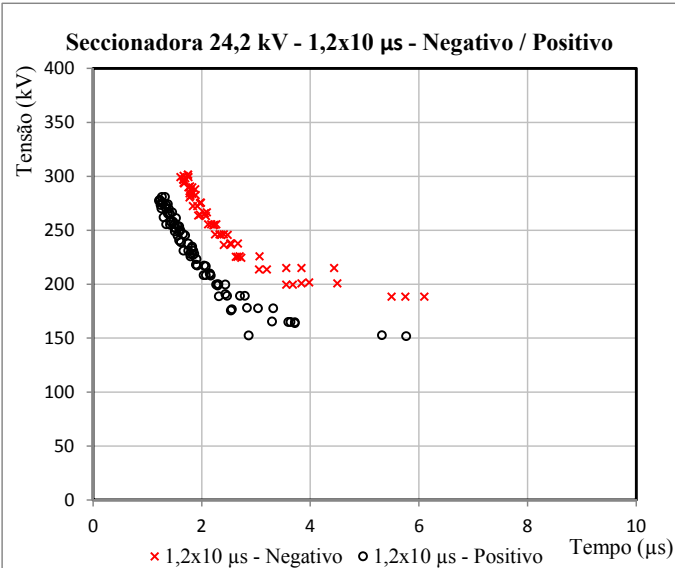


Forma de Impulso: 1,2 x 10 μ s

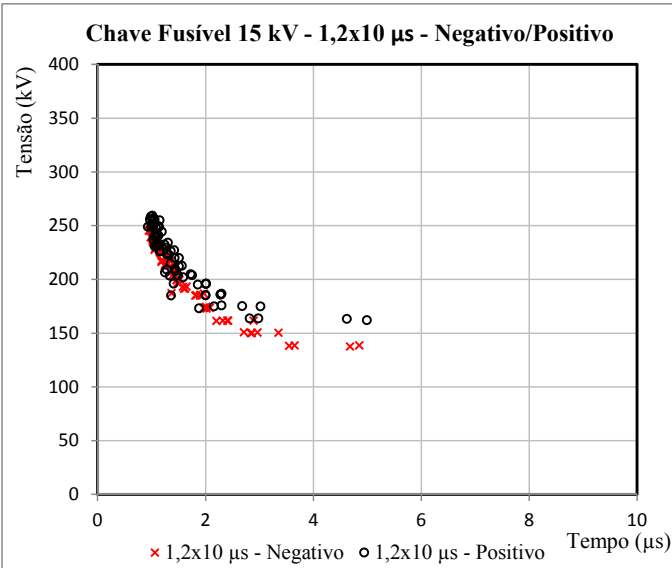
Chave Seccionadora, classe 15,0 kV



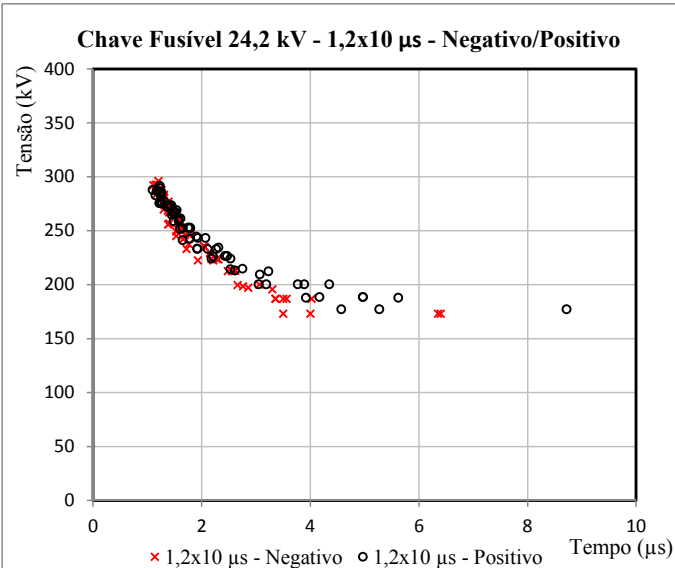
Chave Seccionadora, classe 24,2 kV



Chave Fusível, classe 15,0 kV

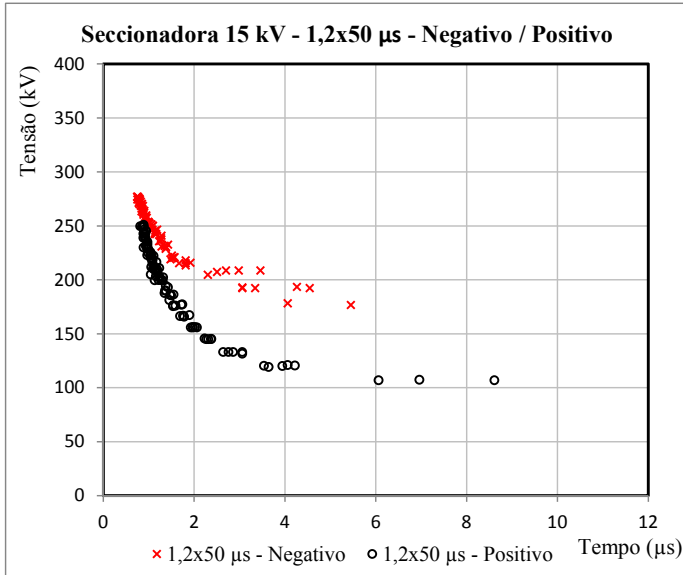


Chave Fusível, classe 24,2 kV

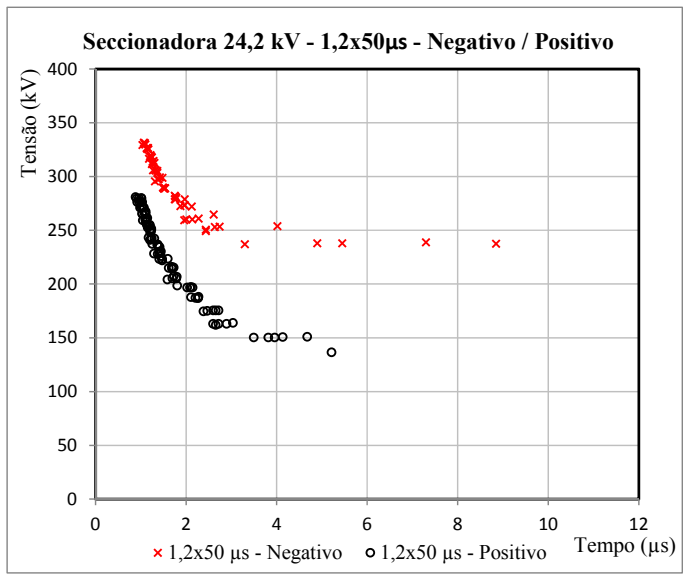


Forma de Impulso: 1,2 x 50 μ s

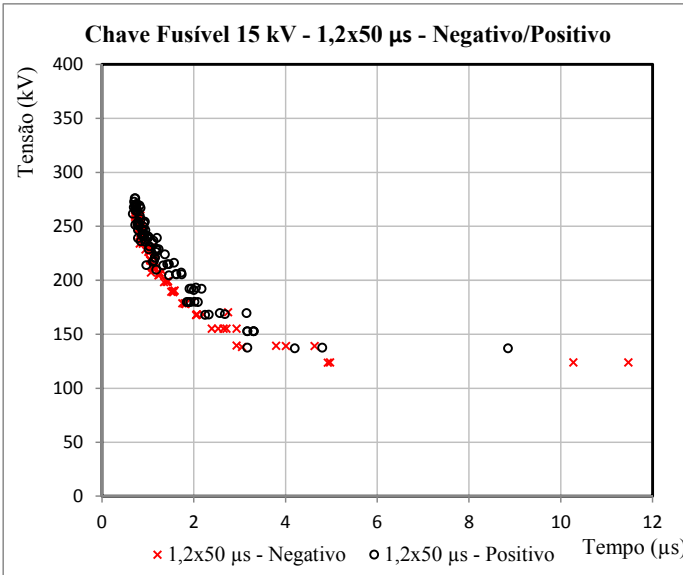
Chave Seccionadora, classe 15,0 kV



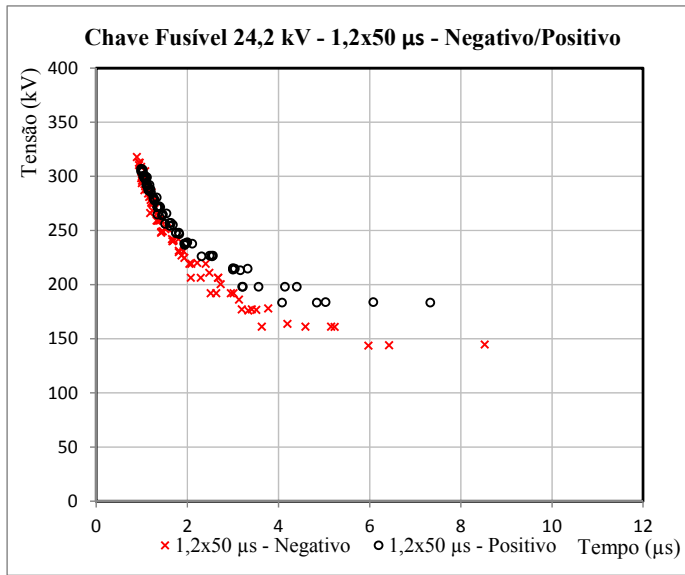
Chave Seccionadora, classe 24,2 kV



Chave Fusível, classe 15,0 kV

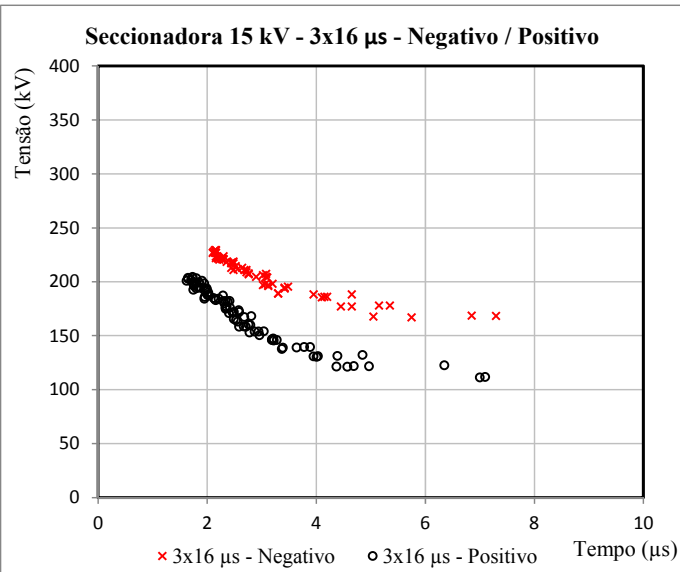


Chave Fusível, classe 24,2 kV

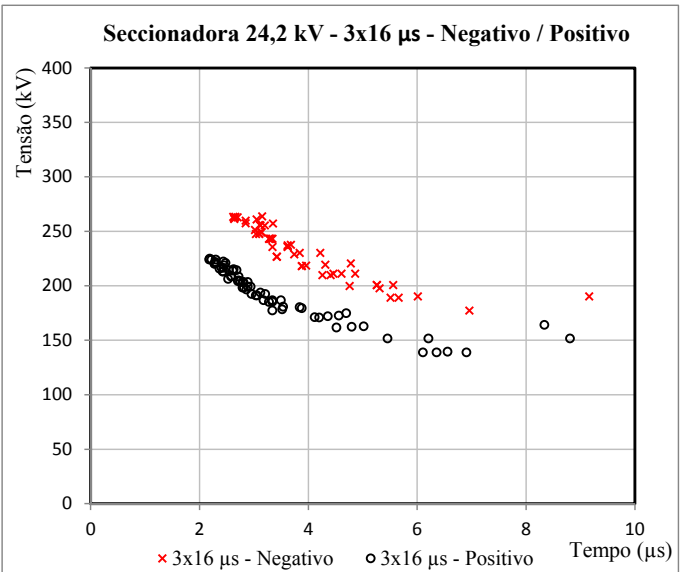


Forma de Impulso: 3 x 16 μ s

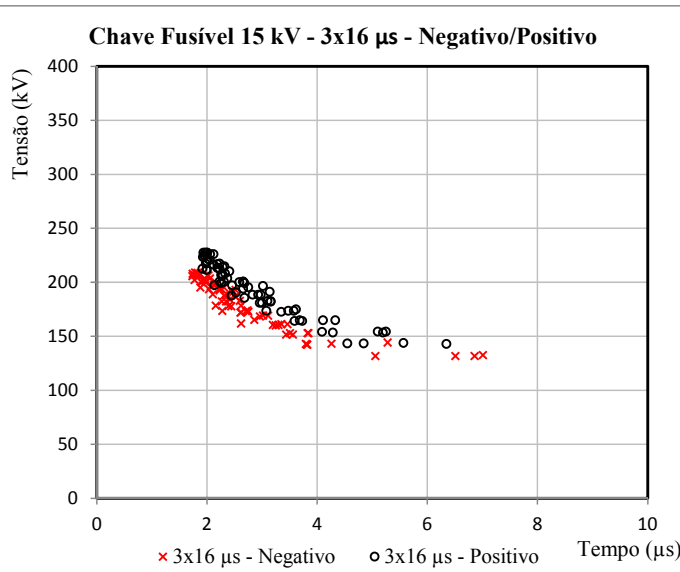
Chave Seccionadora, classe 15,0 kV



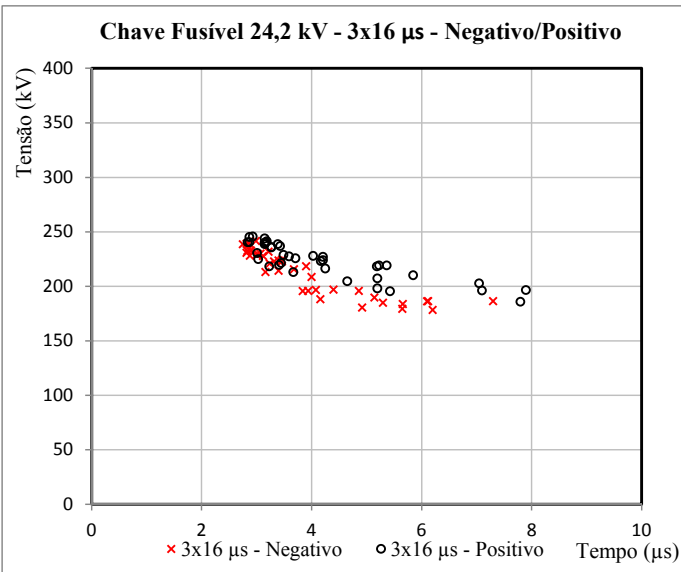
Chave Seccionadora, classe 24,2 kV



Chave Fusível, classe 15,0 kV

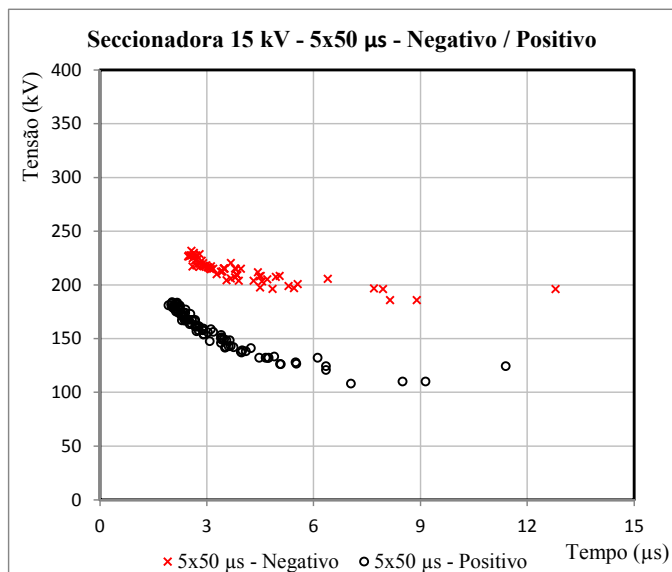


Chave Fusível, classe 24,2 kV

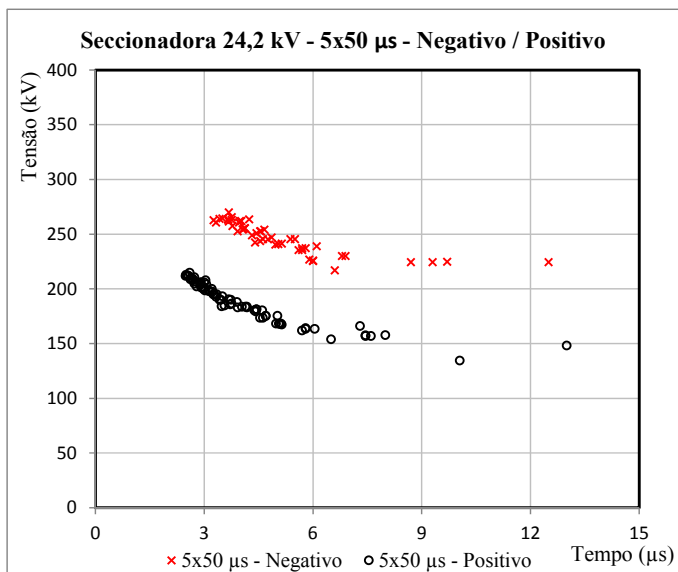


Forma de Impulso: 5 x 50 μ s

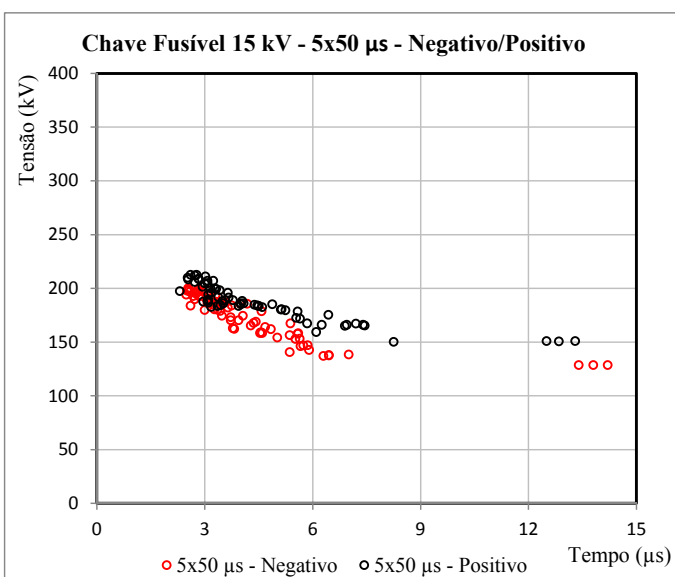
Chave Seccionadora, classe 15,0 kV



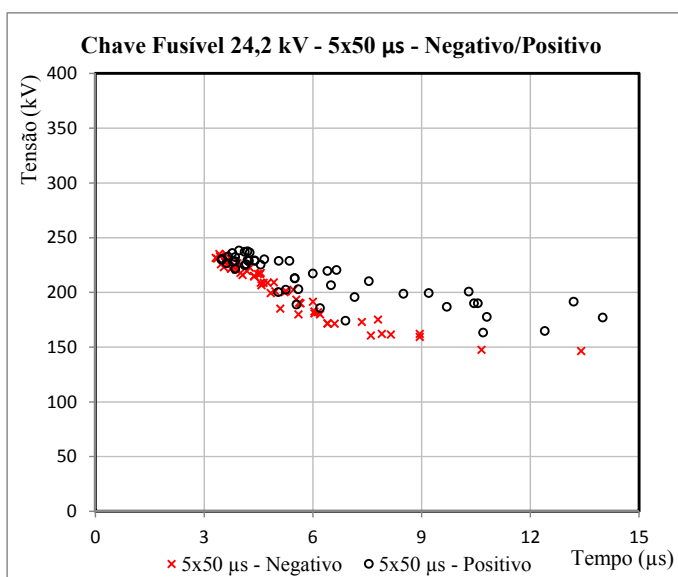
Chave Seccionadora, classe 24,2 kV



Chave Fusível, classe 15,0 kV



Chave Fusível, classe 24,2 kV



ANEXO C – Tensões $U_{50\%}$ para os Isoladores Pino e Pilar.

A Tabela 21 até a Tabela 24 apresentam as tensões $U_{50\%}$ obtidas por *Lopes*, referência [7]. Esses resultados foram utilizados no *Capítulo 4* com a finalidade de comparação.

Tabela 21 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pino, classe 15,0 kV. Fonte: Adaptado de [7].

Forma de Impulso		Isolador Tipo Pino 15,0 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	150,4	30,1	149,6	151,3	178,3	29,3	172,9	181,9
0,5	20,0	133,1	15,1	130,6	134,6	158,4	14,9	157,6	159,1
1,2	10,0	119,6	3,5	118,1	120,9	150,0	8,8	145,8	153,0
1,2	50,0	115,6	-	114,4	117,1	137,9	-	136,2	139,3
3,0	16,0	114,1	-1,3	112,8	116,1	138,8	0,7	132,3	143,7
5,0	50,0	113,9	-1,5	105,7	119,6	135,9	-1,5	133,7	138,5

Tabela 22 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pino, classe 24,2 kV. Fonte: Adaptado de [7].

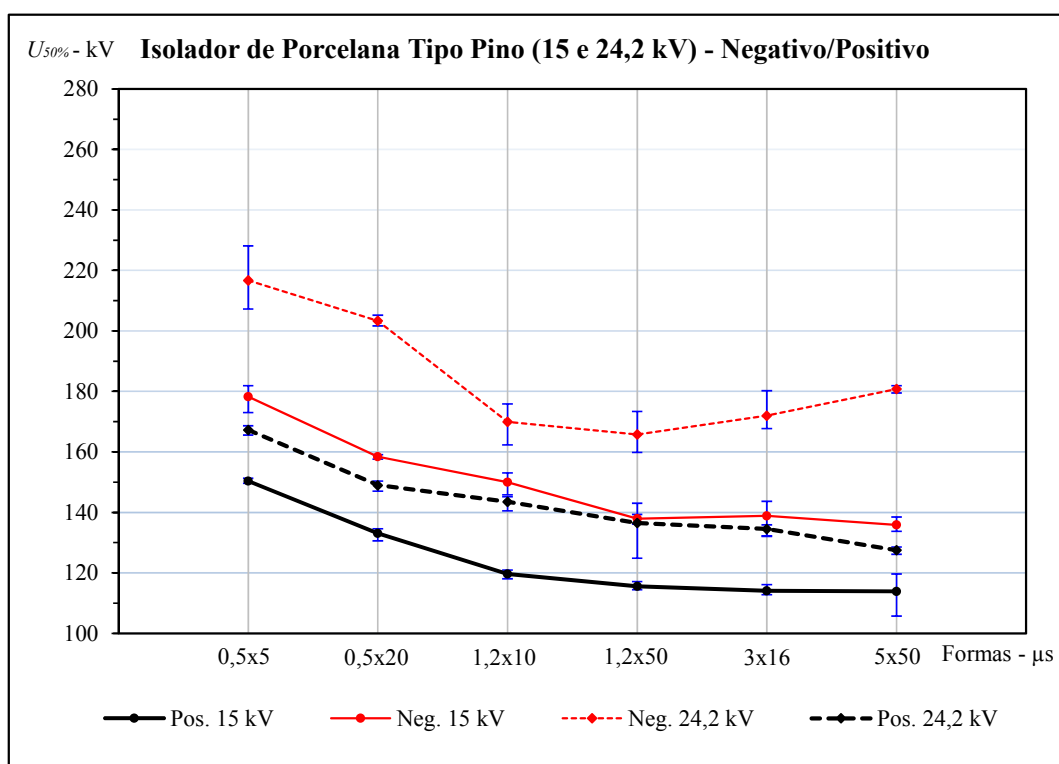
Forma de Impulso		Isolador Tipo Pino 24,2 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	167,3	22,5	165,6	165,9	216,7	30,7	207,2	228,1
0,5	20,0	149,0	9,1	147,0	150,4	203,4	22,6	201,7	205,6
1,2	10,0	143,5	5,1	140,5	145,2	169,9	2,5	162,3	175,9
1,2	50,0	136,5	-	124,8	143,0	165,8	-	159,8	173,4
3,0	16,0	134,5	-1,5	132,1	135,9	172,0	3,7	167,7	180,2
5,0	50,0	127,5	-6,6	126,1	128,5	180,8	9,0	179,5	181,9

Tabela 23 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pilar, classe 15,0 kV. Fonte: Adaptado de [7].

Forma de Impulso		Isolador Tipo Pilar 15,0 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	158,2	19,9	152,5	165,8	217,7	2,4	215,9	219,6
0,5	20,0	135,5	2,7	134,5	136,6	217,5	2,4	203,3	222,2
1,2	10,0	132,3	0,3	131,2	133,7	218,7	2,9	215,6	220,5
1,2	50,0	131,9	-	128,1	137,0	212,5	-	210,8	214,3
3,0	16,0	135,4	2,7	130,1	150,5	220,2	3,6	219,2	221,1
5,0	50,0	137,0	3,9	136,5	137,4	212,4	0,0	211,9	212,9

Tabela 24 –Tensões $U_{50\%}$: Isolador tipo pilar, classe 24,2 kV. Fonte: Adaptado de [7].

Forma de Impulso		Isolador Tipo Pilar 24,2 kV							
		Positivo				Negativo			
t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)		$U_{50\%}$ (kV)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	Intervalo de confiança – (kV)	
0,5	5,0	182,7	20,9	180,7	184,0	243,3	1,4	239,6	245,3
0,5	20,0	156,1	3,2	155,1	157,2	246,5	2,7	243,7	249,8
1,2	10,0	160,4	6,1	159,4	161,5	243,0	1,3	233,8	246,9
1,2	50,0	151,2	-	150,0	152,2	240,0	-	236,8	242,5
3,0	16,0	161,7	6,9	158,6	163,4	246,2	2,6	232,5	259,5
5,0	50,0	162,2	7,3	162,0	164,5	246,0	2,5	244,5	247,4

Figura 42 – Tensões $U_{50\%}$ dos isoladores de porcelana do tipo pino de classes 15 e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul. Fonte: Adaptado de [7].

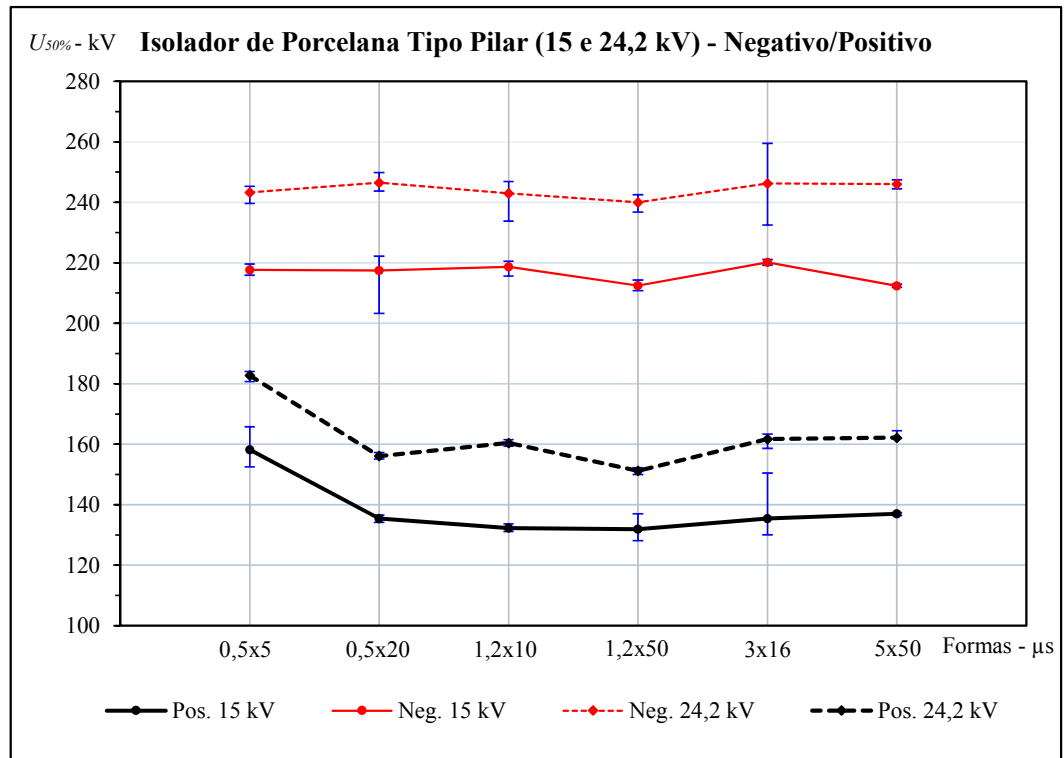


Figura 43 – Tensões $U_{50\%}$ dos isoladores de porcelana do tipo pilar de classes 15 e 24,2 kV, com seus respectivos intervalos de confiança em azul. Fonte: Adaptado de [7].