

Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica



Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

ARTHUR FRANCISCO ANDRADE

METODOLOGIA PARA PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO
DE MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO
EMPREGANDO TÉCNICAS ESTATÍSTICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Alta Tensão

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

ARTHUR FRANCISCO ANDRADE

METODOLOGIA PARA PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO
DE MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO
EMPREGANDO TÉCNICAS ESTATÍSTICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Alta Tensão

Aprovado em: / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Aquele que criou todas as coisas e nos mantém com vida.

A minha família, em especial a meus pais Anacleto e Dilza, que sempre fizeram todo o possível para me fornecer o apoio e auxílio que me permitiram chegar a esta etapa da vida.

A minha irmã Ângela, pelo incentivo e encorajamento.

Agradeço a meu orientador, o professor Edson Guedes da Costa, pela amizade, paciência e ensinamentos fornecidos durante a graduação.

Aos colegas de curso Harrison, Helem, Luís Alberto, Saul, Thainá e aos amigos do grupo Engenharia Elétrica, pelo companheirismo e amizade.

Aos técnicos do Laboratório de Alta Tensão, em especial a Higor, pelo companheirismo, auxílio e instrução na realização das atividades experimentais, e aos alunos Antônio e Filipe, pelo suporte e instruções fornecidas.

A todos os meus professores, pelo conhecimento, motivação e inspiração que me forneceram.

Por fim, quero agradecer à esta instituição de ensino e a todos os trabalhadores do nosso país, pois, sem a contribuição deles, a realização do curso cuja conclusão é demarcada por este trabalho não seria possível.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.”

Isaac Newton

RESUMO

O desempenho de isolamentos frente a esforços elétricos de natureza impulsiva é um fator crucial à confiabilidade dos sistemas elétricos e é tema de estudos de coordenação de isolamento. Neste trabalho, foram estudados métodos estatísticos para o planejamento, execução e avaliação de medições da tensão disruptiva de isolamento. Foram realizadas simulações com o objetivo de estudar e avaliar o desempenho dos métodos de tensão constante e *Up and Down*. O efeito da variação dos parâmetros sobre a confiabilidade dos resultados foi descrito. Para os ensaios em laboratório, foi utilizado um gerador de impulso de tensão, tendo sido analisadas diferentes geometrias de eletrodos. Com os conhecimentos e técnicas adquiridos, é possível executar e avaliar resultados de testes em equipamentos com isolamento auto-regenerativo.

Palavras-chave: Alta Tensão, Coordenação de isolamento, Estatística.

ABSTRACT

The performance of insulation against electrical efforts of impulsive nature is a key factor to the reliability of the electrical systems, and theme of insulation coordination studies. In this work, statistical methods for the planning, implementation and evaluation of measurement experiments of breakdown voltage were studied. Simulations were performed in order to study and evaluate the performance of the constant-voltage method and Up and Down method. The effect of varying parameters on the reliability of the results was described. For the tests in laboratory, an impulse voltage generator was used, and spark gaps with different geometries were analyzed. With the knowledge and techniques obtained, one can perform and evaluate test results of electrical equipment with self-regenerative insulation.

Keywords: High Voltage, Insulation Coordination, Statistics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Frequência relativa em função do número de realizações do experimento.	4
Figura 2 – Distribuição normal padronizada (Wikimedia, 2016).	6
Figura 3 – Exemplos de funções de distribuição acumuladas teórica e empírica.	9
Figura 4 – Função de distribuição acumulada da intensidade de campo de ruptura (HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).	12
Figura 5 – Diagrama de um teste de múltiplos níveis (HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).	17
Figura 6 – Exemplo de gráfico obtido como resultado no método dos múltiplos níveis.	18
Figura 7 – Exemplo ilustrativo do método Up and Down (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).	20
Figura 8 – Fator de correção K_1 (KUONO e OIKAWA 1967 apud HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).	21
Figura 9 – Fator de correção K_2 (KUONO e OIKAWA 1967 apud HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).	22
Figura 10 – Forma de onda padrão para uma descarga atmosférica (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).	23
Figura 11 – Circuitos de estágio único (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).	24
Figura 12 – Diagrama do circuito simulado.	27
Figura 13 – Forma de onda do impulso de tensão obtido.	27
Figura 14 – Gerador de impulso de tensão com múltiplos estágios (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).	28
Figura 15 – Gerador de impulso de tensão.	31
Figura 16 – Transformador e retificador.	32
Figura 17 – Esferas centelhadoras.	32
Figura 18 – Saída do gerador de impulso de tensão.	33
Figura 19 – Mesa de comando do gerador.	34
Figura 20 – Forma de onda típica obtida com escala de tempo 1 $\mu\text{s}/\text{div}$	35
Figura 21 - Forma de onda típica obtida com escala de tempo 2,5 $\mu\text{s}/\text{div}$	36
Figura 22 - Forma de onda típica obtida com escala de tempo 5 $\mu\text{s}/\text{div}$	36
Figura 23 – Forma de onda cortada decorrente de ruptura.	36
Figura 24 – Impulsos das Figuras 20 a 23, antes e após filtragem.	38
Figura 25 - Espinterômetros testados. (a) Esferas maiores. (b) Esferas menores. (c) Ponta- plano. (d) Ponta-ponta.	39
Figura 26 – Centelha elétrica.	40
Figura 27 – Relação entre a tensão fornecida pela mesa de comando e o pico de tensão na saída do gerador.	47
Figura 28 – Frequência relativa de ruptura para $V_m = 41 \text{ V}$ no teste de múltiplos níveis.	48
Figura 29 – Função desempenho estimada para o arranjo esfera-esfera 1.	49
Figura 30 – Função desempenho estimada para o arranjo esfera-esfera 2.	51
Figura 31 – Função desempenho estimada para o arranjo ponta negativa – plano.	54
Figura 32 – Função desempenho estimada para o arranjo ponta positiva – plano.	55
Figura 33 – Função desempenho estimada para o arranjo ponta-ponta.	57
Figura 34 – Gráfico da f.d.p da tensão disruptiva estimada do arranjo ponta-ponta.	57
Figura 35 – Funções de densidade de probabilidade estimadas para os arranjos com ponta. .	58
Figura 36 – Funções de distribuição acumulada estimadas para os arranjos com ponta.	58
Figura 37 – Exemplos de arranjo ponta-plano (a), ponta-ponta (b) e cálculo de campo elétrico para os dois casos (c).	62
Figura 38 – Resultados da simulação do método Up and Down.	72
Figura 39 – Gráfico correspondente à linha 6 da Tabela 25.	73
Figura 40 – Gráfico correspondente à linha 7 da Tabela 30.	76
Figura 41 – Gráfico ilustrativo dos resultados da linha 6 da Tabela 33.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre valores de pico antes e após filtragem da forma de onda.	38
Tabela 2 – Variação dos parâmetros do método de múltiplos níveis.	41
Tabela 3 – Medidas de dispersão dos parâmetros obtidos.	42
Tabela 4 – Erro dos valores obtidos nas simulações do teste de múltiplos níveis.	43
Tabela 5 – Valores de desvio padrão do valor σ_{est} estimado pelo método de múltiplos níveis.	43
Tabela 6 – Medidas de dispersão dos parâmetros obtidos – Método Up and Down.	44
Tabela 7 – Erro dos valores obtidos nas simulações do método Up and Down.	44
Tabela 8 – Valores de desvio padrão do valor s^* estimado pelo método Up and Down.	44
Tabela 9 – Diagrama do método à tensão constante para o arranjo a.	48
Tabela 10 – Resultados do método à tensão constante para o arranjo a.	49
Tabela 11 – Passeio aleatório obtido com o arranjo a.	50
Tabela 12 – Resultados do método Up and Down para o arranjo a.	50
Tabela 13 – Diagrama do método à tensão constante para o arranjo b.	51
Tabela 14 – Resultados do método à tensão constante para o arranjo b.	51
Tabela 15 – Passeio aleatório obtido para o arranjo b.	51
Tabela 16 – Resultados do método Up and Down para o arranjo b.	52
Tabela 17 – Passeio aleatório obtido com o arranjo c – ponta negativa.	53
Tabela 18 – Resultados do método Up and Down para o arranjo c – ponta negativa.	53
Tabela 19 – Passeio aleatório obtido com o arranjo c – ponta positiva.	54
Tabela 20 – Resultados do método Up and Down para o arranjo c – ponta positiva.	55
Tabela 21 – Passeio aleatório obtido com o arranjo d (ponta-ponta).	56
Tabela 22 – Resultados do método <i>Up and Down</i> para o arranjo d.	56
Tabela 23 – Parâmetros físicos do ar durante as medições.	59
Tabela 24 – Resumo dos resultados experimentais.	59
Tabela 25 – Valores obtidos para $m = 3$ e $n = 20$	73
Tabela 26 – Valores obtidos para $m = 3$ e $n = 30$	74
Tabela 27 – Valores obtidos para $m = 3$ e $n = 50$	74
Tabela 28 – Valores obtidos para $m = 5$ e $n = 20$	75
Tabela 29 – Valores obtidos para $m = 5$ e $n = 30$	75
Tabela 30 – Valores obtidos para $m = 5$ e $n = 50$	76
Tabela 31 – Valores obtidos para $m = 10$ e $n = 20$	77
Tabela 32 – Valores obtidos para $m = 10$ e $n = 30$	77
Tabela 33 – Valores obtidos para $m = 10$ e $n = 50$	78
Tabela 34 – Simulações do método Up and Down com $\Delta U = 2$ kV e $n = 30$	79
Tabela 35 – Simulações do método Up and Down com $\Delta U = 4$ kV e $n = 30$	79
Tabela 36 – Simulações do método <i>Up and Down</i> com $\Delta U = 5$ kV e $n = 30$	79
Tabela 37 – Simulações do método Up and Down com $\Delta U = 6$ kV, $n = 30$	80
Tabela 38 – Simulações do método Up and Down com $\Delta U = 4$ kV, $n = 30$ e $U_0 = 88$ kV.	80
Tabela 39 – Simulações do método Up and Down com $\Delta U = 4$ kV e $n = 50$	80

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1.	PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA	3
2.1.1.	Definições de Probabilidade.....	3
2.1.2.	Funções de Probabilidade.....	5
2.1.3.	A Distribuição Normal.....	5
2.1.4.	O Modelo Binomial	6
2.1.5.	Distribuições Empíricas.....	8
2.1.6.	Medidas de Dispersão e Intervalo de Confiança	9
2.2.	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA RUPTURA EM GASES	11
2.3.	MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DISRUPTIVA.....	13
2.3.1.	Independência entre Testes.....	14
2.3.2.	Método à Tensão Constante (Métodos dos Múltiplos Níveis).....	15
2.3.3.	Método <i>Up and Down</i> (Método dos Acréscimos e Decréscimos).....	19
3.	GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO.....	23
3.1.	FORMAS DE ONDA PADRONIZADAS	23
3.2.	CIRCUITOS EMPREGADOS NA GERAÇÃO DE IMPULSO DE TENSÃO.....	24
3.2.1.	Geradores de Estágio Único	24
3.2.2.	O Gerador de Múltiplos Estágios	28
4.	SIMULAÇÕES E ENSAIOS EM LABORATÓRIO	30
4.1.	MATLAB	30
4.2.	MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO	31
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	41
5.1.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	41
5.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	45
5.3.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	46
5.3.1.	Determinação da Relação de Tensão.....	46
5.3.2.	Resultados das Medições	48
5.4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	60
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS ESTATÍSTICOS	67
	APÊNDICE B – LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS OBTIDOS DAS SIMULAÇÕES	73
	ANEXO A – DIAGRAMA DO CIRCUITO DO GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO.....	81

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Por razões técnicas e econômicas, ao longo dos anos houve uma tendência em se aumentar o valor das tensões de transmissão. (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000). Tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada, o emprego de alta tensão requer o desenvolvimento de técnicas específicas que permitam garantir a confiabilidade e continuidade do sistema elétrico. Devido ao fato da transmissão ser majoritariamente realizada por meio de linhas aéreas, linhas e equipamentos são expostos à surtos causados por descargas atmosféricas. Além disso, a realização de manobras também submete os equipamentos a sobretensões, as quais chegam a ser mais danosas que as de origem atmosférica, no caso de sistemas com tensão maior que 230 kV.

Dessa forma, torna-se necessária a realização de estudo de forma a dimensionar de forma correta a capacidade de isolamento dos diversos componentes do sistema e sua priorização: esta é a chamada coordenação de isolamento. A tensão suportável por um isolamento possui uma componente aleatória, a qual é dependente do tipo, duração e forma de onda da tensão considerada.

Neste trabalho, o aluno amplia seu escopo de pesquisa, desenvolvendo conhecimentos acerca de métodos estatísticos, processos de ruptura dielétrica e realização de experimentos de teste de isolamentos no Laboratório de Alta Tensão.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia de planejamento, execução e avaliação de resultados de medições realizadas no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, em arranjos de teste específicos.

São objetivos específicos:

- Aprender métodos estatísticos que permitam determinar a característica de desempenho de isolamento;
- Obter o valor de tensão com 50% de probabilidade de falha ($U_{50\%}$);
- Compreender o princípio de funcionamento e adquirir familiaridade com a operação do gerador de impulso de tensão;
- Avaliar a influência de diferentes geometrias dos eletrodos sobre a tensão de ruptura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA

2.1.1. Definições de Probabilidade

Um fenômeno pode ser determinístico ou aleatório. Enquanto no primeiro caso pode-se definir certas variáveis em função de outras já conhecidas, no segundo caso os resultados são ditados pelo acaso, embora possam apresentar um padrão (MEYER, 1983). Ou seja, um modelo **determinístico** é aquele que determina os resultados a partir das condições iniciais, enquanto que um modelo **aleatório** é um modelo matemático que incorpora elementos probabilísticos. Os resultados são expressos em termos de probabilidade.

No estudo de fenômenos aleatórios, é conveniente definir alguns conceitos. O conjunto de todos os resultados possíveis em um experimento é chamado de **espaço amostral**. Um **evento** é qualquer subconjunto do espaço amostral associado a um experimento.

A probabilidade de um evento pode ser definida em termos de frequência relativa. A frequência relativa f_A de um evento A é definida como a razão entre o número de vezes n_A em que o evento A ocorre e o número de repetições n do experimento. Esta definição encontra-se na Equação 1:

$$f_A = \frac{n_A}{n}. \quad (1)$$

Segue, da definição, que a frequência relativa é um número racional tal que $0 \leq f_A \leq 1$. A assim chamada definição frequentista de probabilidade estabelece que a probabilidade de ocorrência de um evento A é, portanto, definida como o limite da frequência relativa quando o número de experimentos tende a infinito, ou seja:

$$p(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_A = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n}. \quad (2)$$

A título de exemplo, é apresentada a evolução da frequência relativa de um evento A , com probabilidade de ocorrência $p_A = 0,4$, proveniente de um experimento simulado em computador. Detalhes da simulação podem ser obtidos no Apêndice A.

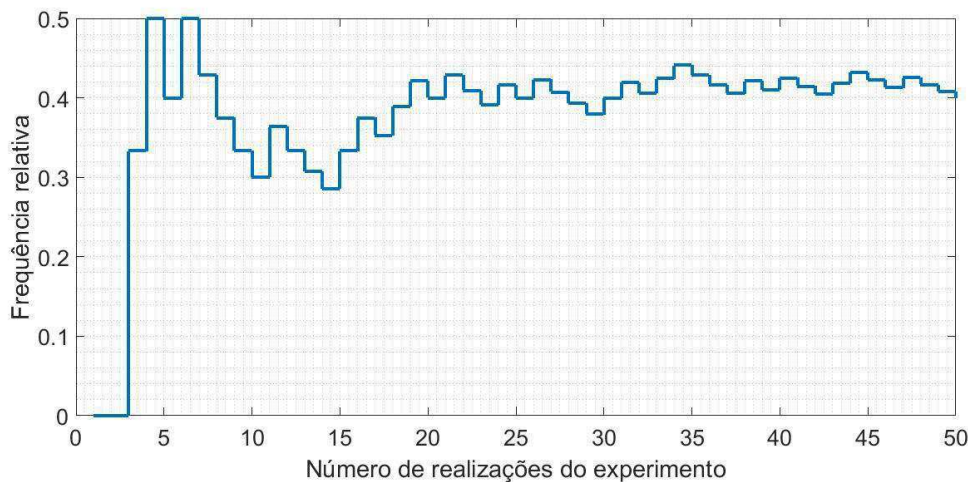


Figura 1 – Frequência relativa em função do número de realizações do experimento.

Uma inspeção do gráfico mostra que a frequência relativa converge para o valor da probabilidade de ocorrência do evento à medida que o número de execuções do experimento cresce, conforme previsto pela definição da Equação 2.

Além desta definição baseada em experimentos, existe uma definição axiomática, isto é, uma caracterização do conceito de probabilidade com base em postulados. Seja o evento E pertencente ao espaço amostral S , e a função P uma medida de probabilidade do conjunto. Então a definição axiomática de probabilidade (axiomática de Kolmogorov) é expressa como:

Axioma 1: $0 \leq P(E) \leq 1$;

Axioma 2: $P(S) = 1$;

Axioma 3: $P(\cup_{i=1}^{\infty} E_i) = \sum_{i=1}^{\infty} P(E_i)$, se os eventos E_i são disjuntos.

Isto é, a probabilidade do evento E é um número real situado no intervalo entre 0 e 1, a probabilidade do espaço de resultados é unitária e a probabilidade de uma união de eventos disjuntos dois a dois é a soma das probabilidades associadas aos eventos individuais.

Uma variável cujo valor depende de um experimento aleatório é chamada de **variável aleatória**. Variáveis aleatórias podem ser classificadas em contínuas ou discretas.

2.1.2. Funções de Probabilidade

Este trabalho se concentra no estudo de variáveis aleatórias contínuas e unidimensionais. Tais variáveis podem ser caracterizadas por uma função de distribuição acumulada e uma função densidade de probabilidade.

A função de distribuição acumulada $F(x)$ da variável aleatória X (f.d.a.) é definida como $F(x) = P(X \leq x)$. Suas propriedades são:

- $F(x)$ é contínua e não decrescente;
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ e $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$.
- $\frac{dF}{dx} = f(x)$, em que $f(x)$ é a função de densidade acumulada da variável aleatória.

A função densidade de probabilidade (f.d.p) $f(x)$ é uma função que descreve a probabilidade relativa da variável assumir um dado valor. De modo a atender os critérios de probabilidade, tal função é sempre maior ou igual a zero, e sua integral na reta real tem valor unitário.

2.1.3. A Distribuição Normal

Em Estatística, modelos probabilísticos conhecidos como distribuições são utilizados na análise de diferentes fenômenos. A distribuição Normal é a mais familiar das distribuições de probabilidade. Ocorre em uma variedade de fenômenos físicos naturais, em estudos de comportamento humano, em processos industriais, etc. Também denominada distribuição gaussiana, por ter sido empregada pelo físico e matemático alemão Carl Friedrich Gauss (1777 - 1855) no estudo de dados astronômicos (MSPC, 2016).

Uma variável segue a distribuição normal se a sua função densidade de probabilidade pode ser expressa na forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

Na Equação 3, μ representa o valor médio ou esperado da variável, sendo σ o seu desvio padrão. Na Figura 2, pode ser vista o gráfico da função densidade de probabilidade de uma distribuição normal.

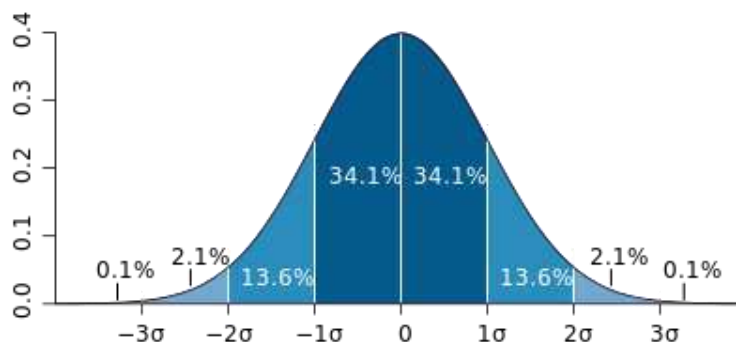


Figura 2 – Distribuição normal padronizada (Wikimedia, 2016).

A área em azul escuro está a menos de um desvio padrão (σ) da média. Em uma distribuição normal, esta região concentra cerca de 68% da probabilidade de ocorrência do evento, enquanto dois desvios padrões desde a média (azul médio e escuro) representam cerca de 95%, e três desvios padrões (azul claro, médio e escuro) cobrem cerca de 99,7%.

2.1.4. O Modelo Binomial

Alguns eventos devem ser modelados por distribuições discretas, nas quais o espaço amostral é um conjunto enumerável. A título de exemplo, será apresentada a distribuição binomial, a qual será também utilizada em seções posteriores.

Seja uma sequência de n experimentos independentes, cada um deles tendo como resultado apenas duas possibilidades, as quais são comumente chamadas de sucesso, que tem sempre probabilidade p de ocorrer, e o evento complementar (fracasso), com probabilidade de ocorrência $1 - p$. Cada um dos experimentos é chamado de ensaio de Bernoulli. Diz-se, então, que o número X de sucessos nesta sequência de n ensaios de Bernoulli é uma variável aleatória binomial: $X \sim B(n, p)$.

Assim, a probabilidade de que ocorram exatamente x sucessos é:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x} \quad (4)$$

ou ainda:

$$P(X = x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1 - p)^{n-x}. \quad (5)$$

É possível demonstrar, utilizando a Equação 5, que o valor esperado de X é:

$$E(X) = np \quad (6)$$

e a variância é

$$\text{Var}(X) = np(1 - p). \quad (7)$$

Tais resultados são intuitivos. A Equação 6 confirma que, se um evento tem probabilidade p de ocorrer, é esperado que ele ocorra aproximadamente np vezes durante n experimentos. Por exemplo, se um evento tem probabilidade de ocorrência $p = 0,5$ em um ensaio de Bernoulli e são realizados 20 ensaios, é esperado que tal evento ocorra 10 vezes ($0,5 \cdot 20$). Deve-se ressaltar, contudo, que este é o valor esperado, e não o valor que efetivamente ocorrerá.

O que se pode garantir é que, à medida que o número n de ensaios aumenta, o número de sucessos tende a se aproximar cada vez mais de np . Este fato pode ser também verificado no cálculo da razão entre desvio padrão e o valor esperado:

$$\frac{\sqrt{\text{Var}(X)}}{E(X)} = \frac{\sqrt{np(1-p)}}{np} = \frac{\sqrt{(1-p)/p}}{\sqrt{n}}. \quad (8)$$

Uma análise da Equação 8 mostra, portanto, que a relação entre desvio padrão (o qual é uma medida de dispersão dos resultados) e o valor esperado é inversamente proporcional à raiz quadrada do número de

realizações do experimento. Desse modo, ao se lançar mão de experimentos para estimar o valor da probabilidade p , é esperado que o valor obtido seja tanto mais próximo do valor real quanto maior o número n de realizações do experimento. Este princípio é empregado em Metrologia e Teorias do Desvio, conforme apresentado em Silva, W. P. e Silva C. M. D. P. S. (2011).

2.1.5. Distribuições Empíricas

Hauschild e Mosch (1992) definem funções de distribuição teóricas como aquelas obtidas de modelos matemáticos empregados para descrever fenômenos aleatórios. Há um grande número de distribuições de probabilidade matematicamente bem definidas, as quais caracterizam modelos matemáticos particulares, sendo definidas como funções de distribuição teóricas.

As distribuições teóricas são completamente caracterizadas por seus parâmetros. Por exemplo, em uma distribuição normal, o valor médio e variância são os próprios parâmetros da f.d.p. É, portanto, vantajoso descrever relações investigadas experimentalmente utilizando distribuições teóricas.

A função de distribuição empírica se baseia na realização de experimentos para a obtenção de informações probabilísticas a partir de frequências relativas. Ela existe, portanto, em uma representação tabular ou gráfica. É mais conveniente, entretanto, aproximar a distribuição empírica por uma função de distribuição teórica com parâmetros definidos, os quais são estimados a partir dos experimentos. Como, no entanto, os parâmetros são apenas estimativas, a natureza empírica da f.d.a. é retida mesmo depois da aproximação.

O gráfico da Figura 3 apresenta uma comparação entre uma função de distribuição empírica, obtida a partir de dados simulados, e a distribuição normal correspondente.

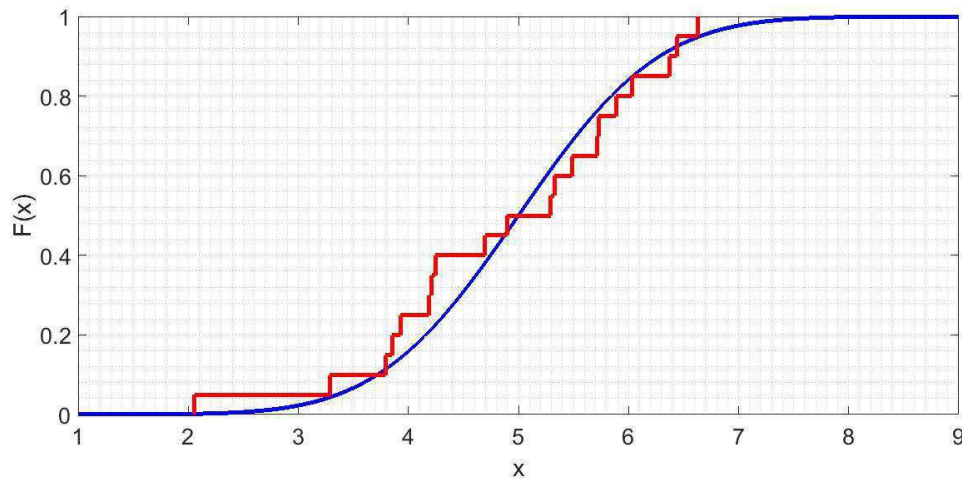


Figura 3 – Exemplos de funções de distribuição acumuladas teórica e empírica.

2.1.6. Medidas de Dispersão e Intervalo de Confiança

Uma amostra de uma população é um conjunto de dados finito x_n , o qual pode possuir um número relativamente reduzido de elementos em muitas situações práticas. As medidas de dispersão podem ser vistas como valores que fornecem as principais características estatísticas de uma amostra, sendo relacionadas com a necessidade de estimar o comportamento de uma variável e definir a probabilidade da mesma assumir determinados valores em torno do valor esperado.

A média, ou valor médio, de uma amostra é definida como:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (9)$$

A variância de uma população com N elementos é dada por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2. \quad (10)$$

A variância amostral s é definida de modo semelhante, sendo:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2. \quad (11)$$

Os respectivos valores de desvio-padrão são obtidos extraindo a raiz quadrada da variância considerada.

Nas Equações 9 a 11, $m_x = \mu$ é o valor médio da amostra ou população considerada. Equações semelhantes às Equações 9 e 10 são utilizadas para a obtenção de valores médios e da variância de variáveis aleatórias discretas. Neste caso, ao invés do número de elementos de amostra, os valores do espaço amostral são ponderados levando em conta suas probabilidades, e o valor médio é também chamado de esperança da variável aleatória, definido por:

$$E(X) \equiv \mu = \sum_{i=1}^N [x_i \cdot p(x_i)]. \quad (12)$$

A variância da variável é dada por:

$$\text{Var}(X) \equiv \sigma^2 = \sum_{i=1}^N [(x_i - \mu)^2 \cdot p(x_i)]. \quad (13)$$

De modo a indicar a magnitude relativa do desvio padrão, é utilizado o coeficiente de variação CV , o qual indica a magnitude relativa do desvio-padrão quando comparado com a média do conjunto de valores:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \text{ ou } CV = \frac{s}{\bar{x}}. \quad (14)$$

Outra medida de dispersão é a amplitude (*range*), definida como a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto de dados.

Intervalo de confiança é o intervalo estimado no qual a média da variável amostrada tem uma dada probabilidade de ocorrer. Geralmente são definidos intervalos de confiança nos quais há uma probabilidade de 95% da média verdadeira ocorrer.

2.2. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA RUPTURA EM GASES

Um dos fenômenos físicos passíveis de ser modelado como um processo estocástico é a avalanche eletrônica em gases.

Os mecanismos envolvidos na ruptura dielétrica dos gases vêm sendo estudados a pouco mais de cem anos. As principais teorias propostas são o Mecanismo de Townsend e a Teoria de *Streamer* (canal), as quais se aplicam para diferentes condições de pressão e distância entre eletrodos. Maiores detalhes destas análises podem ser obtidos em Naidu e Kamaraju (1996).

Toda avalanche eletrônica começa com um elétron inicial produzido por radiação cósmica, pela liberação de íons negativos ou por emissão do cátodo, em um processo que é geralmente dependente do tempo e magnitude do campo elétrico.

De modo a se obter dados acerca da probabilidade de um certo número de elétrons iniciais ser liberado por unidade de tempo, pode-se modelar a situação por meio de um processo estocástico de Poisson (HAUSCHILD e MOSCH, 1992).

A subsequente formação da avalanche é, por sua vez, um processo estocástico: quando um elétron inicial colide com uma molécula de gás, um elétron adicional pode ser liberado. Nesse caso, é dito que ocorreu ionização, um evento que causa um crescimento no número de elétrons livres. Por outro lado, o elétron pode ser capturado pela molécula, acarretando em diminuição do número de elétrons livres. Ainda é possível que ocorra uma colisão elástica e ele seja defletido, situação na qual a quantidade de elétrons livres se mantém constante. O número de elétrons conseqüentemente evolui em passos discretos e aleatórios, com um número relativamente pequeno de elétrons iniciais conseguindo formar uma avalanche de intensidade suficientemente alta para a ruptura dielétrica ocorrer. Segundo Hauschild e Mosch (1992), a avalanche ocorre quando é atingido um número crítico da ordem de 10^8 portadores de carga.

Na formulação matemática do problema, os coeficientes para ionização e captura de elétrons são considerados como as intensidades de um processo *birth-death*. Os coeficientes são dependentes do gás em questão e dos

parâmetros físicos, tais como temperatura, pressão, umidade, além do formato e distância dos eletrodos. Dessa forma, pode-se calcular a probabilidade do número crítico n_{crit} de elétrons ser excedido, como uma função da intensidade do campo elétrico e do número de elétrons iniciais. Uma vez que essa probabilidade pode ser considerada como a probabilidade de ruptura, sua relação com a intensidade de campo fornece uma função de distribuição da intensidade de campo de ruptura. Resultados de simulações de processos de ruptura modelados por processos estocásticos podem ser vistos na Figura 4.

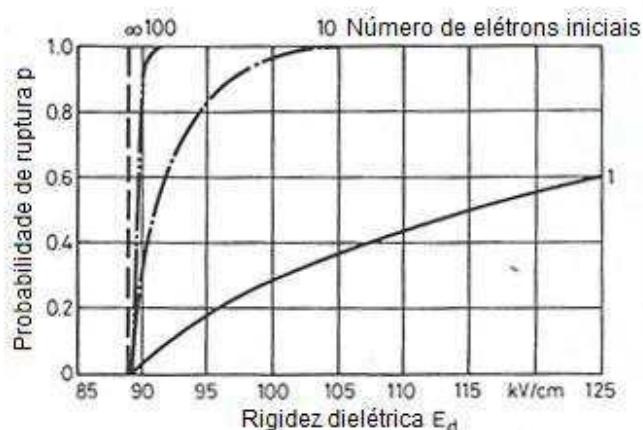


Figura 4 – Função de distribuição acumulada da intensidade de campo de ruptura (HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).

As distribuições da Figura 4 são resultados de simulações de ruptura em gás SF₆ a 100 kPa submetido a campo elétrico uniforme. É evidente, do exposto e do gráfico apresentado na Figura 4, que a aleatoriedade é perdida à medida que o número de elétrons iniciais aumenta. O processo de ionização e formação de avalanche não é instantâneo. Antes, é sabido que é necessário certo tempo para que ocorra uma ionização tal que cause ruptura. Este tempo, da ordem de microssegundos, é chamado de **tempo de atraso**.

Um isolamento é dito estar em estado normal quando se considera que há poucos elétrons iniciais presentes. No caso da aplicação de sobretensões impulsivas, o tempo em que o isolamento é submetido à sobretensão é da mesma ordem de grandeza do tempo de atraso. Isto resulta em uma pronunciada característica aleatória, ocorrendo um número limitado de colisões, após as quais, caso não tenha havido ionizações suficientes, a avalanche eletrônica não ocorre. Por outro lado, em tensão contínua, o campo elétrico causa um número de ionizações crescente, com a formação de um

grande número de elétrons iniciais. Como consequência disto, há uma diminuição do comportamento aleatório do processo.

Em suma, a ocorrência da ruptura elétrica, processo final do mecanismo da avalanche eletrônica em gases, em um isolamento submetido a uma determinada tensão é considerada um evento com uma componente aleatória intrínseca. São fatores que exercem influência sobre o processo: temperatura, densidade do gás, pressão, umidade, distância e formato dos eletrodos. A probabilidade de haver ruptura quando da aplicação de uma determinada sobretensão em um isolamento é função do tipo, duração e forma de onda da tensão a que o isolamento é submetido. A polaridade dos eletrodos também exerce influência sobre o processo de ruptura, tendo em vista que a polaridade determina a direção da avalanche eletrônica.

Assim, quando um isolamento sofre uma solicitação por esforços impulsivos, tais como descargas atmosféricas ou de manobra, se verifica que a tensão disruptiva apresenta tanto valor esperado quanto variância superiores às apresentadas pelo isolamento quando submetido à tensão alternada.

Em testes de suportabilidade de isolamento, podem ser consideradas variáveis aleatórias a tensão de ruptura e o tempo de ruptura. Assim sendo, estudos de coordenação do isolamento devem levar em conta as distribuições de tensão e tempo de ruptura para diferentes componentes.

A coordenação de isolamento envolve a determinação das sobretensões, às quais os equipamentos estarão submetidos, seguida de seleção conveniente das suportabilidades elétricas, considerando-se as características dos dispositivos de proteção disponíveis.

2.3. MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DISRUPTIVA

Para a aplicação do método estatístico de coordenação de isolamento, todas as grandezas envolvidas devem ter as suas distribuições determinadas, identificando-se a natureza, magnitudes e probabilidades de ocorrências das sobretensões e as características climáticas da região da instalação. As distribuições estatísticas são, normalmente, caracterizadas por um valor médio e um desvio padrão (COSTA, 2016, p. 81).

O quantil de 10% da tensão de ruptura, isto é, o valor de tensão $U_{10\%}$ associado com a probabilidade de ruptura $p = 0,10$ é, de acordo com os padrões atuais, definido como um valor estatístico para a tensão suportável e é adotado para a coordenação de isolamento. Este valor também é denominado de NBI (nível básico de isolamento) pelas normas ABNT NBR 6939 e IEC 60060-1. Outro valor a ser destacado é a chamada tensão crítica de descarga de isolamento ($U_{50\%}$), que é a amplitude de tensão, para uma determinada forma de onda, que apresenta uma probabilidade de 50% de provocar falha em um isolamento.

Nesta seção, são apresentados procedimentos empregados para a determinação das curvas de distribuição de probabilidade de ruptura de isolamentos.

2.3.1. Independência entre Testes

Nos métodos explicitados nas seções seguintes, um isolamento é submetido a sucessivas solicitações elétricas. No caso de arranjos com o ar atmosférico, o qual é um isolante auto-regenerativo, é necessário assegurar que a capacidade de isolamento tenha sido restaurada no caso de ocorrência da ruptura dielétrica, de forma a garantir independência entre as amostras e assegurar que as mesmas sejam obtidas com o isolamento em estado normal. Isto é garantido estabelecendo um intervalo mínimo de tempo entre medições consecutivas, o qual, segundo Hauschild e Mosch (1992), não deve ser menor que 30 s.

No caso de testes de ruptura em gases selados em recipientes fechados, por exemplo, não se pode garantir independência entre os testes individuais realizados, dado que a ionização provocada pode mudar a própria composição e características do isolante gasoso empregado.

A independência entre os resultados individuais (os eventos ruptura ou não-ruptura) de uma série consecutiva de aplicações de tensão pode ser avaliada pela verificação do comportamento dos valores obtidos com o decorrer do experimento. Se a frequência de futuros eventos é influenciada por eventos anteriores, então se pode inferir que a probabilidade de ocorrência do evento está mudando com o decorrer da série de amostras. O resultado de amostras passadas está influenciando os resultados das próximas amostras da

sequência. Em outras palavras, é esperado que a média móvel da frequência relativa não apresente variação significativa com o decorrer do teste.

2.3.2. Método à Tensão Constante (Métodos dos Múltiplos Níveis)

Aplicar repetidos impulsos de tensão com mesma amplitude constitui um problema descrito pela distribuição binomial: quantas vezes o evento 'ruptura' ocorre em uma série de n testes? A probabilidade de ruptura é então estimada como:

$$p = \frac{n_{\text{rupturas}}}{n}. \quad (15)$$

Em cada teste, há dois eventos possíveis: ruptura com probabilidade p e não-ruptura com probabilidade $1-p$.

Este procedimento geralmente é repetido para outras amplitudes de tensão, espaçadas de um passo Δu . Uma série de testes efetuada desta forma é conhecido como teste à tensão constante (*constant-voltage test*). A relação entre amplitude da tensão e a probabilidade de ruptura é chamada de “função desempenho” (*performance function*). Para uma tensão particular, tem-se o valor da função desempenho $V(u) = p$, o qual é o valor estimado para a função de distribuição acumulada da tensão disruptiva do isolamento no ponto u .

O Teste à Tensão Constante (também chamado de Método dos Múltiplos Níveis) pode ser realizado com diferentes tipos de tensão. No caso de tensão impulsiva, ele representa um método clássico para determinação da tensão de ruptura. O teste individual consiste geralmente de um impulso de tensão. Contudo, vários impulsos podem ser avaliados como um único estresse, sendo o resultado avaliado a ocorrência ou não de ruptura dielétrica durante essa série de impulsos.

No caso de tensões constantes, contínuas ou alternadas, o teste individual consiste na aplicação de tensão com uma dada amplitude durante um tempo específico. No que diz respeito aos métodos de teste normalizados, a tensão é aplicada durante um período de 1 minuto (HAUSCHILD e MOSCH, 1992).

Todas as variáveis que exercem influência sobre o teste devem ser cuidadosamente avaliadas e registradas, tais como: a característica da tensão utilizada no teste, as condições ambientais (temperatura, umidade e pressão, por exemplo) e os parâmetros dos instrumentos de medição utilizados.

Os parâmetros do teste à tensão constante, em si, são:

- Número de passos de tensão (m);
- Número de aplicações de tensão por passo (n);
- Diferença de tensão entre os valores de dois passos (Δu);
- Intervalo de tempo entre duas aplicações de tensão (Δt).

O número total de testes individuais é $z = m \cdot n$. No caso de o teste ser destrutivo ou afetar de alguma forma o desempenho da isolação, ou quando o isolamento for não regenerativo, é importante que uma nova peça-teste seja utilizada em cada um dos testes individuais. Tal exigência, contudo, geralmente não pode ser atendida para o caso de isolamentos não regenerativos.

O intervalo de tempo Δt entre as medições é dependente do tempo para montar o novo arranjo de teste, caso seja necessário, e da preparação para a nova aplicação de tensão. Durante este intervalo deve haver a recuperação do isolamento, como comentado na seção anterior, de forma a garantir independência entre os testes e assegurar que os mesmos sejam realizados com o isolamento em estado normal.

O possível número de passos de tensão é dado pelo quociente:

$$m_T = \frac{\Delta u_R}{\Delta u_P}, \quad (16)$$

no qual Δu_R representa a faixa de tensão em que as descargas ocorrem: a faixa na qual $0 < p(u_d) < 1$, ou seja, o intervalo no qual os valores da f.d.p. estão concentrados. Este intervalo pode ser obtido de modo empírico ou por meio de testes preliminares. Δu_P representa o mínimo passo de tensão que pode ser obtido com o equipamento gerador de tensão.

O número m de passos efetivamente usado ($m \leq m_T$) deve, quando possível ser maior que $m = 10$. Segundo Hauschild e Mosch (1992), $m \geq 2$ é aceitável caso se pretenda apenas obter o valor da tensão $U_{50\%}$. Para

determinar a função de desempenho de forma completa, é necessário pelo menos $m \geq 5$.

A diferença de tensão é obtida como:

$$\Delta y \cong \frac{\Delta U_R}{m}. \quad (17)$$

Em todos os m passos, a probabilidade de ruptura deve estar entre zero e a unidade, de forma que o número de rupturas k obtido em cada etapa esteja entre 1 e $n - 1$. Contudo, é importante escolher passos nos quais $p(u_d)$ esteja próxima de zero e da unidade, de forma a obter uma característica mais completa da distribuição empírica.

O número n de aplicações de tensão por passo tem um maior impacto na exatidão do resultado. Um valor mínimo de n pode ser determinado com base em regiões de confiança para probabilidades desconhecidas.

Segundo Kuffel, E., Zaengl e Kuffel, J. (2000), a vantagem do Método dos Múltiplos Níveis é que ele não pressupõe a normalidade da distribuição. Porém, o mesmo requer a realização de um número relativamente grande de testes.

O procedimento empregado pode ser visto no diagrama da Figura 5.

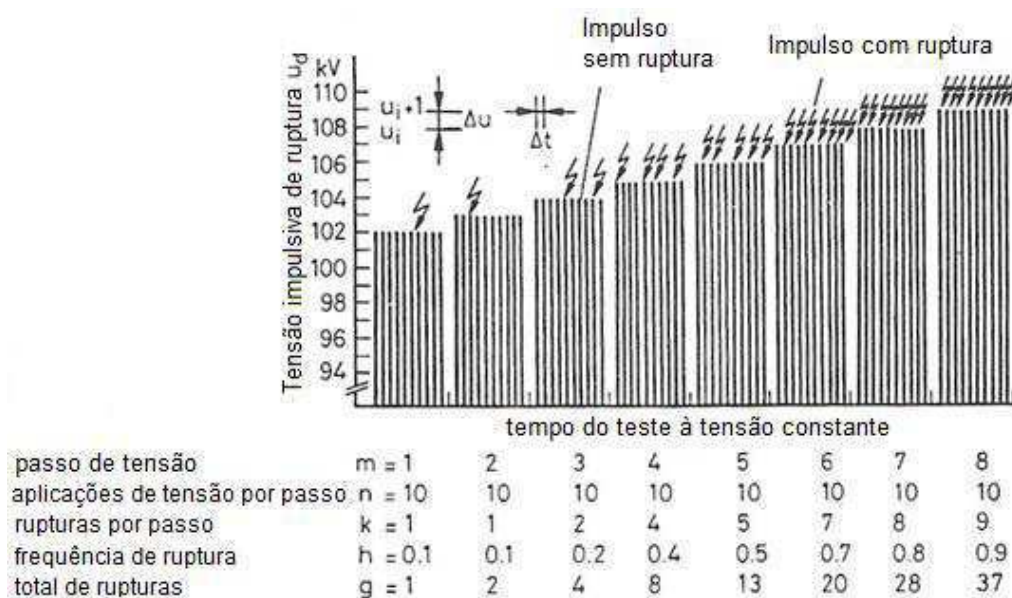


Figura 5 – Diagrama de um teste de múltiplos níveis (HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).

A aplicação do método pode ser melhor esclarecida pelo seguinte exemplo: em testes preliminares, foi verificado que um isolamento nunca sofre

ruptura com a aplicação de tensão impulsiva de pico igual a 116 kV e sempre sofre ruptura com a aplicação de tensão impulsiva com valor de pico superior a cerca 144 kV. De modo a estimar a distribuição da tensão disruptiva de impulso, foi realizado um teste de múltiplos níveis, sendo escolhida uma faixa de tensão de 20 kV situada dentro da região de ocorrência de ruptura, e um passo de tensão de 5 kV de modo que foram escolhidos os valores de tensão 120, 125, 130, 135 e 140 kV. Para cada um destes passos, foi definido um número de aplicações de tensão $n = 40$, por meio das quais foi estimada a probabilidade de ruptura para cada valor de tensão.

Um gráfico produzido para a situação exemplificada, obtido com valores simulados, pode ser visto na Figura 6. Neste gráfico, podem ser vistos os 5 níveis de tensão que tiveram probabilidade de ruptura estimada, os valores de frequência relativa calculados e a distribuição estimada por meio dos pontos obtidos.

Os parâmetros da distribuição estimada foram obtidos por meio de uma rotina de cálculo numérico que emprega o método dos mínimos quadrados, com dois graus de liberdade, para encontrar a função que melhor se adequa aos pontos obtidos. O código desenvolvido foi também utilizado para o cálculo dos parâmetros obtidos a partir das demais simulações do método e para a obtenção dos resultados estimados para as medições. O código completo, contendo simulação e cálculo de parâmetros estimados, pode ser visto no Apêndice A.

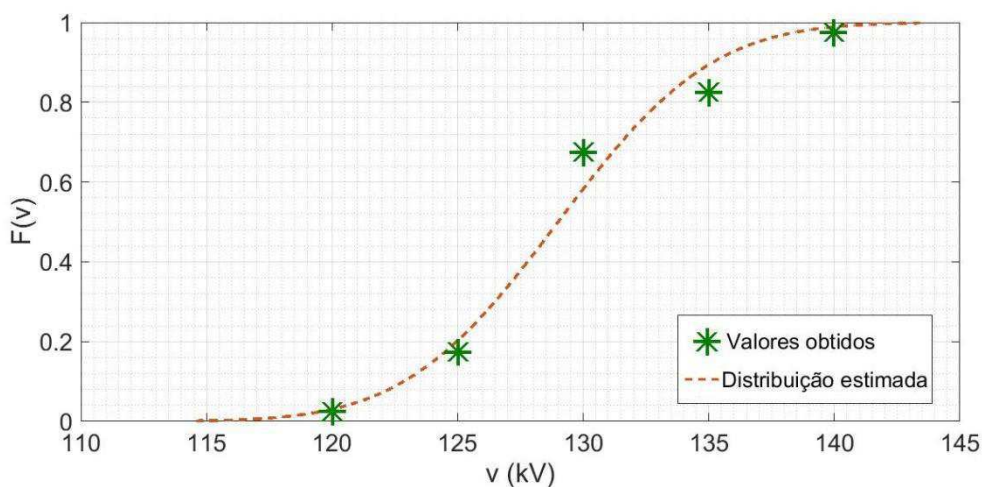


Figura 6 – Exemplo de gráfico obtido como resultado no método dos múltiplos níveis.

2.3.3. Método *Up and Down* (Método dos Acréscimos e Decréscimos)

O método *Up and Down*, proposto por Dixon e Mood (1948), fornece uma estimativa confiável da tensão de ruptura de 50% quando a tensão de ruptura é uma variável normalmente distribuída. Neste caso, o método também fornece uma estimativa para o desvio padrão.

Este método se utiliza da teoria de passeios aleatórios, e foi desenvolvido e utilizado inicialmente em ensaios dose-resposta referentes a medicamentos e toxicidade de substâncias, os quais têm sido realizados em animais, frequentemente ratos. Por razões práticas e éticas, é essencial que nestes casos sejam empregadas amostras pequenas.

O método *Up and Down* pode ser utilizado quando se deseja obter a mediana de uma distribuição, ou no caso em estudo, da tensão de ruptura $U_{50\%}$.

A execução do método é iniciada com a aplicação inicial de uma tensão u_{inicial} , para a qual é certo que não ocorre ruptura. A partir deste valor, a tensão é elevada em passos de valor Δu , até que a primeira ruptura ocorra para uma tensão u_1 . A tensão é então reduzida de Δu . Se não ocorre ruptura para este valor de tensão $u_2 = u_1 - \Delta u$, no próximo passo a tensão aplicada é elevada novamente para um valor $u_2 + \Delta u$. O processo é repetido até que um número pré-determinado de tensões, começando a contar de u_1 , é obtido.

Segundo Kuffel, E., Zaengl e Kuffel, J. (2000), o padrão IEC para a determinação de $U_{50\%}$ estabelece um mínimo de 20 aplicações de tensão no caso de isolamentos auto-regenerativos.

Para a realização da análise do método, deve ser considerado o evento E que ocorre menos vezes nos n testes. Os níveis de tensão são indexados, com o valor 0 correspondendo ao nível mais baixo no qual o evento E ocorre. O valor de $U_{50\%}$ é então estimado como:

$$U_{50\%}^* = u_0 + \Delta u \left(\frac{A}{k} \pm \frac{1}{2} \right). \quad (18)$$

Na Equação 18, u_0 é o menor valor de tensão para o qual o evento ocorre, Δu é o valor do passo de tensão e k o número de ocorrências do evento mais raro

(ruptura ou não-ruptura). Se os eventos considerados são rupturas, o sinal usado na equação é negativo. No caso de não-rupturas, é usado o sinal positivo. A constante A é obtida por:

$$A = \sum_{i=1}^r i \cdot k_i, \quad (19)$$

sendo k_i o número de eventos em questão no i -ésimo valor de tensão e r é o número de níveis de tensão alcançados, a partir de u_0 .

O desvio padrão s^* é estimado usando:

$$s^* = 1,62 \cdot \Delta u \left(\frac{kB - A^2}{k^2} + 0,029 \right), \quad (20)$$

sendo

$$B = \sum_{i=1}^r i^2 \cdot k_i. \quad (21)$$

Um diagrama ilustrativo do método pode ser visto na Figura 7.

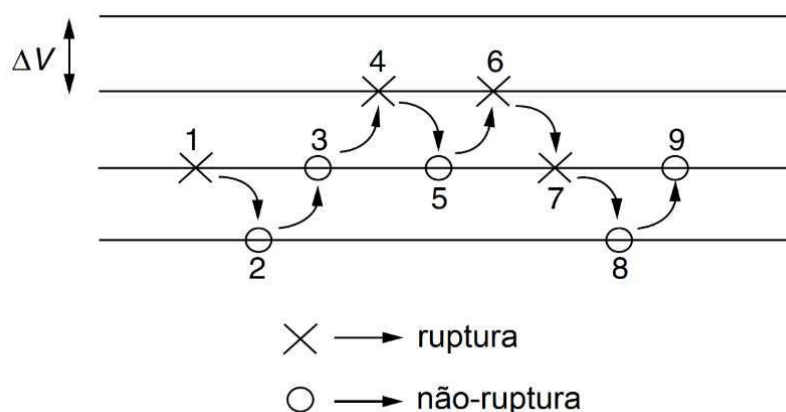


Figura 7 – Exemplo ilustrativo do método *Up and Down* (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).

Segundo Kuono, Oikawa e Kučera (1972, apud HAUSCHILD e MOSCH, 1992, p. 167), é aconselhável realizar uma correção no desvio padrão estimado com a Equação 20, por meio de um fator K_1 :

$$\sigma_{\text{est}} = K_1 s^* . \quad (22)$$

O valor de K_1 é obtido a partir do gráfico da Figura 8.

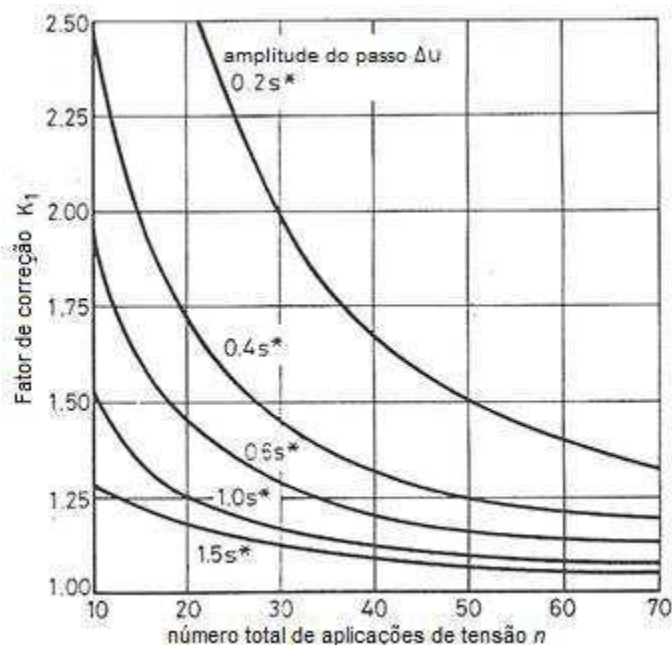


Figura 8 – Fator de correção K_1 (KUONO e OIKAWA 1967 apud HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).

Os erros na estimativa da tensão $U_{50\%}^*$ são menores, especialmente se o valor do passo Δu não for escolhido pequeno o suficiente. Uma correção pode ser feita usando:

$$U_{50\%} = U_{50\%}^* + \sigma_{\text{est}} K_2 . \quad (23)$$

A constante K_2 pode ser obtida a partir da Figura 9, a qual também fornece um valor K_3 que pode ser empregado para estimar o intervalo de confiança de $U_{50\%}$, segundo a Equação 24:

$$U_{50\%}^{(0,u)} = U_{50\%} \pm \lambda_{(1+\epsilon)/2} \sigma_{\text{est}} K_3 . \quad (24)$$

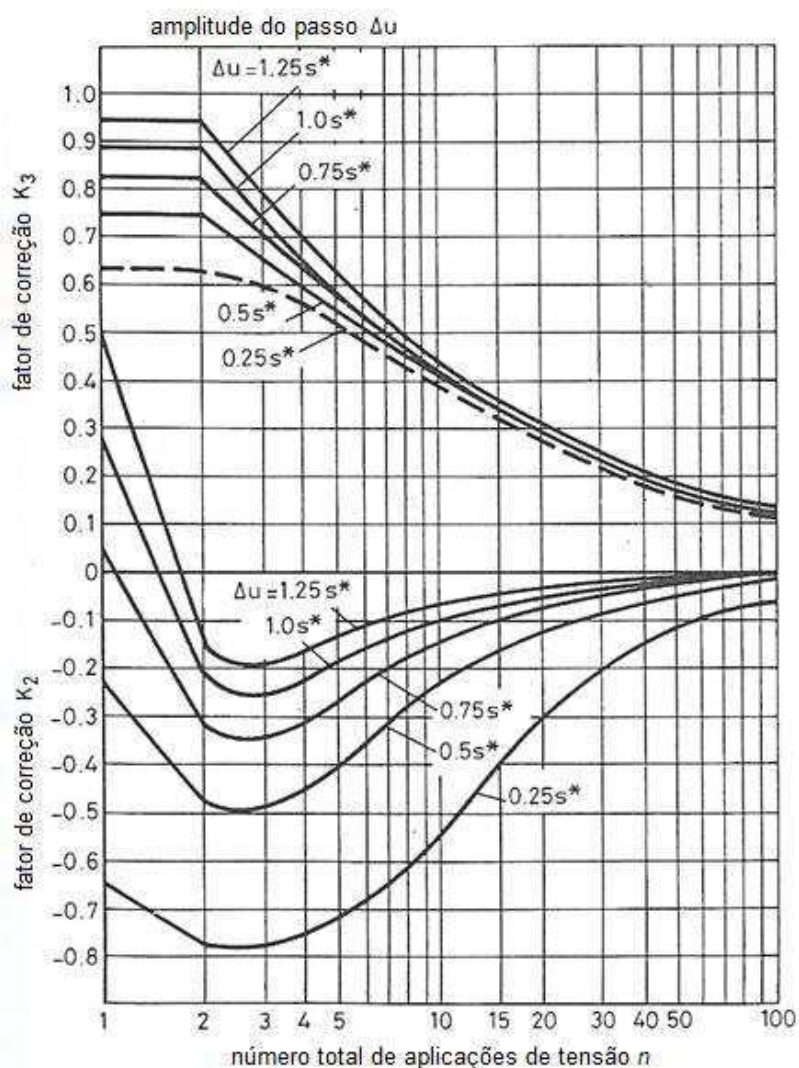


Figura 9 – Fator de correção K_2 (KUONO e OIKAWA 1967 apud HAUSCHILD e MOSCH, 1992, adaptado).

Neste capítulo, foram introduzidos conceitos de probabilidade e estatística relevantes às medições e análises realizadas no decorrer do trabalho. Uma breve explanação acerca da componente aleatória existente em fenômenos de ruptura em gases foi realizada, tendo sido apresentados métodos para a estimação da distribuição da tensão disruptiva de isolamentos submetidos a tensões impulsivas. No próximo capítulo, é abordado o princípio de funcionamento dos geradores de impulso empregados em laboratórios de alta tensão.

3. GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO

3.1. FORMAS DE ONDA PADRONIZADAS

Os sistemas elétricos estão sujeitos a fenômenos transitórios provocados por descargas atmosféricas, faltas ou manobras de equipamentos. Estudos mostraram que as sobretensões causadas por descargas atmosféricas são caracterizadas por uma frente de onda de alguns microssegundos e umas poucas dezenas de microssegundos de duração.

De forma a racionalizar a realização de testes de isolamento dos equipamentos elétricos, verificou-se a necessidade de se estabelecer padrões para as formas de onda e amplitude de tensão produzidas em ensaios. As normas IEC 60060-1 e IEC 61180-1 contém a definição de uma forma de onda padrão para a emulação de surtos atmosféricos: o impulso 1,2/50 μ s, a qual se encontra representada na Figura 10.

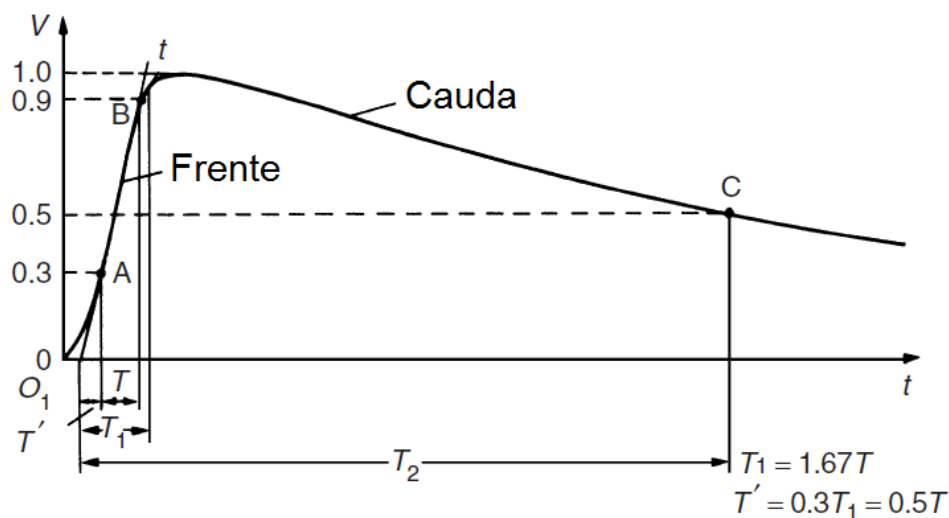


Figura 10 – Forma de onda padrão para uma descarga atmosférica (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).

Na Figura 10, T_1 é o chamado tempo de frente, sendo T_2 o tempo de cauda, no qual a tensão atinge metade do seu valor de pico. Devido a dificuldades causadas por ruído e oscilações que dificultam a medição direta das amplitude do impulso, o tempo de subida é definido como $T_1 = 1,67 \cdot (T_{0,9} -$

$T_{0,3}$), instantes em que a onda atinge 90% e 30% de seu valor de pico, respectivamente.

A norma estabelece uma tolerância de $\pm 30\%$ no valor de T_1 e de $\pm 20\%$ no valor de T_2 , de forma que formas de onda situadas dentro dessas faixas de valores possam ser admitidas como representantes de impulsos atmosféricos.

Os surtos de manobra caracterizam-se por possuir frente de onda com duração da ordem de dezenas de microssegundos, podendo ser direcionais ou oscilatórios, a depender do fenômeno. Surtos de manobra em sistemas com tensões acima de 300 kV podem produzir solicitações mais severas que os surtos atmosféricos. A forma de onda definida para os surtos de manobra é de 250/2500 μs .

3.2. CIRCUITOS EMPREGADOS NA GERAÇÃO DE IMPULSO DE TENSÃO

3.2.1. Geradores de Estágio Único

O objetivo de um circuito gerador de impulso de tensão é produzir uma tensão com amplitude controlável e forma de onda fixa. O princípio de funcionamento de circuitos comumente empregados pode ser entendido com a inspeção dos diagramas da Figura 11, os quais representam circuitos de estágio único, de acordo com Kuffel, E., Zaengl e Kuffel, J. (2000).

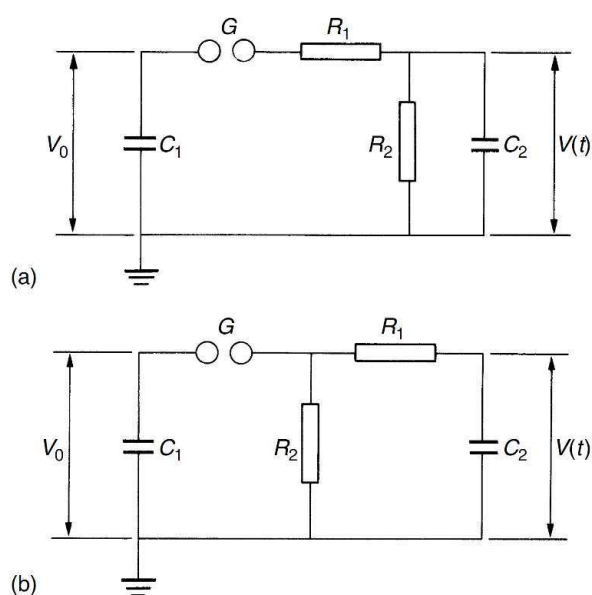


Figura 11 – Circuitos de estágio único (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).

Os circuitos da Figura 11 representam alternativas para a produção de formas de onda 1,2/50 μs . Ambos consistem de um capacitor de entrada C_1 , o qual é carregado por uma fonte CC, comumente por meio de um resistor limitador de corrente, um capacitor C_2 , o qual representa a capacitância equivalente do arranjo de teste, e resistores R_1 e R_2 , cujos valores ditam a forma de onda da tensão impulsiva.

O centelhador, representado na Figura 11 por G , tem a função de controlar a tensão de disparo do circuito, que é a tensão na qual ocorre ruptura entre seus terminais. Assim, pode-se dizer que G atua como uma chave de alta tensão, a qual é fechada quando a tensão V_0 ultrapassa um valor crítico.

Dado que R_1 é muito menor que R_2 , após o centelhamento a carga armazenada em C_1 flui quase totalmente por R_1 , elevando a tensão do isolamento de C_2 . Após isso, C_2 é descarregado via R_2 . A razão entre as resistências acarretará em que o tempo de carga seja muito menor que o de descarga, sendo então a forma desejada obtida por meio da sobreposição das formas de onda de carregamento e descarregamento.

Há que se observar que, no circuito da Figura 11a, R_1 e R_2 formam um divisor de tensão, o que não ocorre no circuito (b). Portanto a tensão $V(t)$ na saída no circuito (a) tem amplitude reduzida se comparada ao circuito da Figura 10b.

A resolução dos circuitos, seja por meio de equações diferenciais ou Transformada de Laplace, fornece a expressão para a tensão de saída $V(t)$. Para a configuração (b), segundo Kuffel, E., Zaengl e Kuffel, J. (2000), tem-se:

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (25)$$

Na Equação 25, V_0 é o valor da tensão CC com que C_1 é carregado, $k = R_1 C_2$ e os parâmetros α_1 e α_2 são definidos como se segue:

$$a = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \quad (26)$$

$$b = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}, \quad (27)$$

então:

$$\alpha_1 = \frac{a}{2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (28)$$

e

$$\alpha_2 = \frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}. \quad (29)$$

O rendimento do circuito gerador de impulso é fortemente dependente da razão entre as capacitâncias C_1 do capacitor de entrada e C_2 , da saída. Nos circuitos práticos, o capacitor C_1 é um capacitor de alta tensão destinado ao armazenamento de energia para o circuito, enquanto que C_2 é constituído pelo objeto de teste, circuito de medição e pelas capacitâncias parasitas. Assim sendo, para que o gerador apresente alto rendimento torna-se necessário que $C_1 \gg C_2$.

Sendo o rendimento definido como a razão entre o pico de tensão na saída e o valor da tensão na entrada, ou seja, $\eta = V_p/V_0$, pode-se demonstrar que, para o circuito (b):

$$\eta \simeq \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{1 + (C_2/C_1)}. \quad (30)$$

Já para o circuito (a),

$$\eta \simeq \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + (C_2/C_1)} \frac{1}{1 + (R_2/R_1)}. \quad (31)$$

Os parâmetros α_1 e α_2 definem a forma de onda teórica do impulso de tensão na saída. Assim, os valores R_1 e R_2 do circuito do gerador devem ser calculados em função destes parâmetros e das capacitâncias de entrada e

saída. A capacitância da saída é dependente da carga e, portanto, podem haver variações nos períodos do impulso. Porém, em geral, as variações se encontram dentro da faixa aceitável definida por norma.

A título de verificação e exemplo, o circuito da Figura 11b foi simulado no programa de simulação PSIM. O diagrama com os valores selecionados encontra-se na Figura 12. A forma de onda correspondente obtida na saída pode ser vista na Figura 13.

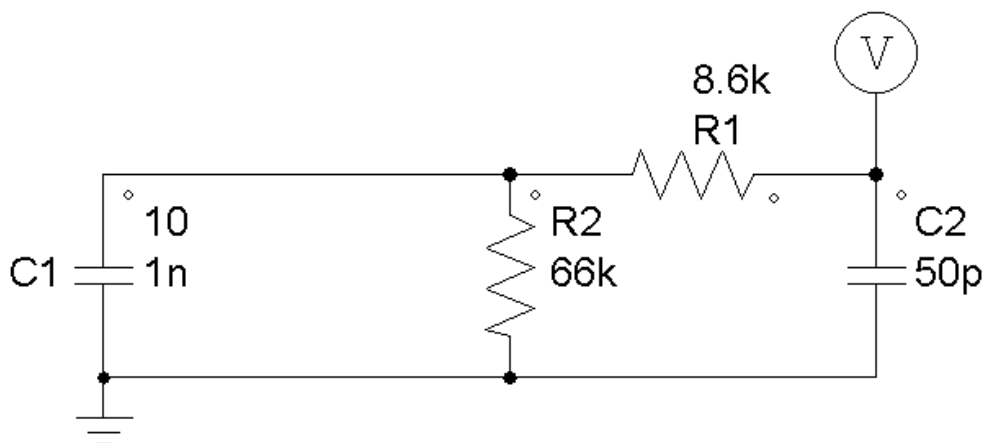


Figura 12 – Diagrama do circuito simulado.

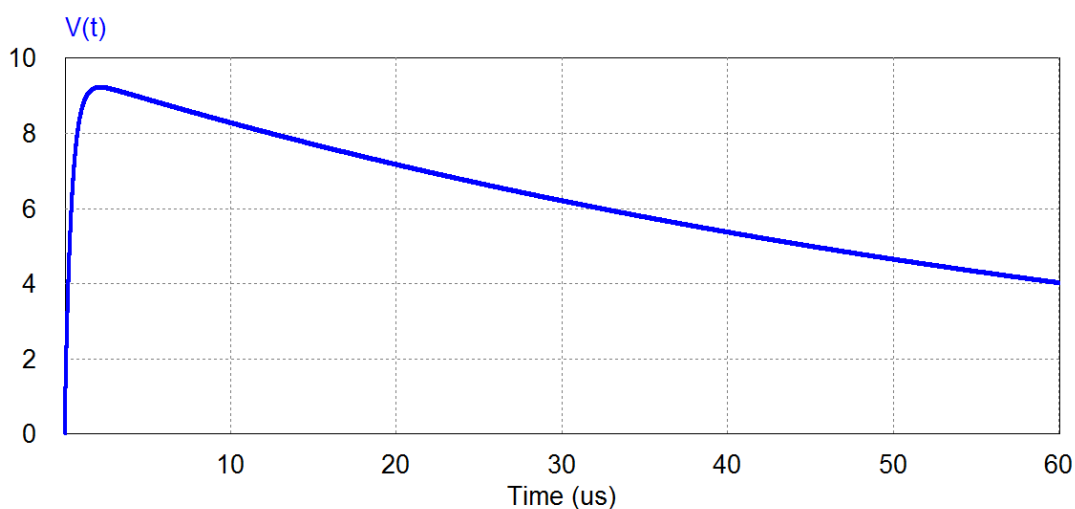


Figura 13 – Forma de onda do impulso de tensão obtido.

Deve-se observar que a análise exposta desconsidera as indutâncias intrínsecas do circuito elétrico. A presença de indutâncias expressivas pode ocasionar oscilações e *overshoots*. Assim, na realização do projeto de um gerador de impulso de tensão, é aconselhável que a indutância dos elementos do circuito seja mantida tão baixa quanto possível.

3.2.2. O Gerador de Múltiplos Estágios

Quando se trata da obtenção de tensões com amplitudes muito elevadas, os geradores de estágio único apresentam algumas limitações, tais como a obtenção de tensão CC de alto valor para o carregamento de C_1 , e dificuldades de projeto no centelhador e demais componentes, que ficam sujeitos a descargas corona à medida em que a tensão é aumentada.

Para contornar esses problemas, minimizando os esforços elétricos aos quais os componentes são submetidos, é utilizado um circuito gerador de múltiplos estágios, primeiramente descrito por Erwin Otto Marx em 1923 (JÄGER, 1996). O funcionamento do circuito consiste no carregamento de um conjunto de capacitores em paralelo à fonte CC, seguido pela abrupta comutação da ligação paralela para uma ligação série, na qual a soma da tensão dos capacitores é imposta à saída. Um exemplo desta configuração pode ser visto na Figura 14.

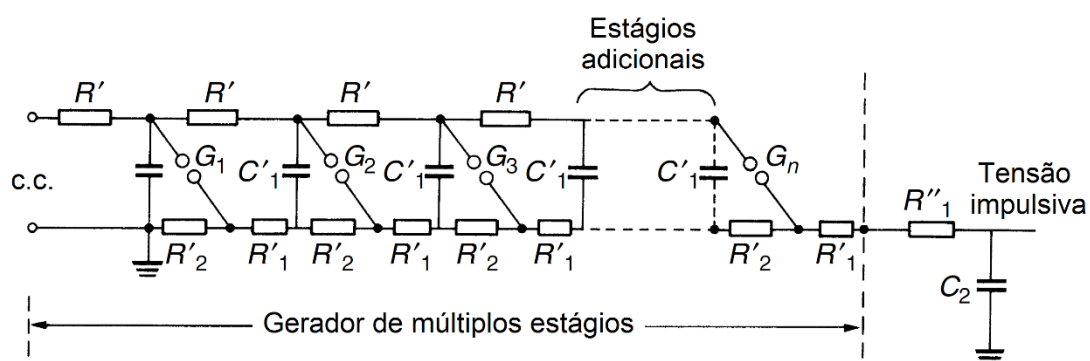


Figura 14 – Gerador de impulso de tensão com múltiplos estágios (KUFFEL E; ZAENGL; KUFFEL J., 2000, adaptado).

No circuito da Figura 14, os capacitores são carregados pelos resistores de carregamento R' , os quais possuem alto valor, limitando a corrente de carregamento. Os resistores R' também tem a função de garantir a condição de circuito série no momento de descarregamento dos capacitores C_1 . Os demais resistores são utilizados para a obtenção da forma de onda requerida. Os resistores internos R_1 definem a frente de onda, ao passo que os resistores de descarga R_2 definem o tempo de cauda. Há ainda um resistor externo R''_1 que também atua no tempo de frente do impulso, de forma que a resistência efetiva de frente é dada por:

$$R_1 = R_1'' + \sum^n R_1' = R_1'' + nR_1', \quad (32)$$

considerando que os resistores dos n estágios possuem valores iguais. De forma análoga, a resistência efetiva de descarga R_2 é dada por:

$$R_2 = nR_2' \quad (33)$$

e a capacitância equivalente C_1 , por:

$$\frac{1}{C_1} = \sum^n \frac{1}{C_1'} \therefore C_1 = \frac{C_1'}{n} . \quad (34)$$

Uma explicação mais acurada do circuito gerador de impulso de tensão com múltiplos estágios deve também considerar as capacitâncias distribuídas presentes no circuito. Informações adicionais podem ser obtidas em Naidu e Kamaraju (1996) e Kuffel, E., Zaengl e Kuffel, J. (2000).

Neste capítulo, foi realizada uma explanação concisa acerca do princípio de funcionamento dos geradores de impulso empregados em laboratórios de alta tensão e do papel dos seus componentes de circuito. No próximo capítulo, é apresentada a ferramenta utilizada para a realização dos cálculos e simulações dos métodos elencados no capítulo 2. Em seguida é feita uma explanação sobre as ferramentas e métodos empregados para a realização dos ensaios e coleta de dados em laboratório.

4. SIMULAÇÕES E ENSAIOS EM LABORATÓRIO

De modo a verificar a eficácia dos métodos experimentais apresentados, tanto por meio da variação dos parâmetros quanto por meio da comparação com o outro método, foram realizadas simulações dos testes. Concomitantemente, foram realizados ensaios com o gerador de impulso de tensão do Laboratório de Alta Tensão. As ferramentas, procedimentos e materiais empregados são elencados nesta seção.

4.1. MATLAB

MATLAB^{®1} (MATrix LABoratory) é uma plataforma interativa para cálculo numérico e programação, sendo também considerado como uma linguagem de *script* de alto nível. O MATLAB[®] integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em um ambiente em que problemas e soluções são expressos utilizando linguagem mais voltada para a matemática do que a programação tradicional. Ele pode ser utilizado como calculadora ou como linguagem de programação, com uma lógica similar ao C/C++, porém voltado à linguagem matemática. O *software* conta com ferramentas para a criação e manipulação de matrizes, como seu próprio nome indica, e tem como principais funções: construção de gráficos e compilação de funções, manipulação de funções específicas de cálculo e variáveis simbólicas.

O MATLAB[®] possui diversos módulos (*toolboxes*), que lidam com cálculo numérico, simulação física e de sistemas de controle, por exemplo. Neste estudo, foram utilizadas algumas funções da biblioteca estatística (*Statistics and Machine Learning Toolbox*), que lida com distribuições de probabilidade, análise de dados, teste de hipóteses e regressão. Detalhes das rotinas desenvolvidas no decorrer do estudo podem ser vistos no Apêndice A.

¹MATLAB é marca registrada da *TheMathWorks*.

4.2. MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Entre os dias 31 de agosto e 21 de setembro, foram realizadas campanhas de medições com o gerador de impulso de tensão do Laboratório de Alta Tensão. As medições ocorreram em determinados dias da semana, e tiveram como objetivo inicial o aprendizado do aluno no tocante à operação do equipamento.

No momento das medições, foram registrados os valores de temperatura, umidade do ar e pressão atmosférica, grandezas essenciais ao estudo da ruptura dielétrica no ar atmosférico.

Uma fotografia do gerador de impulso pode ser vista na Figura 15. Trata-se de um gerador de Marx de sete estágios. A tensão de entrada do circuito é fornecida por um transformador elevador monofásico 2x220 V/50 kV, de 5 kVA (valores de placa). A tensão do secundário é retificada e utilizada para energizar o capacitor de entrada do circuito. Sendo o valor da tensão contínua cerca de 100 kV, o gerador pode produzir impulsos de tensão de aproximadamente 700 kV, caso sejam utilizados todos os estágios.

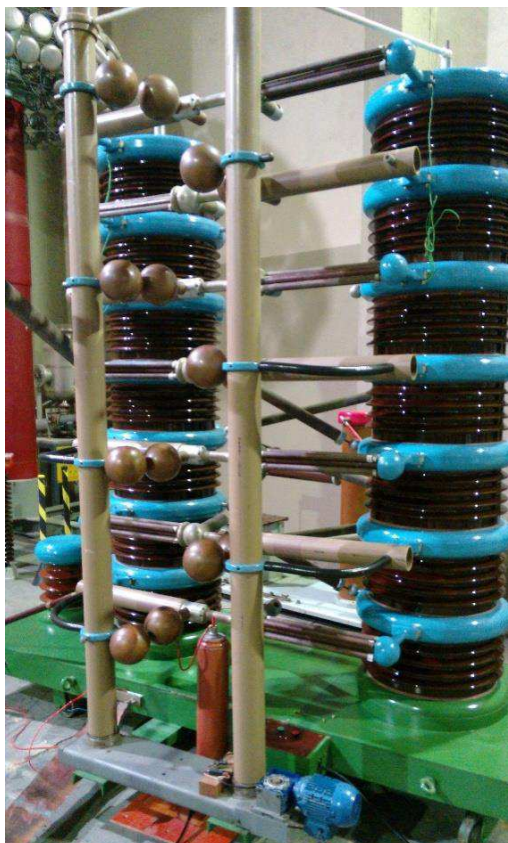


Figura 15 – Gerador de impulso de tensão.

O capacitor original do circuito de disparo foi danificado, tendo sido substituído por um capacitor de 10 nF/140 kV do *Kit* de Alta Tensão.

Outros itens que podem ser vistos na fotografia são o motor de indução utilizado para o ajuste da distância entre as esferas, as esferas centelhadoras e o cabo verde utilizado para aterrar os estágios não utilizados, por motivo de segurança.

Uma fotografia do circuito de alimentação (transformador + retificador) encontra-se na Figura 16. Na Figura 17, é possível observar um centelhador em detalhe.



Figura 16 – Transformador e retificador.



Figura 17 – Esferas centelhadoras.

Na Figura 18, podem ser vistos o resistor externo, o qual é conectado à saída do circuito, que consiste neste caso do divisor capacitivo utilizado para medição de tensão e do espinterômetro – *spark gap* – utilizado para o teste. Além do arranjo esfera-esfera, também foram testados os arranjos ponta-plano e ponta-ponta. Ainda na Figura 18, é possível perceber a presença de uma fita condutora que liga a saída ao aterramento. Esta geometria é preferível devido a sua menor indutância quando comparada com um condutor filamental de mesma capacidade.



Figura 18 – Saída do gerador de impulso de tensão.

O divisor capacitivo é composto por um capacitor de 400 pF / 770 kV e um capacitor de 620 nF, resultando em um fator de redução de 1551.

A mesa de comando do gerador pode ser vista na fotografia da Figura 19.



Figura 19 – Mesa de comando do gerador.

O painel de controle consiste em uma chave principal, botões para ligar e desligar o circuito de alta tensão, um cursor giratório que controla o valor da tensão de carregamento dos capacitores, botões que comandam o motor que realiza um ajuste fino da distância entre as esferas centelhadoras e uma chave que controla a polaridade dos capacitores. Também há uma saída de tensão proporcional à tensão de carregamento, à qual foi ligada um multímetro digital. O diagrama esquemático do gerador de impulso de tensão pode ser visto no Anexo A.

A operação do gerador de impulso consiste em ajustar o cursor para a tensão desejada e aguardar alguns segundos até o carregamento dos capacitores e consequente estabilização da tensão de entrada. Após isso, ao ser pressionado o botão de *trigger*, todas as esferas devem centelhar, transferindo a energia armazenada nos capacitores de modo a produzir a tensão impulsiva na saída. Inicialmente, a relação de tensão do divisor da entrada não era conhecida.

De modo a obter forma de onda e valor de pico do impulso, a saída do divisor capacitivo foi ligada a um osciloscópio digital. Dado que o impulso de tensão é um fenômeno transitório, ele não pode ser visualizado no osciloscópio utilizando o modo normal de operação. É necessário utilizar a ferramenta de captura de transitórios, a qual registra o sinal a partir do instante inicial e até um tempo especificado após este superar um limiar (*trigger*) previamente ajustado. No osciloscópio utilizado, o procedimento consiste em ajustar as escalas de tempo, tensão, posição inicial, valor de *trigger* e, por último, pressionar o botão *Single Seq*, que coloca o osciloscópio em modo de espera do sinal.

O osciloscópio digital também permite a aquisição de dados via cartão de memória. Este recurso foi utilizado para salvar as formas de onda desejadas, e determinar uma relação entre a tensão de entrada obtida da mesa de comando com a tensão na saída.

Durante os experimentos, foi observado que a tensão impulsiva produzida apresentava uma componente ruidosa expressiva, em especial durante o tempo de subida e no começo da cauda. Este fato dificultou a realização de uma leitura direta do valor de pico do impulso. O problema pode ser melhor compreendido ao se visualizar exemplos de formas de onda obtidas, as quais se encontram nas Figuras 20 a 23.

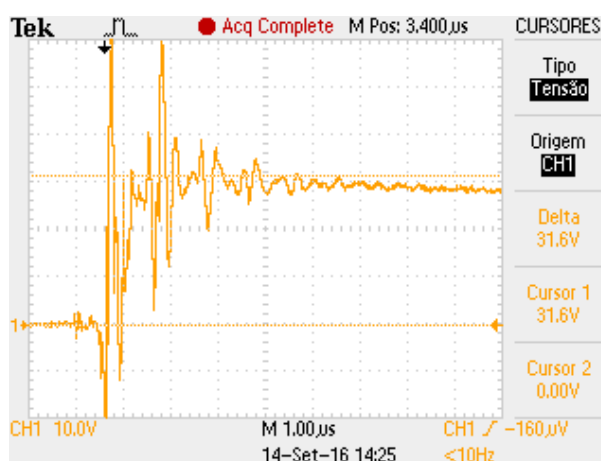


Figura 20 – Forma de onda típica obtida com escala de tempo 1 $\mu\text{s}/\text{div}$.

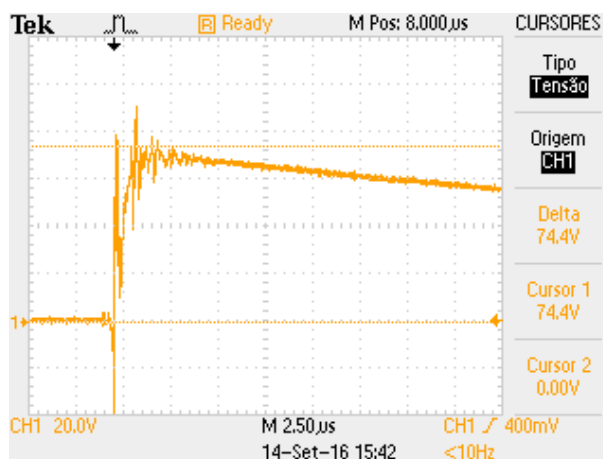


Figura 21 - Forma de onda típica obtida com escala de tempo 2,5 µs/div.

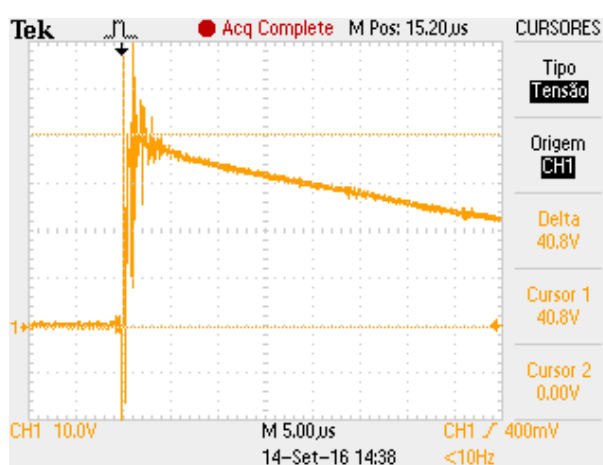


Figura 22 - Forma de onda típica obtida com escala de tempo 5 µs/div.

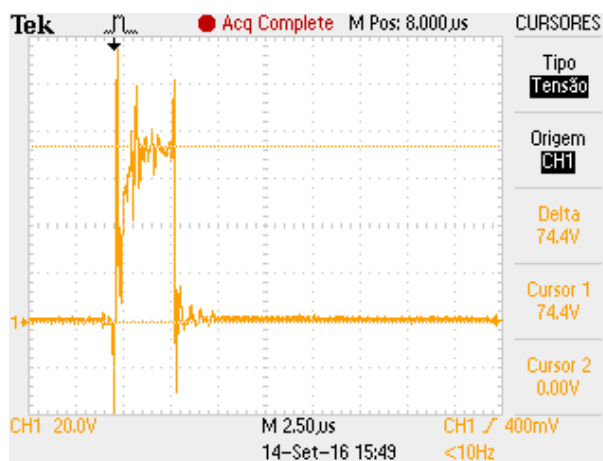
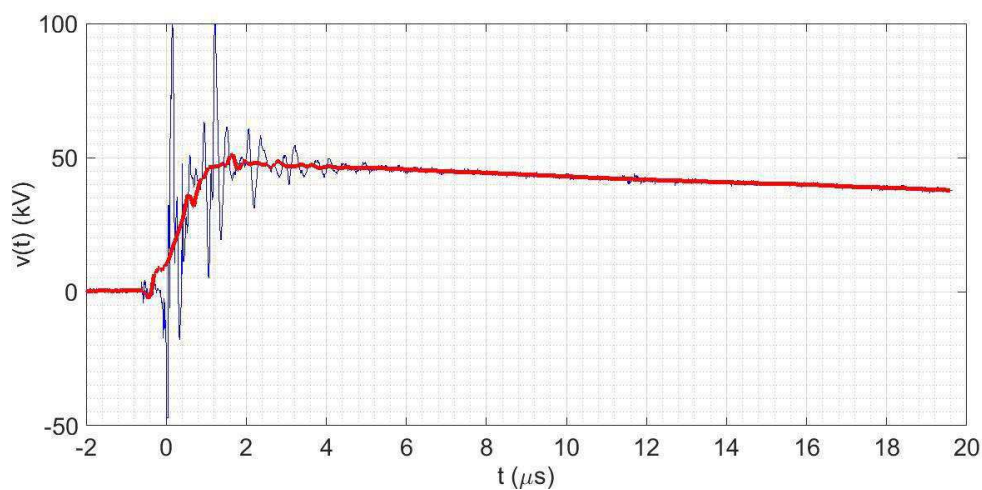


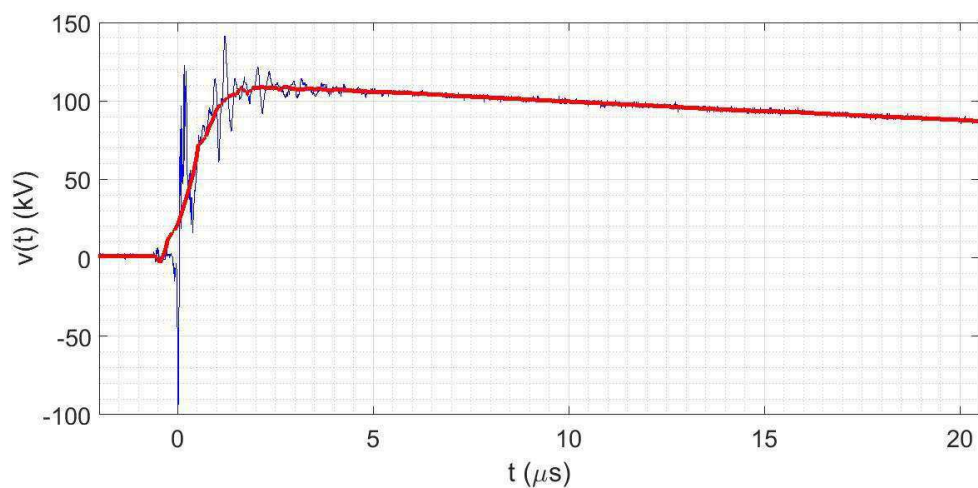
Figura 23 – Forma de onda cortada decorrente de ruptura.

A observação dos gráficos permite constatar que o valor de pico é mais facilmente distinguido com uma escala de tempo maior, de 2,5 ou 5 µs. Na Figura 23, pode ser observada a forma de onda característica obtida quando da ocorrência de ruptura do isolamento, situação na qual um arco elétrico curto-circuita a saída, descarregando os capacitores e levando a tensão a zero.

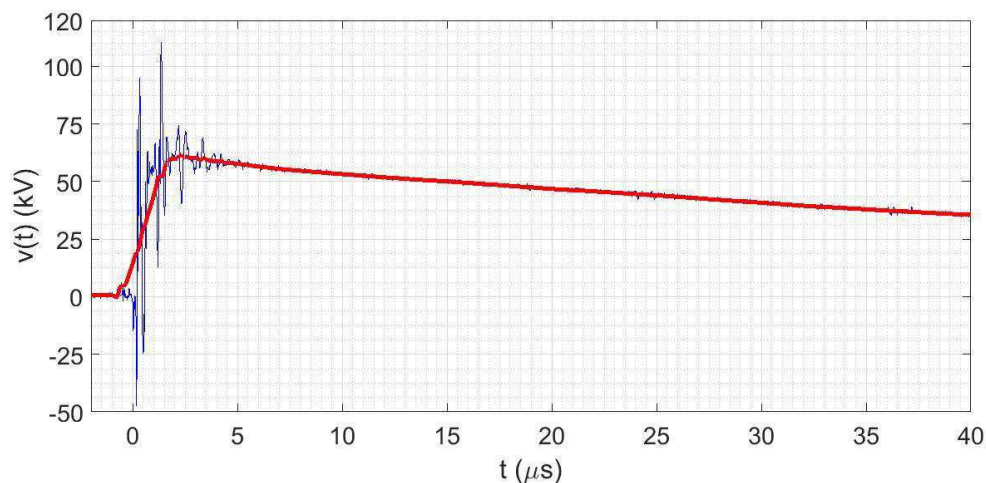
Segundo Kuffel, E., Zaengl e Kuffel, J. (2000), se a frequência das oscilações não é menor que 0,5 MHz ou a duração do *overshoot* não supera 1 μs , então uma curva média pode ser traçada. Na Figura 24 são apresentadas as mesmas formas de onda mostradas nas figuras anteriores, com o valor real de tensão obtido com a multiplicação do fator de escala, antes e depois de passar por um filtro de média móvel.



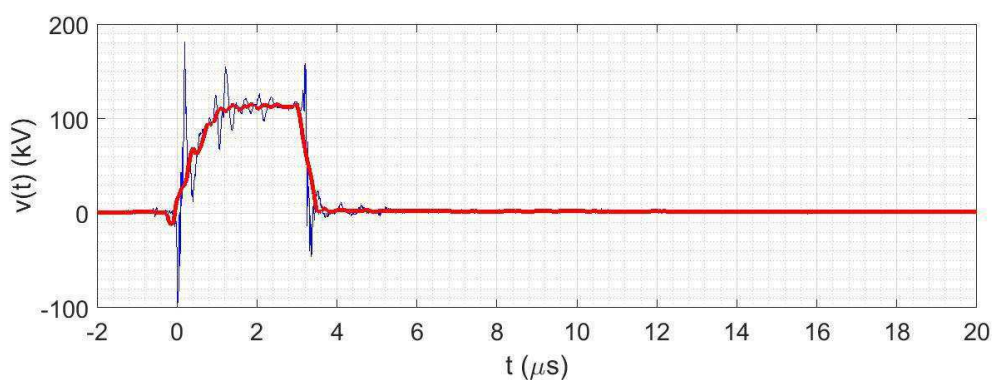
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 24 – Impulsos das Figuras 20 a 23, antes e após filtragem.

Na Tabela 1, são confrontados os valores de pico que o osciloscópio apresentaria e os valores de pico obtidos após a filtragem de cada sinal.

Tabela 1 – Comparação entre valores de pico antes e após filtragem da forma de onda.

Impulso	V_p (kV)	V_p do sinal filtrado (kV)	Erro (%)
a	103,0	51,1	101,6
b	141,5	109,0	29,8
c	110,4	61,8	78,7
d	181,2	116,3	55,8

Durante os testes, foi verificado que, mesmo com os terminais da ponta de prova desconectados do divisor capacitivo, quando da aplicação do impulso ocorre a leitura de um ruído com caráter oscilatório, transitório e de amplitude apreciável. Cogitou-se a possibilidade de tal ruído ser transmitido do gerador

ao osciloscópio por meio da instalação elétrica, tendo sido sugerida a utilização de um transformador isolador de relação 1:1 na tentativa de atenuar tal ruído.

Como a relação entre a tensão de entrada na bancada e a tensão de saída não era conhecida, foi realizada a aquisição das formas de onda dos impulsos de diferentes amplitudes aplicados. Realizando a filtragem descrita anteriormente com o uso de computador, os valores de pico podem ser estimados com maior precisão.

Após a familiarização com a operação do equipamento, foram realizados testes em espinterômetros com diferentes geometrias, os quais podem ser vistos na Figura 25.

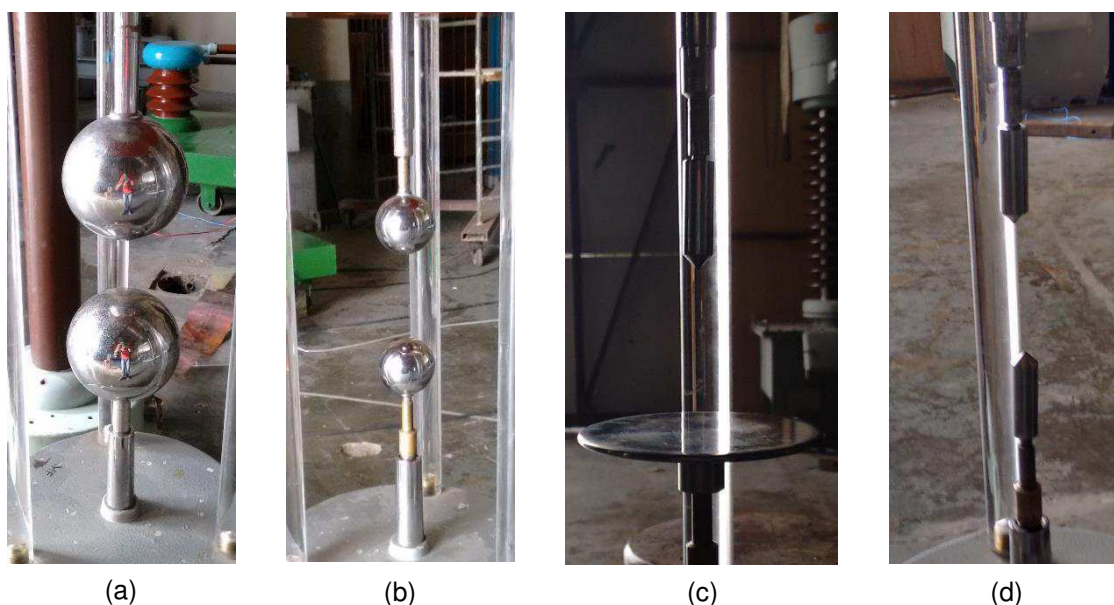


Figura 25 - Espinterômetros testados. (a) Esferas maiores. (b) Esferas menores. (c) Ponta-plano. (d) Ponta-ponta.

As esferas do arranjo a possuem raio de 5,0 cm. O raio das esferas do arranjo b é de 2,5 cm. O diâmetro do disco plano é de aproximadamente 12,0 cm. O diâmetro da ponta é de cerca de 1,2 cm. A extremidade em si tem aproximadamente 0,8 cm de altura.

Nos espinterômetros a e b, ajustados para uma distância de 5 cm, foram aplicados ambos os métodos de teste apresentados. Já nos espinterômetros c e d, ajustados para uma distância de 8 cm, foi utilizado apenas o método *Up and Down*.

O teste à tensão constante foi realizado com 3 níveis de tensão diferentes e 20 aplicações de tensão por nível. O método *Up and Down*, por

sua vez, foi aplicado com 30 amostras, começando a contar da primeira aplicação de tensão que levou à ruptura.

O arranjo ponta-plano foi testado tanto na configuração ponta positiva quanto com a ponta negativa. Dado que o ajuste de polaridade do gerador se encontrava com defeito na ocasião da medição, a mudança de polaridade foi efetuada trocando fisicamente a ponta e o plano de posição no arranjo.

Durante as medições, foi tomado o cuidado de não realizar duas aplicações de tensão consecutivas em um intervalo menor que 30 segundos, conforme sugerido por Hauschild e Mosch (1992). Na prática, verificou-se que o próprio ajuste do valor da amplitude da tensão de carregamento dos capacitores de entrada toma um tempo maior que o requerido.

Devido ao reduzido tempo no qual o arco elétrico se mantém no caso de uma ruptura dielétrica causada por impulso de tensão, obter fotografias do fenômeno não é uma tarefa simples. Uma imagem da centelha produzida pela ruptura dielétrica pode ser vista na Figura 26. De modo a obter a imagem, foi capturado um quadro de um vídeo gravado no momento da aplicação do impulso de tensão.



Figura 26 – Centelha elétrica.

Neste capítulo foram apresentadas as ferramentas e métodos empregados para a realização das simulações e das medições em laboratórios. Foram expostos detalhes e fotografias do circuito gerador de impulso de tensão e dos espinterômetros estudados. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos, juntamente com suas respectivas análises.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Com o objetivo de realizar uma análise de sensibilidade da precisão e exatidão dos resultados obtidos em função dos parâmetros dos métodos, foram realizadas diversas simulações, que permitem comparar os resultados obtidos com os valores esperados e já conhecidos de antemão. Os resultados finais das simulações são apresentados nesta seção. Os resultados primários dos testes, em formas de gráficos e tabelas, foram organizados no apêndice B.

As simulações consistiram na definição prévia de uma distribuição, a qual se deseja estimar, e a comparação dos valores estimados com o valor esperado. Para a realização dos testes foram escritos programas em MATLAB®, os quais podem ser verificados no Apêndice A.

O primeiro estudo consistiu na avaliação do desempenho do método de múltiplos níveis em estimar a distribuição de tensão de ruptura $X \sim N(100, 4)$ kV. Foram arbitrados os valores $m = 3, 5$ e 10 para o número de níveis de tensão e os valores $n = 20, 30$ e 50 para o número de testes por nível. Para cada uma das 9 combinações, foram executados 10 testes, de forma a se obter uma amostra estatisticamente consistente. O procedimento pode ser melhor compreendido com uma observação da Tabela 2.

Tabela 2 – Variação dos parâmetros do método de múltiplos níveis.

	$n = 20$	$n = 30$	$n = 50$
$m = 3$	I	II	III
$m = 5$	IV	V	VI
$m = 10$	VII	VIII	IX

Total: 9 diferentes configurações e 90 testes de tensão constante.

Na Tabela 3, podem ser vistos os resultados para cada uma das nove configurações simuladas. É conveniente ressaltar que, nesta tabela, média e desvio padrão são as medidas de dispersão da amostra, e não da distribuição estimada pelo teste. ‘*E*’ denota esperança/valor esperado e ‘*DP*’, desvio padrão.

Tabela 3 – Medidas de dispersão dos parâmetros obtidos.

Configuração	<i>E</i>(<i>U</i>_{50%})	<i>DP</i>(<i>U</i>_{50%})	<i>E</i>(σ_{est})	<i>DP</i>(σ_{est})
I	100,096	1,017	3,496	1,023
II	100,158	0,799	3,500	0,773
III	100,227	0,595	3,560	0,504
IV	99,835	0,535	4,120	0,878
V	99,998	0,586	3,889	0,694
VI	99,978	0,618	3,946	0,525
VII	99,987	0,441	4,144	0,640
VIII	100,062	0,264	4,113	0,476
IX	99,890	0,101	4,036	0,268

O valor médio trata da exatidão do resultado, enquanto que o desvio padrão trata da precisão e da repetibilidade do teste. Os resultados também podem ser expressos em termos de erro, definindo o erro em termos relativos como

$$\epsilon = \frac{X_{teórico} - X_{obtido}}{X_{teórico}} \quad (35)$$

Na Tabela 4, ϵ_U simboliza o erro relativo na tensão $U_{50\%}$, enquanto ϵ_σ denota o erro relativo no desvio-padrão. Os valores encontram-se em escala percentual. Foram também apresentados os maiores erros percentuais absolutos obtidos para cada caso. Valores médios do erro próximos de zero indicam que o estimador não é enviesado.

Tabela 4 – Erro dos valores obtidos nas simulações do teste de múltiplos níveis.

Configuração	$E(\epsilon_u)$ (%)	$max \epsilon_u$ (%)	$E(\epsilon_\sigma)$ (%)	$max \epsilon_\sigma$ (%)
I	-0,096	1,36	12,6	57,9
II	-0,158	1,31	12,5	36,7
III	-0,227	1,26	11,0	34,3
IV	0,165	1,22	-3,01	41,1
V	0,0023	1,17	2,78	28,7
VI	0,022	1,33	1,35	19,3
VII	0,013	0,69	-3,61	29,5
VIII	-0,062	0,38	-2,83	22,2
IX	0,110	0,24	-0,90	13,8

Os desvios percentuais relativos são iguais aos desvios padrão calculados divididos pelo valor de referência e multiplicados por 100%. Como o valor de referência para $U_{50\%}$ é 100 kV, o desvio percentual do erro é idêntico ao desvio absoluto da grandeza. É apresentado, portanto, apenas o desvio relativo percentual de σ_{est} , o qual pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de desvio padrão do valor σ_{est} estimado pelo método de múltiplos níveis.

Configuração	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
DP(σ_{est}) (%)	25,6	19,3	12,6	22,0	17,3	13,1	16,0	11,9	6,7

O segundo estudo consistiu na avaliação do desempenho do método *Up and Down* em estimar a distribuição de tensão de ruptura $X \sim N(100,4)$ kV. O teste simulado foi repetido 5 vezes para cada um de três diferentes valores do passo de tensão ΔU : 2, 4 e 5 kV, todas considerando um número de testes $n = 30$. Em seguida, foi realizada uma simulação com $\Delta U = 4$ kV e $n = 50$.

De forma semelhante à realizada anteriormente, são apresentadas tabelas com os resultados obtidos. Nas primeiras quatro séries, foi variado o passo de tensão. Na quinta coluna, foi modificado o valor da tensão inicial. Na sexta, foi aumentado o número n de testes por ensaio.

Tabela 6 – Medidas de dispersão dos parâmetros obtidos – Método *Up and Down*.

Teste				$E(U_{50\%})$	$DP(U_{50\%})$	$E(s^*)$	$DP(s^*)$
Δu	n	U_0					
1	2	30	90	100,23	1,514	3,382	1,075
2	4	30	90	99,75	0,834	2,997	0,956
3	5	30	90	99,87	1,229	3,465	1,061
4	6	30	90	100,29	0,994	4,023	1,378
5	4	30	88	100,51	1,022	3,736	1,675
6	4	50	90	100,40	0,902	4,009	1,223

Tabela 7 – Erro dos valores obtidos nas simulações do método *Up and Down*.

Teste				$E(\epsilon_u)$ (%)	$max \epsilon_u $ (%)	$E(\epsilon_s)$ (%)	$max \epsilon_s $ (%)
Δu	n	U_0					
1	2	30	90	-0,23	2,71	15,45	43,1
2	4	30	90	0,25	1,71	25,07	72,2
3	5	30	90	0,13	2,17	13,38	43,7
4	6	30	90	-0,29	1,40	-0,58	58,38
5	4	30	88	-0,50	1,73	6,60	86,5
6	4	50	90	-0,40	1,84	0,22	73,2

Os valores dos desvios relativos percentuais de s^* obtidos podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de desvio padrão do valor s^* estimado pelo método *Up and Down*.

Teste	1	2	3	4	5	6
$DP(\sigma_{est})$ (%)	26,9	23,9	26,5	34,5	41,9	30,6

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados da simulação do método de múltiplos níveis mostraram que ocorre uma redução do erro na estimação dos parâmetros ao se aumentar tanto o número de amostras por nível como o número de níveis. Foi observado que, para um mesmo número m de níveis, a exatidão e precisão das estimativas aumentam com o aumento do número n de amostras por nível.

Uma análise da Tabela 3 permite constatar que a dispersão da estimativa do desvio padrão diminui com o aumento do número total de medições $m \cdot n$. Houve testes que, apesar de possuir um valor de m maior, apresentaram um desvio padrão médio maior que outro com menor valor de m , porém com maior valor total de medições $m \cdot n$.

Os erros relativos e erros máximos percentuais obtidos na estimação da tensão $U_{50\%}$ foram muito menores que os obtidos na estimação do desvio padrão. Os próprios erros médios na estimativa do desvio padrão, entretanto, também foram pequenos.

Em relação aos resultados simulados para o método *Up and Down*, o valor médio da distribuição foi estimado com precisão bem maior que o desvio padrão, o que já era esperado. A precisão média da estimativa não foi tão fortemente influenciada pela variação dos parâmetros quanto no caso do método de tensão constante.

Foi constatada melhoria da exatidão média da estimativa do desvio padrão nos casos em que foram escolhidos valor de passo de tensão com valor próximo ao desvio padrão da distribuição estimada e nos casos em que o passeio aleatório passava próximo ao valor de $U_{50\%}$.

Não houve tendência de diminuição do máximo erro absoluto percentual com a variação dos parâmetros, indicando que a variação não afeta de forma significativa a precisão do método. Para todos os casos foram verificados altos valores de erro máximo percentual, como pode ser visto na Tabela 7.

Nas simulações de ambos os métodos, os erros máximos e médio obtidos na estimativa do desvio padrão foram muito maiores que os obtidos na estimativa de $U_{50\%}$. Pode-se, então, afirmar, que a estimativa do desvio padrão é a etapa mais crítica do teste.

No tocante à comparação de desempenho dos métodos de tensão constante e *Up and Down*, a conclusão é de que ambos fornecem valores para o valor esperado $U_{50\%}$ de modo satisfatório. O método de tensão constante requer um número maior de experimentos individuais para ser eficaz, porém tem como vantagem não exigir que a distribuição a ser estimada seja normal, pois o próprio método determina o comportamento da distribuição. Já o método *Up and Down* parte do pressuposto da normalidade da distribuição para fornecer resultados coerentes, e apresenta menor precisão na determinação do desvio padrão. Sua grande vantagem é requerer um número reduzido de testes, o que se traduz em economia de tempo e recursos financeiros.

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos. As relações funcionais encontradas entre o valor de pico do impulso de tensão e a tensão fornecida pela mesa de comando foram explicitadas. A análise da tensão de ruptura dos espinterômetros foi realizada na ordem definida pela Figura 25. Os valores medidos para os parâmetros físicos do ar foram organizados em forma de tabela.

5.3.1. Determinação da Relação de Tensão

Inicialmente, os valores de pico dos impulsos registrados utilizando o osciloscópio foram estimados por meio da filtragem da forma de onda. Como pode ser visto no gráfico da Figura 27, constatou-se que existe uma relação aproximadamente linear entre a tensão de carregamento dos capacitores e o valor de pico do respectivo impulso.

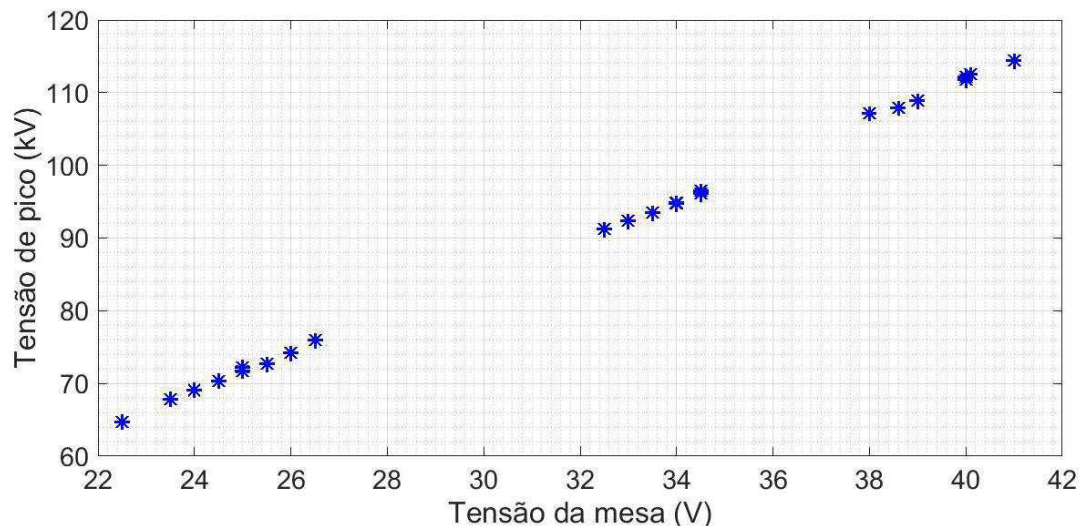


Figura 27 – Relação entre a tensão fornecida pela mesa de comando e o pico de tensão na saída do gerador.

Utilizando o módulo de ajuste de curvas do MATLAB®, foram obtidas as relações:

$$V_p = 2,8151 \cdot V_m \quad (36)$$

ou

$$V_p = 2,6708 \cdot V_m + 4,7926. \quad (37)$$

Nas Equações 36 e 37, V_p é o valor de pico do impulso de tensão na saída, em kV, enquanto V_m é o valor da tensão lida a partir da mesa de comando, por meio de um voltímetro. A Equação 36 pressupõe uma relação diretamente proporcional, a qual é esperada, apresentando um valor de coeficiente de determinação² $R^2 = 0,9962$. Já a Equação 37 foi apresentada por possuir um valor de $R^2 = 0,9993$ para os pontos obtidos. Entretanto, é evidente que ela é imprecisa para pequenos valores de V_m , pois não pode haver tensão na saída do gerador quando a tensão de carregamento dos capacitores tende a zero.

² O coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados.

5.3.2. Resultados das Medições

Após a resolução do problema da determinação dos valores de pico do impulso, passou-se a analisar os resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos, começando pelo *sphere gap* mostrado na Figura 25a: as duas esferas maiores.

Os resultados do teste à tensão constante são apresentados a seguir. Na Tabela 9, são apresentados, em ordem, os resultados dos testes individuais para os três níveis aplicados. Nesta tabela, como em todas as demais desta seção, o sinal 'X' representa ruptura, enquanto que o sinal 'O' representa não-ruptura.

Tabela 9 – Diagrama do método à tensão constante para o arranjo a.

V_m (V)	Sequência obtida
40	O O X O O O X X O O O O O O O O O O O O
41	O O X O X O X O O X O O X O X X O O O X
41,3	X X X O O X X X O X O X X X O X X O X X

Este tipo de digrama permite não apenas a obtenção da frequência relativa utilizada para estimar a probabilidade de ruptura, mas também uma checagem da independência entre as medições. No caso de, por exemplo, o número de rupturas aumentar visivelmente com o decorrer dos testes, as medições anteriores podem estar afetando o resultado das últimas medições. Não é o caso deste teste, como se pode depreender da análise do gráfico da Figura 28, no qual se pode notar que há uma tendência da frequência relativa se estabilizar em torno de um valor próximo ao valor obtido de 0,4.

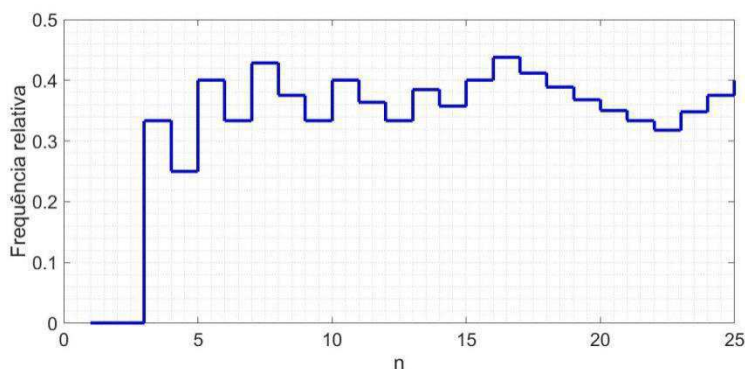


Figura 28 – Frequência relativa de ruptura para $V_m = 41$ V no teste de múltiplos níveis.

Os resultados experimentais do teste se encontram resumidos na Tabela 10, a qual apresenta os valores de pico do impulso aplicado e a respectiva frequência relativa obtida para cada nível de tensão.

Tabela 10 – Resultados do método à tensão constante para o arranjo a.

V_m (V)	V_p (kV)	Frequência relativa
40	111,6	0,15
41	114,3	0,40
41,3	115,1	0,70

Com os dados da Tabela 10, os parâmetros estimados para a distribuição de tensão disruptiva para o arranjo a foram $U_{50\%} = 114,4$ kV e $\sigma_{est} = 2,204$ kV. Um gráfico da função desempenho (f.d.a) estimada pode ser visto na Figura 29.

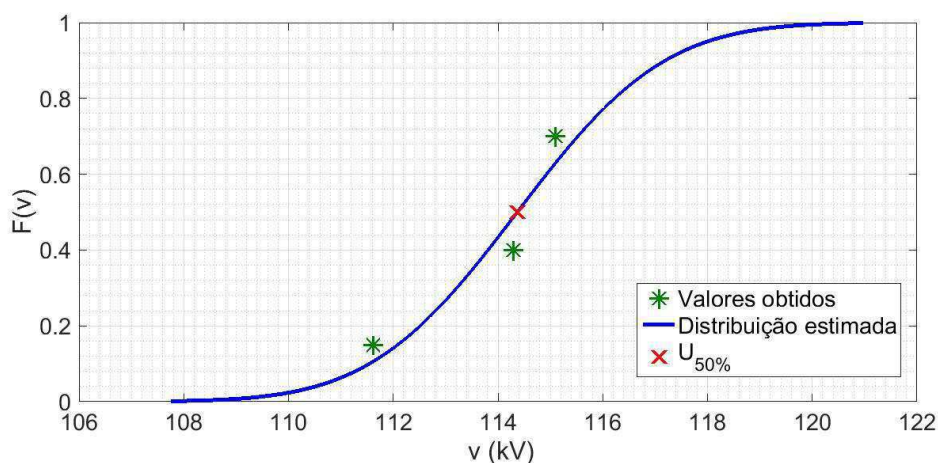


Figura 29 – Função desempenho estimada para o arranjo esfera-esfera 1.

Com os parâmetros obtidos, o valor estimado para $U_{10\%}$ do arranjo da Figura 25a é 111,5 kV.

Na Tabela 11 é apresentada a sequência de eventos resultante da aplicação do método *Up and Down*, com um passo de tensão de 2,82 kV, correspondente a um passo unitário da tensão medida na mesa de comando. Foram feitas 30 aplicações de tensão a partir da primeira ruptura.

A primeira coluna da tabela enumera os valores de tensão da mesa de comando, em V, enquanto a segunda linha apresenta o valor de pico da tensão impulsiva, em kV. A tabela é dividida em duas partes, sendo a segunda parte a

continuação da primeira. As demais tabelas foram organizadas do mesmo modo.

Tabela 11 – Passeio aleatório obtido com o arranjo a.

42	118,2	X							X
41	115,4	O	X		X	X	O	X	O
40	112,6	O		X	O	O	O		O
39	109,8	O			O				
42	118,2	X			X				
41	115,4	X	X	O	X	X	X	X	X
40	112,6		O	O		O	O	O	O

Dentre as 30 aplicações de tensão, o evento não-ruptura ocorreu 14 vezes, sendo, portanto, o evento empregado no cálculo dos parâmetros.

Os dados da Tabela 11 foram organizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do método *Up and Down* para o arranjo a.

Passo i	Número de rupturas	Número de não-rupturas	u_i (kV)
3	4	0	118,2
2	11	3	115,4
1	1	10	112,6
0	0	1	109,8
Total	16	$k = 14$	

A partir da Tabela 12, são obtidos os valores das constantes $A = 16$ e $B = 22$. Utilizando as fórmulas apresentadas, foram obtidos os valores $U_{50\%} = 113,3$ kV e $s^* = 1,273$ kV. Com estes valores, tem-se $U_{10\%} = 111,7$ kV.

Para o **sphere gap com esferas de menor diâmetro**, mostrado na Figura 25b, o teste à tensão constante foi realizado com temperatura de 27,6°C e umidade relativa do ar de 46%. Foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 13 – Diagrama do método à tensão constante para o arranjo b.

V_m (V)	Sequência obtida
35,1	X O X O O O X O O O X X O X X O O O O O
35,5	X X X O O O O O X O O X O O O O O X O X
36,0	X X O O X X X O X O X X X O O O X X O O

Tabela 14 - Resultados do método à tensão constante para o arranjo b.

V_m (V)	V_p (kV)	Frequência relativa
35,1	98,8	0,35
35,5	99,9	0,35
36,0	101,3	0,55

Com os dados da Tabela 14, os parâmetros da distribuição de tensão disruptiva do arranjo b foram estimados como sendo $U_{50\%} = 101,0$ kV e $\sigma_{est} = 4,66$ kV. Com estes valores, tem-se $U_{10\%} = 95,1$ kV.

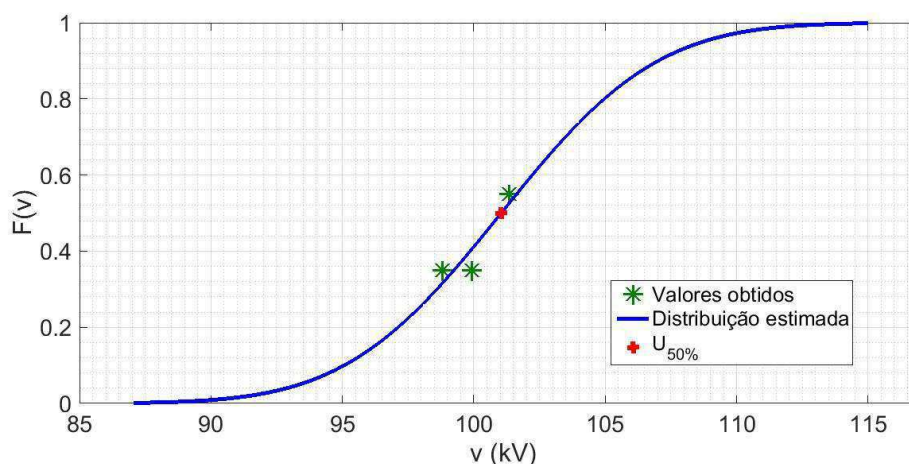


Figura 30 – Função de desempenho estimada para o arranjo esfera-esfera 2.

Para este e os demais arranjos, o passo adotado para o método *Up and Down* foi de 0,5 V na escala da mesa. A sequência de tensões obtidas é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15 – Passeio aleatório obtido para o arranjo b.

34,5	97,1	X				
34,0	95,7	O		X		
33,5	94,3	X		O	X	
33,0	92,9	X	O	O	X	
32,5	91,5	O	O	O		

34,5	97,1	X						
34,0	95,7	O	X		X	X	X	X
33,5	94,3	O		X	O	O	O	O
33,0	92,9	O						

Os dados da Tabela 15 foram organizados na Tabela 16, na qual o índice 0 é escolhido para o menor nível na qual o evento mais raro (ruptura, neste caso) ocorre.

Tabela 16 – Resultados do método *Up and Down* para o arranjo b.

Passo i	Número de rupturas	Número de não-rupturas	u_i (kV)
3	2	0	97,1
2	6	2	95,7
1	4	7	94,3
0	2	5	92,9
-	0	2	91,5
Total	$k = 14$	16	

A partir da Tabela 16, são obtidos os valores das constantes $A = 22$ e $B = 46$. Utilizando as fórmulas apresentadas, foram obtidos os valores $U_{50\%}^* = 94,4$ kV e $s^* = 1,829$ kV. Utilizando os fatores de correção estimados dos gráficos das Figuras 8 e 9, com $K_1 \approx 1,25$ e $K_2 \approx -0,05$, têm-se $U_{50\%} = 94,3$ kV e $\sigma_{est} = 2,286$ kV. O valor estimado para $U_{10\%}$ é 91,4 kV.

Os próximos resultados são referentes aos arranjos ponta-plano e ponta, ponta, todos com um espaçamento de 8 cm entre as partes mais próximas dos eletrodos. Foi aplicado apenas o método *Up and Down*.

Nas Tabelas 17 e 18 são apresentados os resultados referentes ao arranjo **ponta-plano com ponta negativa**.

Tabela 17 – Passeio aleatório obtido com o arranjo c – ponta negativa.

35,5	99,9	X							
35,0	98,5	O	X	X					
34,5	97,1	O		O	X	X			
34,0	95,7	X	O				O	X	
33,5	94,3	O	O					O	
33,0	92,9	O							
35,0	98,5	X							
34,5	97,1	X	X	X	O	X	X		
34,0	95,7	O	O	O	O	X	X	O	
33,5	94,3						O	O	

O número obtido de rupturas foi igual ao número de não-rupturas: 15. Portanto, a análise pode ser realizada de duas diferentes formas, havendo, neste caso, duas possibilidades de numeração dos níveis de tensão. Se o evento considerado é a ruptura, o índice 0 é atribuído ao menor valor de tensão, de acordo com a primeira coluna. Caso seja considerada a não-ruptura, o índice zero é atribuído ao menor nível de tensão, conforme a numeração da segunda coluna.

Tabela 18 – Resultados do método *Up and Down* para o arranjo c – ponta negativa.

Passo <i>i</i>		Número de rupturas	Número de não-rupturas	u_i (kV)
3	4	1	0	99,9
2	3	3	1	98,5
1	2	7	3	97,1
0	1	4	7	95,7
-	0	0	4	94,3
Total		15	15	

Considerando o evento ruptura, tem-se $A = 16$ e $B = 28$. Assim, são obtidas as estimativas $U_{50\%}^* = 96,51$ kV e $s^* = 1,640$ kV. Os fatores de correção encontrados foram $K_1 \approx 1,23$ e $K_2 \approx -0,04$, resultando em $U_{50\%} = 96,43$ kV e $\sigma_{est} = 2,017$ kV. O valor estimado para $U_{10\%}$ foi 93,84 kV.

Para o evento não-ruptura, foram obtidos os mesmos resultados. O gráfico da função desempenho obtida pode ser visto na Figura 31.

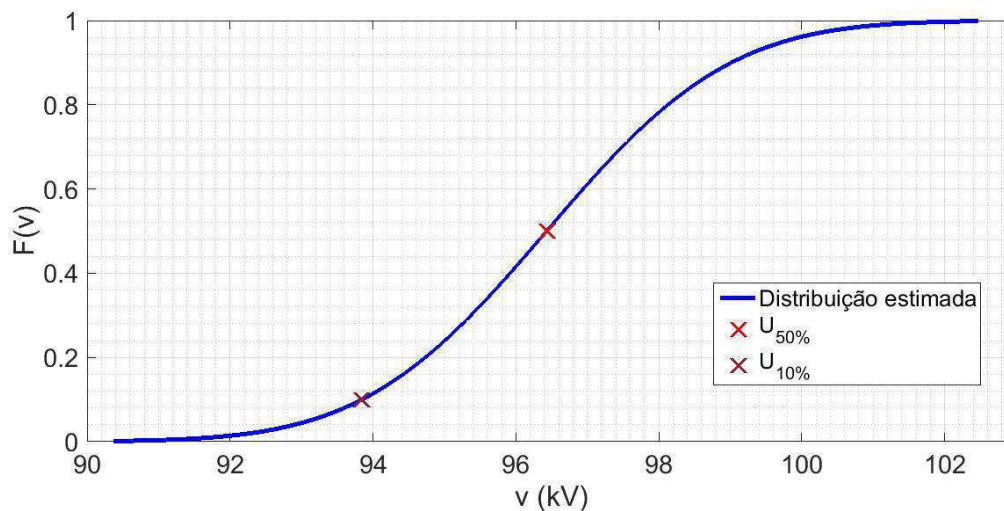


Figura 31 – Função desempenho estimada para o arranjo ponta negativa – plano.

Para o teste com **ponta positiva e plano**, foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Passeio aleatório obtido com o arranjo c – ponta positiva.

25,0	71,6	X							
24,5	70,2	O	X		X	X			
24,0	69,0	O		X	O	O	X		X
23,5	67,6			O			X	O	O
23,0	66,2						O		
24,5	70,2								X
24,0	69,0	X		X					O
23,5	67,6	X	O	X			X		O
23,0	66,2		O		X	O	X	O	
22,5	64,9				O		O		

Tabela 20 – Resultados do método *Up and Down* para o arranjo c – ponta positiva.

Passo i	Número de rupturas	Número de não-rupturas	u_i (kV)
5	1	0	71,6
4	4	0	70,2
3	5	3	69,0
2	4	5	67,6
1	2	4	66,2
0	0	2	64,9
Total	16	$k = 14$	

O evento considerado é a não-ruptura. Foram, então, obtidos os valores $A = 23$ e $B = 51$. Os parâmetros iniciais foram estimados como sendo $U_{50\%}^* = 67,7$ kV e $s^* = 2,105$ kV. Aplicando os fatores de correção $K_1 \approx 1,26$ e $K_2 \approx -0,07$, os valores corrigidos são $U_{50\%} = 67,5$ kV e $\sigma_{est} = 2,653$ kV. O valor estimado de $U_{10\%}$ para este espinterômetro, nas condições do teste, é 64,1 kV.

O gráfico da função desempenho obtida para este arranjo pode ser visto na Figura 32.

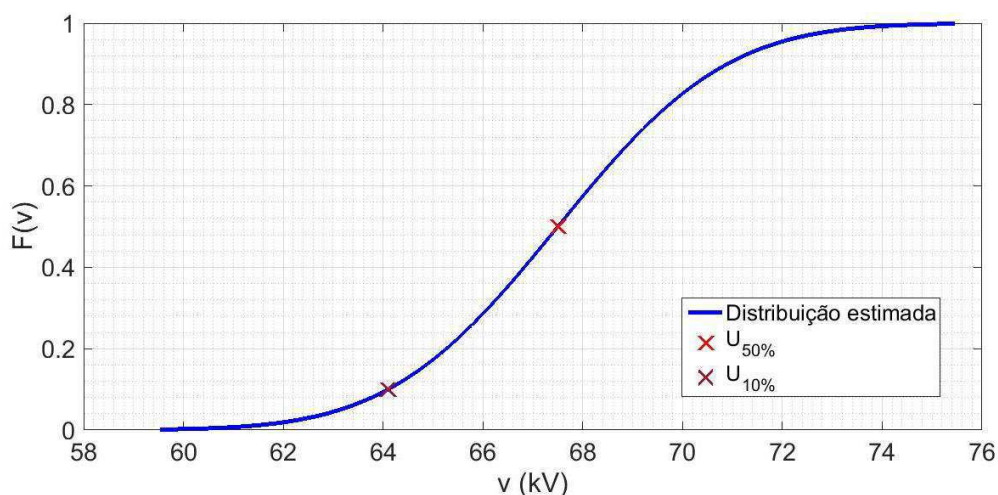


Figura 32 – Função desempenho estimada para o arranjo ponta positiva – plano.

Os resultados referentes ao **arranjo ponta-ponta**, cuja fotografia pode ser vista na Figura 25d, estão dispostos nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Passeio aleatório obtido com o arranjo d (ponta-ponta).

27,5	78,2									X
27,0	76,9				X	O		X		
26,5	75,6				O	O				X
26,0	74,2		X	O					X	X
25,5	72,9	O	O						O	O
25,0	71,6	O								
27,0	76,9									X
26,5	75,6							O	X	
26,0	74,2	X	X					O		X
25,5	72,9	O	X	X			O			O
25,0	71,6			O	X	O				
24,5	70,2					O				

O número de rupturas obtido foi igual ao número de não rupturas. Então, a análise segue o mesmo procedimento da realizada com os dados da Tabela 18.

Tabela 22 - Resultados do método *Up and Down* para o arranjo d.

Passo i		Número de rupturas	Número de não-rupturas	u_i (kV)
5	6	1	0	78,2
4	5	3	1	76,9
3	4	2	3	75,6
2	3	6	2	74,2
1	2	2	6	72,9
0	1	1	2	71,6
-	0	0	1	70,2
Total		15	15	

Os valores calculados para A e B são iguais em ambos os casos: $A = 37$ e $B = 117$. São obtidos os mesmos valores para os parâmetros utilizando os dois eventos. O valor inicial obtido para o desvio padrão foi $s^* = 3,774$ kV. O valor calculado para $U^*_{50\%}$ foi 74,19 kV.

Os fatores de correção para este caso são $K_1 \simeq 1,25$ e $K_2 \simeq - 0,05$. Os valores corrigidos são $U_{50\%} = 73,95$ kV e $\sigma_{est} = 4,72$ kV. Entretanto, pela inspeção dos valores extremos da Tabela 22 e análise das frequências relativas obtidas para cada nível de tensão do teste, verificou-se que o valor original antes da correção representa melhor os valores obtidos. Assim, são considerados os valores $U_{50\%} = 74,19$ kV e $\sigma_{est} = 3,774$ kV, e $U_{10\%} = 69,4$ kV.

O gráfico da função desempenho estimada para este arranjo pode ser visto na Figura 33.

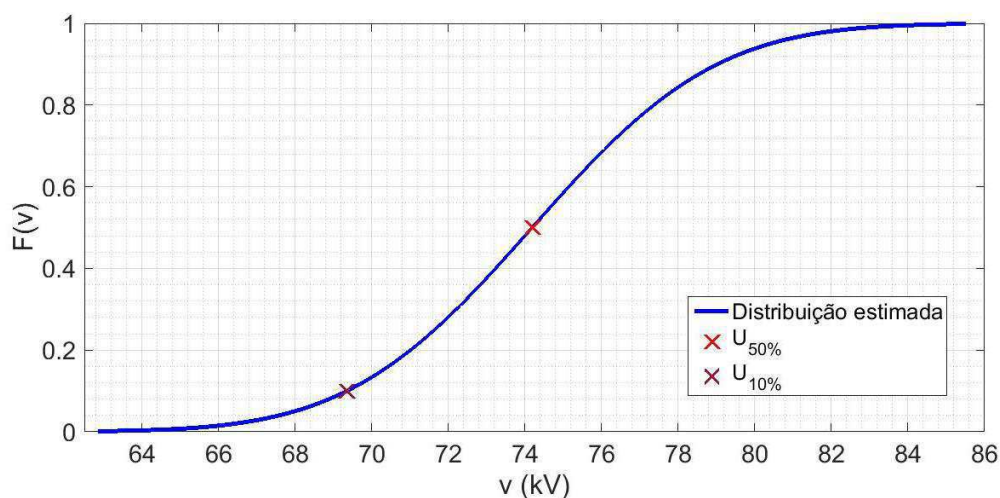


Figura 33 – Função desempenho estimada para o arranjo ponta-ponta.

A título de ilustração, a função densidade de probabilidade estimada para o arranjo ponta-ponta é mostrada no gráfico da Figura 34. Também são apresentados os valores dos níveis de tensão alcançados pelo teste. No nível mais alto, a probabilidade de ruptura é estimada em 85,8%. No mais baixo, a probabilidade de ruptura é estimada em 14,7%.

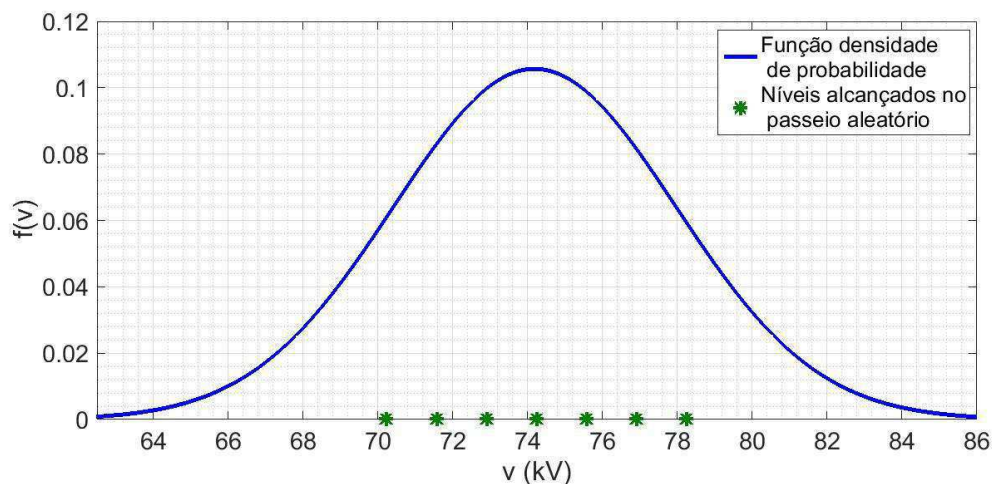


Figura 34 – Gráfico da f.d.p da tensão disruptiva estimada do arranjo ponta-ponta.

As distribuições estimadas para os três arranjos com ponta testados são confrontadas nos gráficos das Figura 35 e 36. A Figura 35 apresenta as funções de densidade de probabilidade.

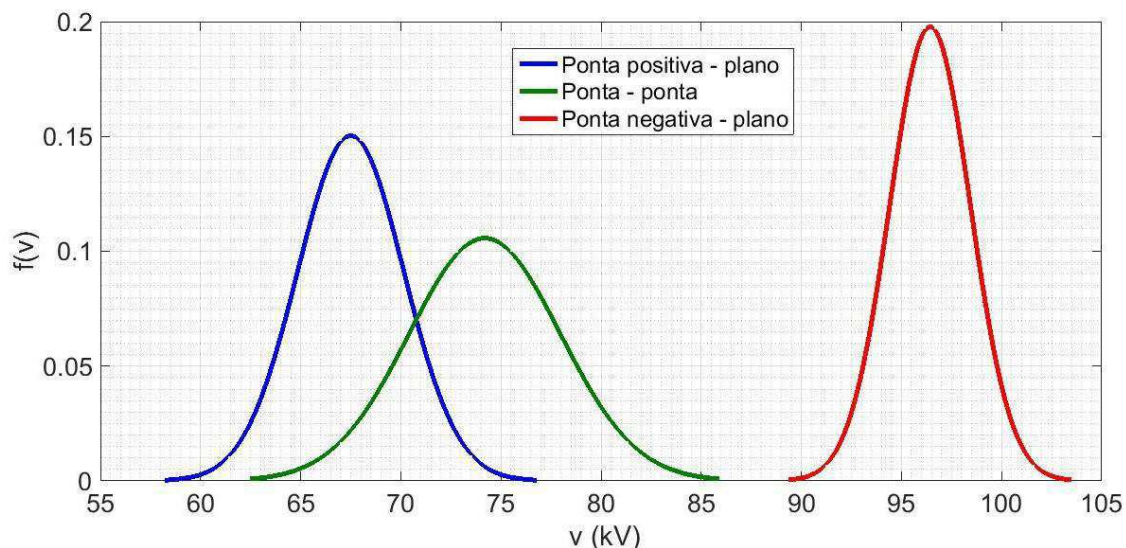


Figura 35 – Funções de densidade de probabilidade estimadas para os arranjos com ponta.

Já na Figura 36, são apresentados os gráficos das funções de distribuição acumulada (funções-desempenho), nos quais se pode obter diretamente as probabilidades de ruptura estimadas para determinado nível de tensão.

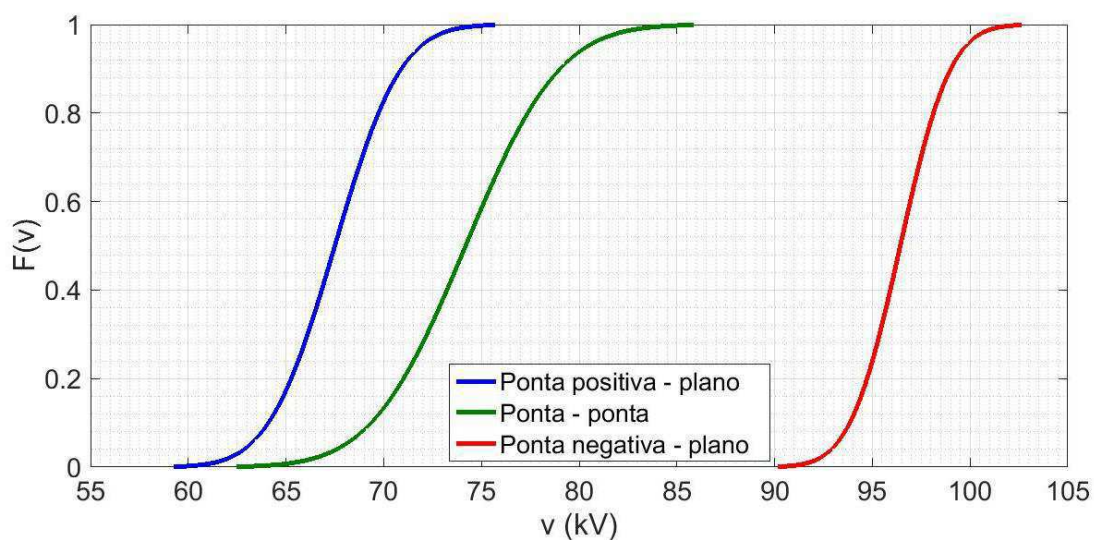


Figura 36 – Funções de distribuição acumulada estimadas para os arranjos com ponta.

Por fim, os valores dos parâmetros físicos medidos quando da realização dos testes estão organizados na Tabela 23. Os valores dos parâmetros estatísticos estimados encontram-se listados na Tabela 24. Como exposto anteriormente, os arranjos c e d foram testados apenas com o método *Up and Down*.

Tabela 23 – Parâmetros físicos do ar durante as medições.

Espinterômetro	Data	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Pressão atmosférica (mbar)
Esfera-esfera (a)	14/09	28,2	51	956,9
Esfera-esfera (b) (tensão constante)	31/08	27,6	46	-
Esfera-esfera (b) (<i>Up and Down</i>)	21/09	29,1	51	957,9
Ponta-plano (ponta negativa)	14/09	27,9	53	956,9
Ponta-plano (ponta positiva)	21/09	27,3	57	957,9
Ponta-ponta	21/09	28,0	54	957,9

Tabela 24 – Resumo dos resultados experimentais.

Arranjo		U_{50%} (kV)	σ_{est} (kV)	U_{10%} (kV)
a (<i>sphere gap 1</i>)	Tensão constante	114,4	2,20	111,5
	<i>Up and down</i>	113,3	1,27	111,7
b (<i>sphere gap 2</i>)	Tensão constante	101,0	4,66	95,1
	<i>Up and down</i>	94,3	2,29	91,4
c (Ponta-plano)	Ponta -	96,4	2,02	93,8
	Ponta +	67,5	2,65	64,1
d (Ponta-ponta)		74,2	3,77	69,4

5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O método a tensão constante e o método *Up and Down* forneceram valores muito próximos para a tensão $U_{50\%}$ do arranjo *a* (esfera-esfera). Este fato ratificou os resultados das simulações, nas quais os dois métodos concordaram em boa medida com o valor esperado e entre si, no tocante à estimação do valor de $U_{50\%}$.

O fato de o mesmo tipo de concordância não ter acontecido para o arranjo esfera-esfera *b*, para o qual a tensão estimada para $U_{50\%}$ diferiu entre os dois testes, pode ser justificado pelo fato de essas medições terem sido realizadas em dias diferentes, conforme pode ser visto na Tabela 23. O maior valor de umidade do ar registrado no dia do teste *Up and Down* justifica a obtenção de um menor valor de $U_{50\%}$.

A divergência entre os resultados obtidos para o arranjo *b* reforça a necessidade da realização dos testes sob as mesmas condições atmosféricas. Para obter condições as mais semelhantes possíveis para o ar atmosférico, o intervalo de tempo entre os testes deve ser o menor possível.

Na Tabela 14, a obtenção de dois valores iguais de frequência relativa para diferentes níveis de tensão se justifica pelo número de amostras $n = 20$ utilizado e pela proximidade entre os níveis de tensão escolhidos. Dado que o número de rupturas por nível é modelado por uma variável aleatória binomial, como discutido em seções anteriores, a estimativa da probabilidade de ruptura para um nível de tensão será tão mais exata quanto maior o número de aplicações de tensão por nível. Este número, contudo, é limitado por razões práticas: aumentar o número de aplicações de tensão acarreta em um aumento proporcional no tempo de execução e custo do teste, de modo que tem de haver um compromisso.

Como esperado, constatou-se que os valores médios de tensão disruptiva dos arranjos esfera-esfera se apresentaram maiores que os valores obtidos para os demais, mesmo com uma distância de 5 cm entre os eletrodos dos arranjos esfera-esfera frente uma distância de 8 cm nos arranjos com ponta. O arranjo esfera-esfera com diâmetro maior apresentou um maior valor de tensão $U_{50\%}$. Os resultados se devem ao fato de o campo elétrico ao redor

de um eletrodo ou condutor elétrico pontiagudo ou de menor diâmetro ter maior intensidade se comparado ao campo elétrico ao redor de um eletrodo menos pontiagudo ou de maior diâmetro. Na presença de maiores intensidades de campo elétrico, os processos de ionização são intensificados.

Em suma, mesmo com uma maior distância de separação (8 cm em vez de 5 cm), a suportabilidade de tensão dos espinterômetros com ponta é menor, em função do gradiente de tensão ser maior. O mesmo se aplica na comparação entre os dois arranjos esfera-esfera. No arranjo esfera-esfera maior, o campo elétrico é mais próximo de um campo elétrico uniforme, sendo o gradiente de tensão menor.

Com relação aos arranjos ponta-plano com diferentes polaridades, verificou-se que o valor médio de tensão disruptiva para a configuração com ponta negativa era substancialmente maior: aproximadamente 43% maior que o arranjo com ponta positiva. Isto se deve ao fato de, devido ao campo elétrico ser mais intenso em torno da ponta, na configuração ponta-positiva, elétrons são libertados nesta região e absorvidos pela ponta, deixando uma carga espacial positiva que intensifica o campo elétrico resultante na região entre a ponta e o plano. Por outro lado, na configuração ponta negativa, a carga espacial positiva diminui a intensidade de campo elétrico na direção do plano, dificultando a formação de um canal entre os eletrodos.

O arranjo ponta-ponta apresentou um valor de $U_{50\%}$ intermediário aos valores obtidos para as duas configurações de ponta-plano e mais próximo do valor obtido para a ponta positiva. Em relação aos desvios padrão obtidos, uma análise dos gráficos Figuras 35 e 36 permite constatar uma superposição parcial das regiões de ocorrência de ruptura estimadas para os arranjos ponta positiva-plano e ponta-ponta. Entretanto, na região de superposição, a probabilidade de ruptura do arranjo ponta-ponta é pequena.

O fato de o valor de $U_{50\%}$ obtido para o arranjo ponta-ponta ser maior que o valor obtido para o arranjo ponta positiva-plano pode ser explicado por meio da comparação entre a geometria dos eletrodos. No arranjo ponta-plano, a maior parte do gradiente de potencial está concentrada na região da ponta, enquanto que, no arranjo ponta-ponta, a distribuição de potencial entre os eletrodos é simétrica (desconsiderando as cargas espaciais). Assim, ainda que em ambas as configurações haja campos elétricos relativamente mais intensos

ao redor das pontas, o gradiente de potencial na região próxima à ponta é menor no arranjo ponta-ponta do que no arranjo ponta-plano, devido ao fato de, no arranjo ponta-ponta, a diferença de potencial estar mais uniformemente distribuída entre as duas pontas. Em um arranjo ponta-ponta existem duas regiões que apresentam gradiente de potencial mais elevado, enquanto que em arranjos ponta-plano, apenas a ponta concentra a maior parte do gradiente de potencial.

Uma comparação entre a distribuição de campo elétrico nas duas diferentes geometrias pode ser vista na situação exemplificada e mostrada na Figura 37.

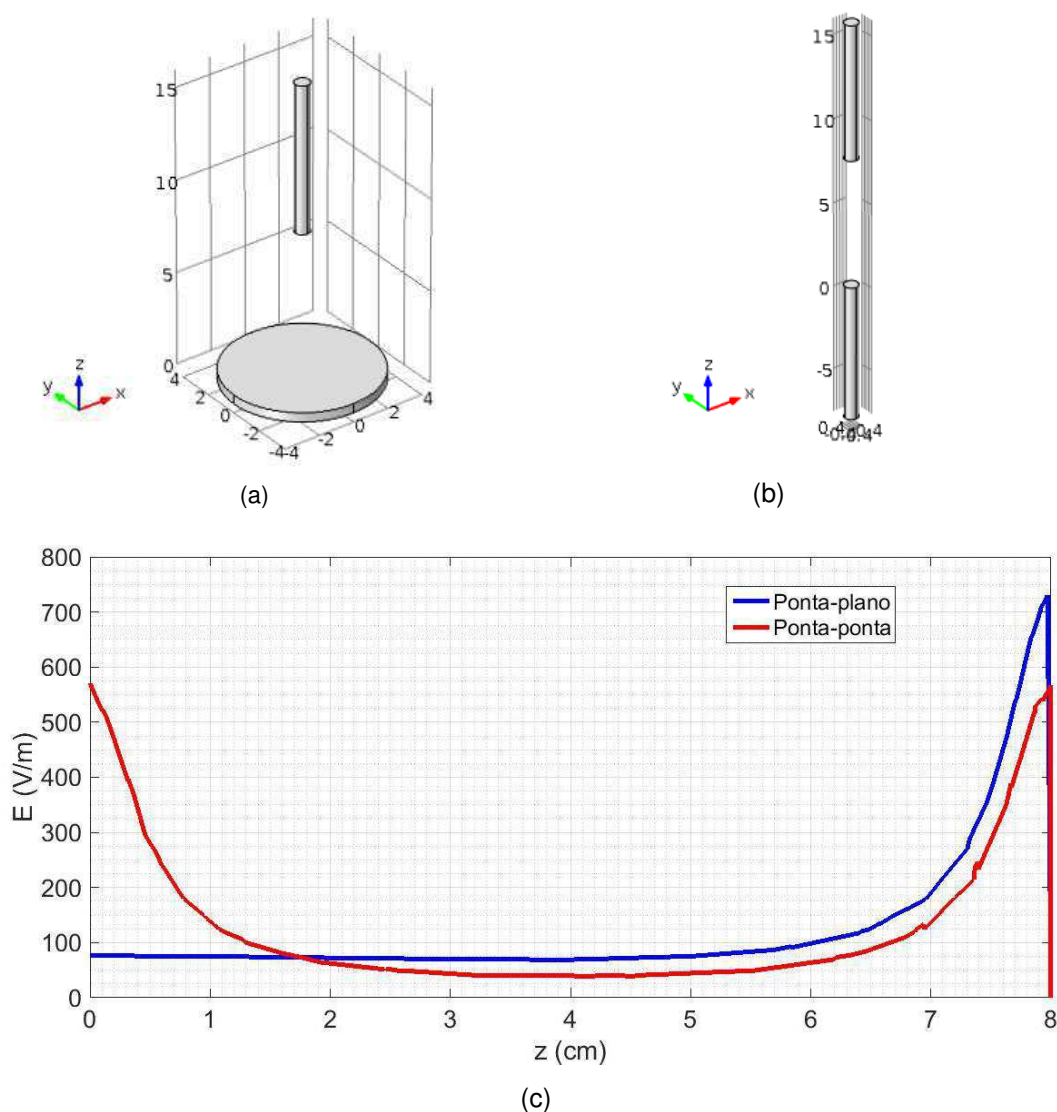


Figura 37 – Exemplos de arranjo ponta-plano (a), ponta-ponta (b) e cálculo de campo elétrico para os dois casos (c).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho, foram analisados métodos estatísticos empregados, no âmbito da Engenharia Elétrica, para o cálculo da distribuição de tensão disruptiva de isolamentos frente a impulsos atmosféricos. Os métodos analisados foram o método de tensão constante e o *Up and Down*.

Os métodos foram utilizados na realização de medições de tensão disruptiva de impulso atmosférico em laboratório, sendo seu desempenho e comportamento face à variação de seus parâmetros estudado por meio de simulações computacionais.

As rotinas desenvolvidas não só simulam experimentos aleatórios como também realizam o cálculo dos parâmetros da distribuição utilizando os respectivos métodos. O desenvolvimento de algoritmos para a obtenção automática dos parâmetros foi essencial ao andamento do trabalho, tendo em vista que a realização dos cálculos de forma manual, ainda que em parte, consumiria tempo excessivo.

Os resultados das simulações evidenciaram que ambos os métodos se mostraram eficazes na estimativa da tensão crítica de descarga de isolamento ($U_{50\%}$) para os diferentes tamanhos de amostra e valores de parâmetros verificados.

Em relação ao método de múltiplos níveis, tendo sido estudados os efeitos da variação do número de níveis empregados e do número de aplicações de tensão por nível, foi possível constatar que, para todos os casos analisados, a precisão obtida no cálculo de $U_{50\%}$, foi elevada. Os valores de erro calculados foram pequenos e decrescentes à medida que o número total de aplicações de tensão é aumentado.

Já no caso do método *Up and Down*, foi constatada a influência que o valor de passo de tensão e tensão inicial escolhidos exercem sobre a estimativa de $U_{50\%}$. Porém, para todos os casos foram verificados altos valores de erro máximo percentual.

No tocante à estimativa do desvio padrão, os erros obtidos foram significativamente maiores se comparados aos respectivos erros obtidos para $U_{50\%}$. Pode-se, então, concluir que a estimativa do desvio padrão é a etapa mais crítica dos métodos.

No método à tensão constante, foram obtidos valores comparativamente menores de erro. Tanto o valor esperado do erro quanto o máximo erro percentual diminuíram com o aumento do número de amostras. Contudo, no método *Up and Down*, enquanto o valor esperado do erro diminuiu com a otimização dos parâmetros, todos os casos estudados apresentaram altos erros máximos percentuais, indicando imprecisão na estimativa do desvio padrão. Foi constatado que a aplicação dos fatores de correção aumentou o erro do valor estimado para o desvio padrão.

Em suma, pode-se concluir que o método de múltiplos níveis apresenta maior precisão e exatidão para a estimativa dos parâmetros da distribuição de tensão disruptiva, além de poder ser utilizado no caso de a distribuição não poder ser considerada normal. Sua desvantagem é o maior número de medições necessário para se obter um nível de confiança satisfatório, o que acarreta em aumento de tempo necessário e custo do teste. O método *Up and Down* tem como vantagem o reduzido número de amostras requerido.

No que diz respeito aos resultados experimentais, foi possível concluir que os resultados obtidos estão em conformidade com os conhecimentos teóricos no âmbito da probabilidade e estatística, eletrostática e descargas em gases.

Os espinterômetros testados, em ordem decrescente de valor de tensão disruptiva de impulso estimada, foram esfera-esfera maior, esfera-esfera menor, ponta negativa-plano, ponta-ponta e ponta positiva-plano.

Os resultados atestam o fato de que tanto a geometria do espinterômetro quanto a distância entre eletrodos e a polaridade da tensão aplicada são fatores determinantes para a distribuição da tensão disruptiva. Temperatura, umidade e pressão atmosférica são também fatores que exercem influência sobre a distribuição de tensão disruptiva e que, no caso de isolamentos ao ar livre, não podem ser controlados.

A preparação e realização de medições em laboratório permitiu ao aluno aprender o princípio de funcionamento e adquirir familiaridade com a operação

do gerador de impulso de tensão do LAT. Foi adquirida experiência acerca da realização de testes em isolamentos e da escolha de parâmetros para os métodos de teste com base em medições preliminares.

A realização deste trabalho permitiu ao aluno organizar conceitos e apresentar de forma contextualizada conhecimentos adquiridos ao longo do curso, tais como os fundamentos de probabilidade e estatística, juntamente com teorias e conceitos discutidos nas disciplinas Equipamentos Elétricos e Dielétricos, disciplina da pós-graduação, além dos conhecimentos referentes ao tema e aos métodos empregados que foram adquiridos no decorrer da própria pesquisa e revisão bibliográfica.

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Realização dos testes estudados em chaves e isoladores;
- Análise do método *Up and Down* estendido;
- Estudo do tempo de ruptura, o qual também possui caráter não-determinístico;
- Estudo da influência das condições do ar atmosférico, temperatura, pressão e umidade, na distribuição da tensão disruptiva;
- Análise da influência da distância sobre a distribuição da tensão disruptiva em eletrodos de mesma geometria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6939/1999 – Coordenação de Isolamento**, 1999.

CONTEÚDO aberto. In: **Wikimedia Commons**. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/Standard_deviation_diagram.svg> Acesso em: 11 set. 2016.

COSTA, E. G. **Estudos básicos: Sobretensões**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 84 f. Notas de aula.

Dixon, W. J. and A. M. Mood, **A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data**, Journal of the American Statistical Association, Vol. 43, 1948, pp. 109-126.

HAUSCHILD, W; MOSCH, W. **Statistical Techniques for High-Voltage Engineering**. Tradução de P. Perkins. Londres: Peter Peregrinus, 1992. 310 p.

KUFFEL, E; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering Fundamentals**. 2. ed. Newnes, 2000. 539 p.

JÄGER, K. **Lexikon der Elektrotechniker**. Berlim: VDE Verlag, 1996.

MEYER, P.L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Tradução de Ruy de C. B. Lourenço Filho. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983. 426 p.

MSPC, **Distribuição Normal**. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/matm/prob_est240.shtml>. Acesso em: 4 set. 2016.

NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. **High Voltage Engineering**. McGraw-Hill, 1996. 372 p.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M.D.P.S. **Tratamento de Dados Experimentais**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2011. 150 f. Apostila.

APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS ESTATÍSTICOS

No decorrer deste trabalho, foram realizadas diversas simulações de eventos e testes estatísticos. Para isto, foi utilizada a plataforma MATLAB®. O primeiro exemplo apresentado foi a simulação da obtenção da frequência relativa de um evento com determinada probabilidade de ocorrência. O algoritmo desenvolvido pode ser visto a seguir.

```
M = 100;           %Criação de números aleatórios entre 1 e 100
N = 50;           %Número de sorteios
p = 0.2;         %Probabilidade desejada

n = 1:1:N;
e = unidrnd(M,1,N);

for k = 1:50
if(e(k) <= p*M)
    a(k)=1;
else
    a(k)=0;
end
end

for k = 1:N
    na(k) = sum(a(1:k));
end

fa = na./n;
hold on;
stairs(fa, 'linewidth', 3);
xlabel('Número de realizações do experimento');
ylabel('Frequência relativa');
```

Foi utilizada a função *unidrnd*, a qual retorna um número aleatório entre 1 e *M*. Também poderia ter sido empregada a função *binornd*, a qual é apresentada a seguir. A frequência relativa é calculada dividindo-se a soma dos resultados pelo número de testes. Em seguida, foi utilizada a função *stairs* para desenhar um gráfico em degraus, tal qual o mostrado na Figura 1.

Em um segundo exemplo, foi simulada a obtenção da função de distribuição empírica de uma variável normalmente distribuída a partir de uma série de dados. Para a obtenção de valores normalmente distribuídos, foi

utilizada a função *normrnd*, a qual fornece números com distribuição normal a partir de um valor esperado e de um desvio padrão especificados. A função *normcdf* retorna os valores da f.d.a analítica com os parâmetros especificados, enquanto que *ecdf* constrói um gráfico da f.d.a. experimental, a partir dos valores gerador por *normrnd*. A rotina desenvolvida é mostrada.

```
x = linspace(1,9,100);  
y = normcdf(x,5,1);  
  
for n = 1:20  
z(n) = normrnd(5,1);  
end  
  
plot(x,y);  
hold on;  
ecdf(z);
```

De modo a simular a realização do teste de múltiplos níveis avaliando o efeito da variação dos parâmetros empregados, foi escrita a rotina apresentada a seguir, a qual retorna o valor médio e o desvio padrão estimados para uma dada distribuição, mediante a especificação de um dado número de níveis, valor da tensão dos níveis e de número de testes realizados por nível.

Para a simulação da realização de experimentos em cada um dos níveis empregados no teste, foi utilizada a função *binornd*, a qual retorna números segundo a distribuição binomial $B(n,p)$, isto é, o número de eventos ocorridos em uma série de n experimentos de Bernoulli com probabilidade de ocorrência p . No caso em estudo, está sendo representado o número de rupturas ocorridos em n experimentos individuais. Há uma suposição implícita de independência entre amostras, já que a probabilidade p de ruptura é a mesma para todos os experimentos individuais realizados no mesmo nível de tensão.

Para a determinação dos parâmetros estimados, foi utilizado o método dos mínimos quadrados, o qual fornece os parâmetros da f.d.a que minimizam o erro quadrático entre esta e os valores obtidos.

```

%Simulação da realização de um teste de múltiplos níveis
clear;

u = 100;           %Parâmetros da distribuição normal que será estimada
dp = 4;           %Valor médio e desvio padrão

n = 30;           %Número de testes realizados por nível
m = 5;           %Número de níveis

v = linspace(92,108,m);      %Tensões para o teste de múltiplos níveis

for k = 1:m
    p(k) = normcdf(v(k),u,dp);
    n_rupturas(k) = binornd(n,p(k));      %Número de rupturas nos n
    testes(variável binomial)
    F_est(k) = n_rupturas(k)/n;          %F.d.a estimada
end

    x = linspace(u-3*dp,u+3*dp, 100);
    plot(x,normcdf(x,u,dp), 'b', 'linewidth', 3);
    hold on;
    plot(v,F_est, '*', 'Color', [0 0.5 0]);
    grid on;
    grid minor;

    uest = linspace(98,102,100);
    dpest = linspace(2,6,100);

for i = 1:100
for j = 1:100
e = normcdf(v,uest(i),dpest(j)) - F_est;
    z(i,j) = e*e';
end
end

[i, j] = find(z == min(z(:)));
u50 = uest(i), dp_est = dpest(j)

plot(x,normcdf(x,uest(i),dpest(j)), '--r', 'linewidth', 3);

legend('Distribuição original', 'Valores obtidos', 'Distribuição
estimada');
xlabel(' v (kV) ');
ylabel(' F(v) ');

clear dpest e i j k n_rupturas uest x z

set(gca, 'FontSize', 20);

```

Para simular a realização do método *Up and Down*, foi escrito o código apresentado a seguir, o qual não apenas simula o experimento, mas também organiza os resultados em forma de tabelas (matrizes) e estima os parâmetros da distribuição utilizando as fórmulas apresentadas.

```

%Simulação da realização de um teste Up and Down
clear;

u = 100;          %Parâmetros da distribuição normal que será estimada:
dp = 4;          %Valor médio e desvio padrão

n = 40;          %Número de tensões aplicadas após a primeira ruptura
du = 4;          %Passo do método

%O teste inicia com uma tensão na qual a ruptura é improvável, por
u0 = 91;

x = u0;          %Valor inicial da tensão
cont = 1;        %Contador para os vetores
inicia = 0;      %variável usada para começar a contagem do teste
k = 0;           %Contador para o número de testes
fim = 0;         %Variável de controle do loop

%Os dados serão armazenados em um vetor v, que armazena os valores das
%tensões aplicadas no teste e um vetor r, que registra a ocorrência ou não
%de ruptura.

while(fim == 0)

    p = normcdf(x,u,dp);      %Probabilidade de ruptura para o valor de
    tensão x

    v(cont) = x;
    r(cont) = binornd(1,p);   %Ruptura é teste de Bernoulli com
    probabilidade p.

    if(r(cont) == 0)          %Se não houve ruptura, a tensão é incrementada
        x = x + du;
    else %Caso contrário, a tensão é decrementada.
        x = x - du;
    end

    if(r(cont) == 1)
        inicia = 1;
    end

    if(inicia == 1);
        k = k + 1;
    end

    if(k == n)
        fim = 1;    % Quebra o laço
    end

    cont = cont + 1; %Incremento no índice dos vetores
end

passeio = zeros(2,cont-1);          %A matriz passeio fornece uma
tabela                             %do passeio aleatório
passeio(1,:) = v; passeio(2,:) = r;

```



```

%Algoritmo para criação da tabela final

v1 = min(v(cont-n:cont-1));
v2 = max(v(cont-n:cont-1));
y = v1:du:v2;
yr(length(y))=0;           %Vetores com o número de rupturas
ynr(length(y))=0;         % e não-rupturas

for i = 1:length(y)       %Contagem do nº de rupturas e não-
rupturas
for j = cont-n:cont-1     %Verificar apenas as tensões após o início da
contagem
if(v(j) == y(i))
if(r(j)==1)
yr(i) = yr(i)+1;
else
ynr(i) = ynr(i)+1;
end
end
end
end

resultado(length(y),3) = 0;
resultado(:,1) = y';
resultado(:,2) = yr';
resultado(:,3) = ynr';

resultado = flipud(resultado)

if(sum(yr) <= sum(ynr))
q = yr;
else
q = ynr;
end

for t = 1:length(q)
if q(t) ~=0
c = t;           %Primeiro valor não-nulo
break;
end
end

a=0; b = 0;
for cont = c+1:length(q)
a = a+(cont-c)*q(cont);
end

for cont = c+1:length(q)
b = b+(cont-c)^2*q(cont);
end

if(q == yr)       %Se o evento é ruptura, o sinal utilizado é negativo
sinal = -1;
else sinal = 1;
end

k = sum(q);

Uest = y(c) + du*(a/k + sinal/2)           %Estimação dos parâmetros
dp_est = 1.62*du*((k*b-a^2)/k^2 + 0.029)

```

Como se pode verificar, foi necessário o desenvolvimento de um código mais elaborado para esta simulação, tendo em vista que o método *Up and Down* utiliza regras mais elaboradas para estimar os parâmetros de uma distribuição a partir de um espaço amostral relativamente pequeno.

Um exemplo de obtenção de resultados pode ser visto na Figura 38.

```

>> TesteUpandDown

passeio =

Columns 1 through 13

    91    95    99   103   107   103    99   103    99    95    99    95    99
     0     0     0     0     1     1     0     1     1     0     1     0     0

Columns 14 through 26

   103    99   103   107   103   107   103   107   103    99   103    99    95
     1     0     0     1     0     1     0     1     1     0     1     1     0

Columns 27 through 34

    99   103    99   103    99    95    99    95
     0     1     0     1     1     0     1     0

resultado =

   107     4     0
   103     7     3
    99     5     6
    95     0     5

Uest =

   100.4286

dp_est =

    3.7585

```

Figura 38 – Resultados da simulação do método *Up and Down*.

Na Figura 38, pode ser vista a evolução do passeio aleatório, com os valores de tensão e as variáveis 1/0 denotando ruptura/não-ruptura. Em seguida, é fornecida uma matriz com os valores dos níveis de tensão obtidos, o número de rupturas na coluna do meio e o número de não rupturas na terceira coluna. Por fim, são retornadas variáveis com os valores dos parâmetros estimados.

APÊNDICE B – LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS OBTIDOS DAS SIMULAÇÕES

Simulações do Método dos Múltiplos Níveis

Tabela 25 – Valores obtidos para $m = 3$ e $n = 20$.

Teste	Frequência relativa por nível			Parâmetros estimados	
	94	100	106	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	1	13	17	98,97	3,900
2	0	11	19	99,69	2,852
3	0	9	19	100,43	3,139
4	1	6	20	100,88	1,684
5	1	10	18	100,15	4,186
6	2	8	20	100,64	2,993
7	1	13	19	98,85	3,110
8	1	7	18	101,36	3,746
9	2	8	16	101,35	5,600
10	2	13	19	98,64	3,745

O gráfico obtido em um dos testes pode ser visto na Figura 39.

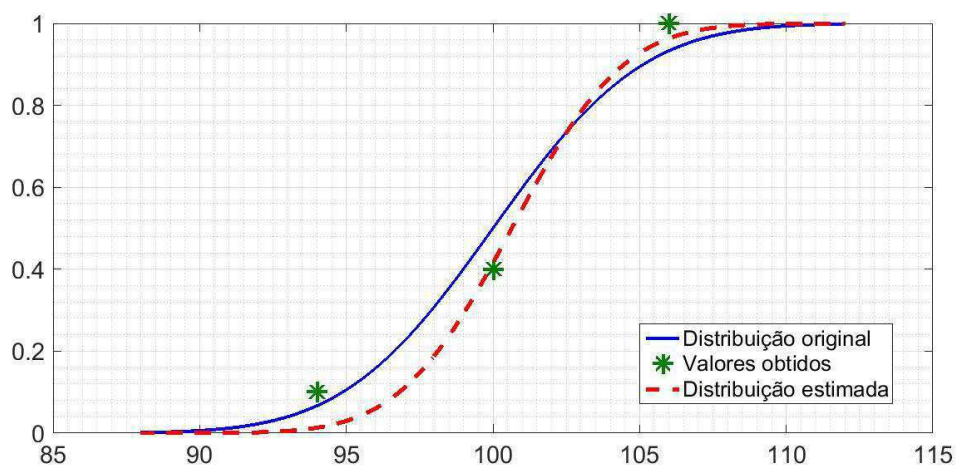


Figura 39 – Gráfico correspondente à linha 6 da Tabela 25.

Tabela 26 - Valores obtidos para $m = 3$ e $n = 30$.

Teste	Frequência relativa por nível			Parâmetros estimados	
	94	100	106	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	2	12	30	100,63	2,623
2	2	15	28	100,47	3,470
3	4	16	29	99,39	4,403
4	3	17	28	99,34	4,258
5	3	10	28	101,31	3,478
6	2	13	27	100,66	4,258
7	0	19	27	99,17	2,533
8	0	18	27	99,36	2,994
9	2	15	27	100,11	4,346
10	0	10	29	101,14	2,641

Tabela 27 – Valores obtidos para $m = 3$ e $n = 50$.

Teste	Frequência relativa por nível			Parâmetros estimados	
	94	100	106	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	6	21	47	100,49	4,297
2	0	23	49	100,27	2,629
3	2	30	47	99,25	3,332
4	3	23	49	100,25	3,338
5	1	21	46	100,77	3,626
6	2	23	46	100,43	3,860
7	3	25	45	100,13	4,282
8	3	17	47	101,26	3,321
9	2	29	48	99,38	3,260
10	2	25	47	100,04	3,651

Tabela 28 – Valores obtidos para $m = 5$ e $n = 20$.

Teste	Frequência relativa por nível					Parâmetros estimados	
	94	97	100	103	106	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	0	6	9	18	19	99,68	3,435
2	0	7	11	16	20	99,31	3,850
3	2	7	7	16	20	99,97	4,325
4	2	5	11	13	18	100,15	5,086
5	1	2	11	18	20	99,78	2,357
6	0	4	9	15	19	100,42	3,647
7	2	5	10	17	19	99,63	3,808
8	2	9	12	14	20	98,78	5,080
9	2	4	12	13	19	100,00	4,557
10	2	7	7	12	20	100,63	5,058

Tabela 29 – Valores obtidos para $m = 5$ e $n = 30$.

Teste	Frequência relativa por nível					Parâmetros estimados	
	94	97	100	103	106	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	1	5	18	21	28	100,04	3,932
2	3	10	15	23	28	99,58	4,721
3	2	6	11	23	28	100,68	3,735
4	1	9	11	26	29	100,06	3,627
5	2	8	12	24	26	100,32	4,374
6	1	10	19	21	27	99,43	4,732
7	1	6	16	27	29	99,61	2,949
8	1	4	17	26	27	99,747	2,854
9	2	5	13	18	27	101,17	4,541
10	3	7	17	26	30	99,34	3,424

Tabela 30 – Valores obtidos para $m = 5$ e $n = 50$.

Teste	Frequência relativa por nível					Parâmetros estimados	
	94	97	100	103	106	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	4	10	26	41	47	99,83	3,636
2	4	14	27	37	44	99,83	4,76
3	5	16	24	39	45	99,73	4,772
4	1	16	28	41	47	99,35	3,893
5	4	11	21	45	44	100,02	3,520
6	5	10	23	42	46	100,03	3,689
7	4	7	23	41	47	100,27	3,258
8	3	9	15	33	49	101,33	3,536
9	2	18	30	40	48	99,04	4,087
10	4	13	21	36	48	100,35	4,308

Um gráfico ilustrativo dos resultados da Tabela 30 pode ser visto na Figura 40.

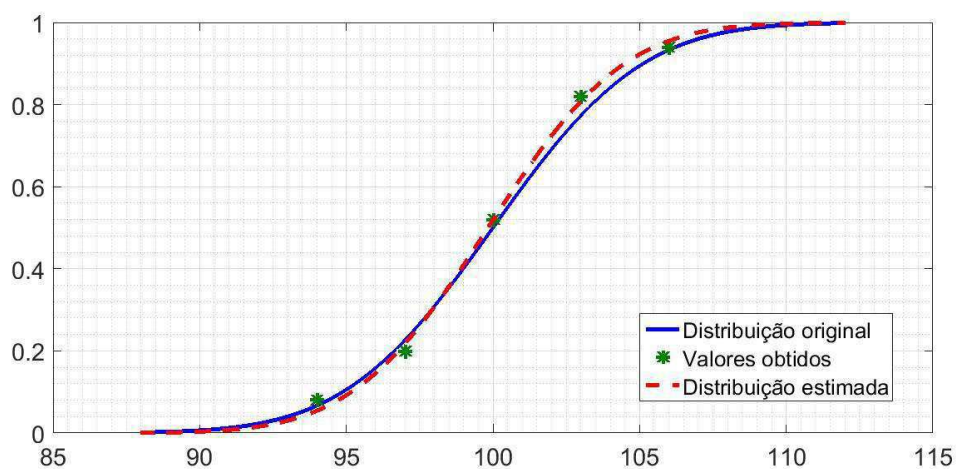


Figura 40 – Gráfico correspondente à linha 7 da Tabela 30.

Tabela 31 – Valores obtidos para $m = 10$ e $n = 20$.

Teste	Frequência relativa por nível										Parâmetros estimados	
	95,5	96,5	97,5	98,5	99,5	100,5	101,5	102,5	103,5	104,5	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	3	6	4	6	6	9	11	14	16	16	100,69	4,449
2	5	5	4	5	11	9	11	16	12	17	100,41	5,057
3	1	7	5	3	7	12	13	16	16	17	100,22	3,661
4	1	4	10	6	9	15	14	13	19	19	99,38	3,651
5	2	7	8	7	8	14	10	14	16	19	99,69	4,681
6	3	4	5	7	10	10	15	16	17	17	99,75	3,708
7	5	3	7	6	11	13	12	15	20	18	99,46	3,780
8	4	5	5	8	9	16	11	15	13	16	99,79	5,178
9	2	3	5	4	6	12	13	15	16	17	100,42	3,424
10	1	5	5	8	8	9	15	13	18	17	100,06	3,853

Tabela 32 – Valores obtidos para $m = 10$ e $n = 30$.

Teste	Frequência relativa por nível										Parâmetros estimados	
	95,5	96,5	97,5	98,5	99,5	100,5	101,5	102,5	103,5	104,5	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	5	6	6	9	14	17	15	22	25	25	100,29	4,134
2	3	9	8	14	17	12	17	22	26	24	99,90	4,742
3	4	6	6	8	15	17	20	15	28	27	100,20	3,850
4	3	5	9	12	13	14	17	20	23	26	100,36	4,432
5	4	8	6	13	10	19	21	24	24	28	99,75	3,700
6	2	10	6	10	19	16	22	21	26	25	99,65	3,984
7	6	10	8	8	11	19	20	18	25	24	100,09	4,887
8	4	6	7	9	11	22	23	21	24	27	99,82	3,543
9	5	7	4	8	14	17	20	20	22	24	100,38	4,315
10	3	5	8	9	13	14	19	23	24	29	100,18	3,546

Tabela 33 – Valores obtidos para $m = 10$ e $n = 50$.

Teste	Frequência relativa por nível										Parâmetros estimados	
	95,5	96,5	97,5	98,5	99,5	100,5	101,5	102,5	103,5	104,5	$U_{50\%}$	σ_{est}
1	9	7	17	17	21	22	37	39	43	46	99,88	3,689
2	6	8	15	17	27	27	31	42	42	42	99,80	3,787
3	4	14	10	17	25	32	35	39	35	47	99,76	3,803
4	5	9	17	13	23	32	30	38	39	45	99,96	3,881
5	3	13	11	17	29	24	33	38	37	41	100,04	4,227
6	9	9	17	17	22	29	30	39	42	42	99,86	4,206
7	4	8	14	16	27	30	29	39	38	44	99,97	3,889
8	5	17	8	22	22	21	33	38	42	43	100,01	4,139
9	6	7	17	16	29	33	33	33	40	42	99,76	4,188
10	9	15	8	20	27	26	32	40	34	44	99,86	4,550

Um gráfico ilustrativo dos resultados da Tabela 33 pode ser visto na Figura 41.

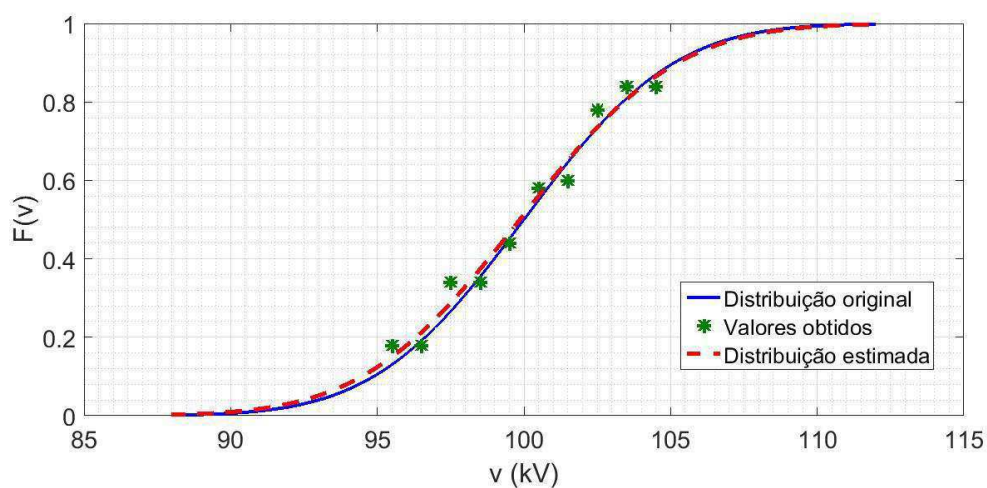


Figura 41 – Gráfico ilustrativo dos resultados da linha 6 da Tabela 33.

Simulações do Método *Up and Down*

Nas tabelas seguintes, são apresentados os resultados das simulações realizadas para o método *Up and Down*. Para cada configuração de parâmetros, o método foi aplicado 10 vezes.

Tabela 34 – Simulações do método *Up and Down* com $\Delta U = 2$ kV e $n = 30$.

Teste	1	2	3	4	5
U[*]_{50%}	100,47	99,67	98,14	101,57	101,57
s[*]	2,888	3,406	2,739	4,458	4,921

Teste	6	7	8	9	10
U[*]_{50%}	97,29	100,6	101,86	100	101,13
s[*]	5,119	2,340	2,276	3,218	2,456

Tabela 35 – Simulações do método *Up and Down* com $\Delta U = 4$ kV e $n = 30$.

Teste	1	2	3	4	5
U[*]_{50%}	99,73	100	99,47	99,14	98,29
s[*]	3,183	1,114	2,665	4,056	2,701

Teste	6	7	8	9	10
U[*]_{50%}	98,93	100,53	100,8	100,86	99,71
s[*]	4,047	2,6647	2,089	4,056	3,395

Tabela 36– Simulações do método *Up and Down* com $\Delta U = 5$ kV e $n = 30$.

Teste	1	2	3	4	5
U[*]_{50%}	100,5	98,83	97,83	101,17	99,83
s[*]	4,339	3,979	2,899	2,899	2,251

Teste	1	2	3	4	5
U[*]_{50%}	98,17	100,36	100,71	101,43	99,83
s[*]	2,251	3,376	4,409	2,756	5,491

Tabela 37 – Simulações do método *Up and Down* com $\Delta U = 6$ kV, $n = 30$.

Teste	1	2	3	4	5
$U^*_{50\%}$	100,29	98,60	101	100,60	98,60
s^*	3,307	2,183	3,738	3,479	6,071

Teste	6	7	8	9	10
$U^*_{50\%}$	99,80	101	101,4	100,60	101
s^*	3,997	6,330	2,615	3,479	5,034

Tabela 38 – Simulações do método *Up and Down* com $\Delta U = 4$ kV, $n = 30$ e $U_0 = 88$ kV.

Teste	1	2	3	4	5
$U^*_{50\%}$	100,57	101,71	100,67	98,57	100,4
s^*	2,601	3,395	3,356	7,461	4,335

Teste	6	7	8	9	10
$U^*_{50\%}$	101,2	99,143	100,93	101,73	100,13
s^*	5,545	3,362	2,319	3,183	1,801

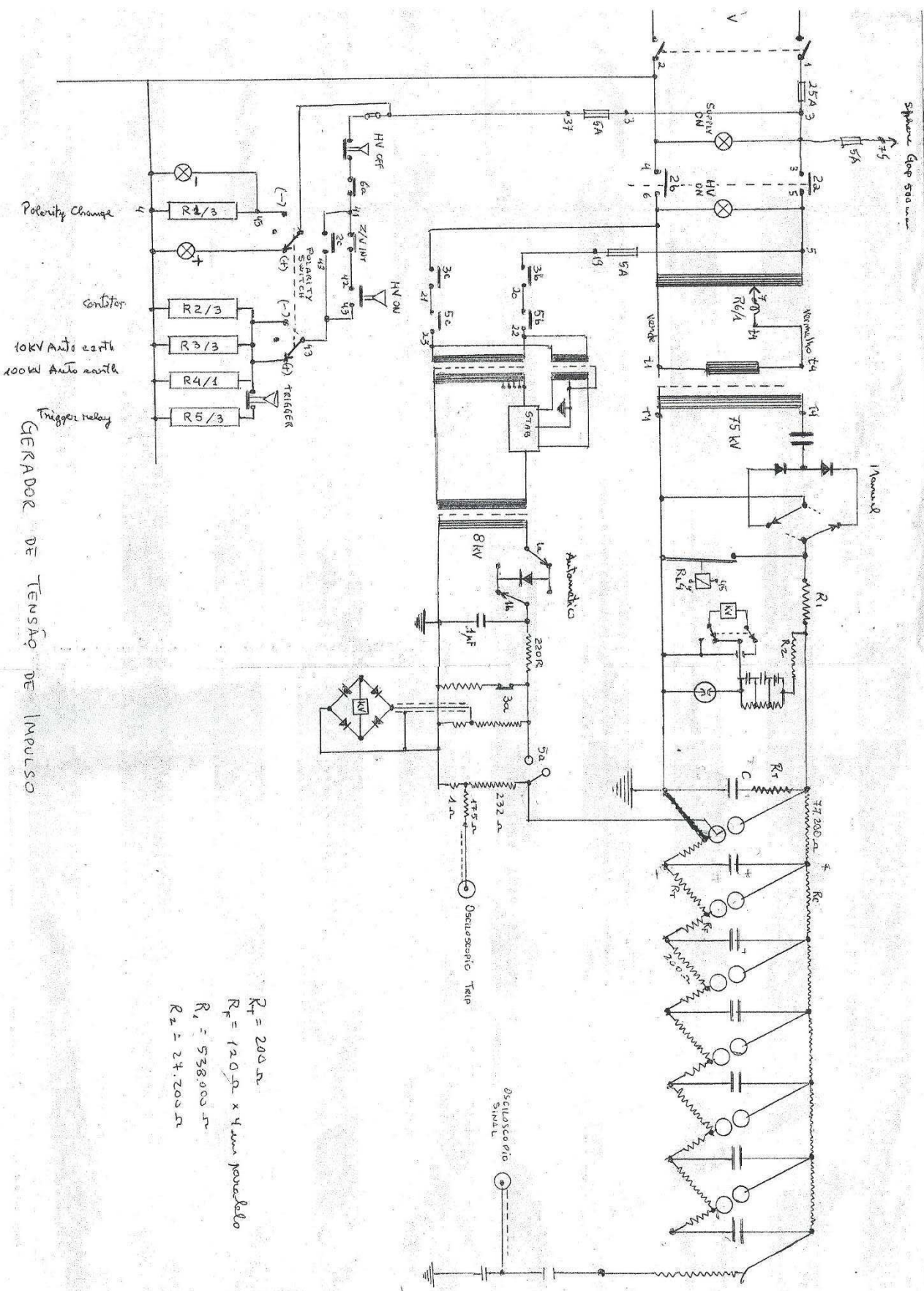
Tabela 39 – Simulações do método *Up and Down* com $\Delta U = 4$ kV e $n = 50$.

Teste	1	2	3	4	5
$U^*_{50\%}$	101,04	101,84	99,17	99,83	100,5
s^*	3,962	3,029	6,927	4,497	4,407

Teste	6	7	8	9	10
$U^*_{50\%}$	99,36	100,48	99,50	101,12	101,16
s^*	4,169	2,946	2,517	3,568	4,066

ANEXO A – DIAGRAMA DO CIRCUITO DO GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO

Este anexo apresenta o diagrama do circuito do gerador de impulso de tensão, incluindo os circuitos de comando. O diagrama foi desenhado pelo professor Faustino, com base no manual do equipamento.



$R_T = 200 \Omega$
 $R_F = 120 \Omega \times 4 \text{ em paralelo}$
 $R_1 = 538.000 \Omega$
 $R_2 = 24.200 \Omega$