

A primeira lei da natureza é a tolerância - já que temos todos uma porção de erros e fraquezas.

(Voltaire)

Aos pais,

"... se eu pudesse fazê-los eternos, eternos eu os faria".

"As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain, as far as they are certain, they do not refer to reality."

(Albert Einstein)

De fato, em algum lugar há muito tempo, algumas palavras assentaram as inquietas decisões quanto aos rumos tomados nos momentos de dúvidas interiores, por uma de duas partes de um convívio que não mais chegou a acontecer. Mesmo agora, seria injusto negar a importância de tal influência para o ponto presente, mesmo que não se tenha, por um motivo ou outro, acompanhado os frutos então resultantes .

*Aos meus pais, Sebastião e Cleusa, à Conceição, à Clécia, Crerlei, aos sobrinhos
Karla, Eduarda, Carlos Eduardo e Marcos Vinícius.*

À

Danilo, Edílson, Juliano, Paulo, Rodrigo, Rogério, e dona Maria; Alexandre, Felipe, Fernando, João Paulo, Rafael e Reni.

A João Cândido Corrêa, Williender Claiton Garcia, Marcílio de Moraes Brito, Érick Alessandro Shikasho, Edvaldo Francisco dos Santos, Joana Lopes da Silva, Antônio Duarte Figueira, Gilvan Damiani Brogini, comadre Lídia e compadre Onofre, aos Zebras.

Ao Laboratório de Alta Tensão da EFEI.

Pelas palavras duras como a realidade costuma ser, pela oportunidade, por - lá no início - ter acreditado mesmo duvidando, pelas inúmeras demonstrações de ética, pela exposição ao mundo e do mundo real. Pelas orientações que somente um pai daria. Muito obrigado Manuel Luis Barreira Martinez.

RESUMO

A utilização segura e eficiente de qualquer dielétrico gasoso exige o conhecimento do seu comportamento elétrico e de seus processos físicos. Dentre os dielétricos gasosos o mais utilizado em redes de potência de média e alta tensão é, sem sombra de dúvidas, o ar. O motivo de tal reside no fato do mesmo ser abundante, de graça e de se reconstituir depois da ruptura. No entanto, seu comportamento elétrico sofre alterações em função das variações climáticas e, conseqüentemente, nos valores de tensão de ruptura e de desvio padrão. O estudo de tais influências é realizado por meio de um trabalho tipicamente experimental partindo de resultados de ensaios realizados sob condições ambientais variadas.

O fator de correção de umidade para os ensaios de impulso atmosférico firmado em normas nacionais e internacionais é um objeto de constante discussão. Atualmente existe algum acordo relativo à proposta estabelecida pela IEC 60. Porém, considerando, principalmente, pequenos espaçamentos em ar que são típicos dos equipamentos e sistemas em média tensão, há pouca informação sobre a eficácia das propostas de norma.

Este trabalho tem como principal meta investigar a influência da umidade nos ensaios de impulso atmosférico, em relação ao valor crítico e ao desvio padrão. Sendo assim, tem-se por objetivo, levantar curvas capazes de representar a tendência do comportamento da tensão em função da umidade para os vários sistemas de eletrodos simplificados. Deste modo, o primeiro passo é analisar, utilizando uma ferramenta estatística, uma série de resultados de ensaios em eletrodos padrão, ou seja, *Haste-haste* e *Esfera-esfera*, e a partir desta análise definir um conjunto de curvas de tendência para melhorar a correção dos resultados dos ensaios de impulso atmosférico.

Os ensaios foram executados com o gerador de impulsos HAEFELY 1.2kJ - 450kV do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. Várias séries de ensaios foram repetitivamente realizadas de modo a determinar quais são os parâmetros suficientes para a determinação das características de um isolamento em ar, bem como qual a influência das condições ambiente nos resultados dos ensaios de Impulso Atmosférico. Para a faixa de tensão na qual se realizou o estudo, determinou-se a utilização da conexão 3s-2p, que apresenta, entre as outras conexões a maior eficiência na faixa entre 30 [kV] e 180 [kV]. Utilizou-se os eletrodos básicos posicionados no interior da Câmara de Névoa Salina – Câmara Climática, onde condições específicas de umidade são estabelecidas, bem como foram aproveitadas as condições naturais do próprio laboratório. Os resultados dos ensaios foram estatisticamente analisados por meio de um *software* desenvolvido no *LAT-EFEI*, especificamente para este fim, onde não foi considerado nenhum fator de correção de umidade.

Objetivando verificar o proposto em norma, foram realizados ensaios sistemáticos para comprovação utilizando-se os mesmos tipos de eletrodos utilizados no levantamento dos parâmetros. O método de ensaio utilizado, o Método dos Acréscimos e Decréscimos que tem sua validade amparada pela NBR6936 / abril -1992 de Técnicas de Ensaio de Alta Tensão da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. A análise dos resultados desses ensaios através do desvio padrão da tensão disruptiva corrigida, sugere que um melhor fator de correção de umidade pode ser obtido para ensaios de impulso atmosférico.

ABSTRACT

The safe and efficient utilization of any dielectric gas asks for the knowledge of its electric behaviour and its physics process. Among all the known dielectric gases the most utilized in the medium and high voltage systems is the air. It is due to the fact of the air is an abundant and free resource, and it recovers after flashover. However, its electric behaviour changes with weather conditions, and, in consequence, there is a variation on the values of breakdown voltage and standard deviation. The analyses of the influence of the weather conditions are a typical experimental task, where the results are obtained from different environmental conditions.

The humidity correction factor to lightning impulse tests as stated in national and international standards is still under consideration. Nowadays, there is an agreement related to the purpose established by IEC 60. Therefore, considering small spaces that are common in high voltage equipments applied to medium voltage systems, there is lack of information about the accuracy presented by information proposed in the standards.

This dissertation aims to investigate the humidity influence in the lightning impulse tests, observing the critical value and the standard deviation. Taking this in account, the goal is to obtain tendency curves able to represent the voltage behaviour with the humidity to some basic electrodes. Then, the first step is to analyse, using a statistic tool, some results obtained in tests carried out in basic electrodes, i.e., rod-rod and sphere-sphere spacing, and, after this, define a set of tendency curves to improve the lightning testing results correction.

The tests were carried out in the High Voltage Laboratory Impulse Generator HAEFELY 1,2kJ – 450kV at Federal University of Itajubá. A set of tests was repeatedly performed in order to verify which of the parameters are necessary to define the features in air insulation, as well as the environmental influences in the lightning tests results. To the voltage range used in the tests, it was chosen the 3s-2p connection, which presents the best efficiency in the range of 30 [kV] to 180 [kV]. The test were carried out with the basic electrodes inside the climatic room, where it can be established specific conditions of humidity, as well as the environmental conditions of the laboratory can be utilized. The results were statistically analysed by software developed at LAT-EFEI, where it was not considered any humidity correction factor.

In order to compare the present approach with standard one, it were carried out systematic tests on the same. The utilized method, Up-and-Down Method validated by NBR6936/ April 1992 – ABNT (Brazilian Association of Technical Standards) High Voltage Test Techniques.

The analysis of the tests results up to this moment, taking in account the standard deviation of the corrected breakdown voltage, suggest that a better humidity correction factor can be obtained to lightning impulse tests.

ÍNDICE

RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	VII
NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA	X
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XV
1 – INTRODUÇÃO	1
2 - DIELÉTRICOS GASOSOS	3
2.1 - INTRODUÇÃO.....	3
2.2 – COMPORTAMENTO DOS GASES SOB CAMPO ELÉTRICO ZERO.....	3
2.3 PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS.....	5
2.3.1 <i>Ionização por Colisão (Ionização por Impacto)</i>	7
2.3.2 <i>Foto - ionização (Ionização por radiação)</i>	8
2.3.3 <i>Ionização Térmica</i>	8
2.3.4 <i>Separação de Elétrons</i>	8
2.3.5 <i>Processos Catódicos</i>	9
2.4 PROCESSOS DE DESIONIZAÇÃO.....	9
2.4.1 <i>Difusão</i>	10
2.4.2 <i>Recombinação</i>	10
2.4.3 <i>Captura de Elétrons</i>	11
2.5 RUPTURA DE GÁS EM CAMPO UNIFORME.....	11
2.5.1 <i>Modelo de Townsend</i>	12
2.5.2 <i>Modelo dos Canais Condutores (Streamers)</i>	15
2.5.3 <i>Lei de Paschen</i>	17
2.6 RUPTURA DE GÁS EM CAMPO NÃO-UNIFORME.....	18
2.6.1 <i>Início de Corona</i>	19
2.6.2 <i>Corona</i>	20
2.6.3 <i>Ruptura em Gaps de Campos Não-Uniformes</i>	23
2.7 TEMPO PARA RUPTURA.....	24
2.7 DESCARGAS SOB IMPULSOS DE TENSÃO DE NANO SEGUNDOS.....	25
2.8 TIPOS DE CENTELHADORES DE DESCARGAS.....	26
2.9 ESCOLHA DE GASES DIELÉTRICOS.....	28
2.10 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 2.....	30
3 – ISOLAMENTO EM AR	31
3.1 – UTILIZAÇÃO DE ISOLAMENTO EM AR E SUA MODELAGEM PARA ENSAIOS.....	31
3.2 – SOLICITAÇÕES DE TENSÃO.....	32
3.3 – PROBABILIDADE DE RUPTURA FRENTE A IMPULSOS.....	32
3.4 – CARACTERÍSTICAS DA TENSÃO DE RUPTURA.....	33
3.4.1 <i>Eletrodos Básicos</i>	34
3.4.2 <i>Centelhadores Haste-plano</i>	34
3.4.3 <i>Efeito da Forma dos Eletrodos</i>	36
3.4.4 <i>Influência da Forma do Impulso</i>	37
3.4.5 <i>Influência dos Parâmetros Atmosféricos</i>	40
3.4.6 <i>Influência da Presença de Partículas de Areia ou Pó</i>	42
3.5 CURVA TENSÃO-TEMPO E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO.....	47
3.6 DESCARGAS FASE-FASE.....	50
3.7 ARCO DE POTÊNCIA.....	52
3.8 EFEITOS INDESEJÁVEIS DO CORONA.....	53

<u>3.8.1 Perdas por Corona</u>	53
<u>3.8.2 Ruído Audível</u>	54
<u>3.8.3 Radio-interferência</u>	55
<u>3.8.4 Interferência em Televisão</u>	60
3.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3	62
4. GERAÇÃO DE TENSÕES IMPULSIVAS	65
4.1 O IMPULSO ATMOSFÉRICO	65
4.2 O GERADOR DE IMPULSOS	66
<u>4.2.1 Circuitos para o Gerador de Impulso Haefely 1,2 [kJ], 450 [kV] do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá</u>	72
4.3 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 4	76
5. MÉTODOS DE ENSAIO & ANÁLISE ESTATÍSTICA	77
5.1 MÉTODOS DE ENSAIO	77
5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	78
<u>5.2.1. Exemplo de Aplicação</u>	79
5.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5	83
6. MÉTODO PROPOSTO – ENSAIOS E DESENVOLVIMENTO	84
6.1 CORREÇÃO DE UMIDADE SEGUNDO IEEE STD. 4 – 1995 E IEC 60.1 –1989	84
6.2. O MÉTODO PROPOSTO	86
<u>6.2.1. Os Ensaios</u>	86
<u>6.2.2. Curvas de Tendência</u>	89
6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6	98
7. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	99
7.1 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NOS ELETRODOS ESFERA-ESFERA	99
7.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NOS ELETRODOS HASTE-HASTE	99
7.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS AO SISTEMA SPACER	102
7.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR DE PINO	104
7.5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NA CHAVE SECCIONADORA	105
7.6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR DE SUSPENSÃO	105
7.7 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR POLIMÉRICO	107
7.8 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR PILAR	108
7.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 7	109
8. ANÁLISE DAS FORMAS DE CORRENTE DOS IMPULSOS	110
8.1 FORMAS DE CORRENTE PARA OS ELETRODOS ESFERA-ESFERA	110
8.2 FORMAS DE CORRENTE PARA OS ELETRODOS HASTE-HASTE	116
8.3 FORMAS DE CORRENTE PARA UM SISTEMA SPACER	121
8.3 FORMAS DE CORRENTE PARA O ISOLADOR DE PINO PI33255	123
8.4 FORMAS DE CORRENTE PARA UMA CHAVE SECCIONADORA	126
8.5 FORMAS DE CORRENTE PARA UM ISOLADOR DE SUSPENSÃO	128
8.6 FORMAS DE CORRENTE PARA UM ISOLADOR POLIMÉRICO	130
8.7 FORMAS DE CORRENTE PARA UM ISOLADOR PILAR	133
9. COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES	136
9.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 9	139
10 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS COMPLEMENTARES	140
11 – BIBLIOGRAFIA GERAL	141
11.1 – BIBLIOGRAFIA GERADA POR ESTE TRABALHO	141
11.2 BIBLIOGRAFIA GERAL	142

NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

An – 75,2 para $n = 1$ e 2 e = 67,9 para $n \geq 3$.

A⁺ - íon positivo.

A⁻ - íon negativo.

B_n – 0 para $n = 1$ e 2 e = 1 para $n \geq 3$.

C – Constante resultante do produto pressão x volume.

CFO – Tensão disruptiva crítica.

COV - Coeficiente de variação da tensão disruptiva ($\sigma/U_{50\%}$).

C₁ – Capacitor de Carga do Gerador.

C₁ – Capacitor de impulso.

C₂ – Capacitor de carga.

C₂ – Capacitor de Surto ou de Impulso.

D – Constante de difusão.

D – Descarga.

D – Diâmetro do feixe de sub-condutores.

D – Diodo Retificador para Fonte de Tensão.

D – Distância diferente da distância de referência de 15 metros

DP – Descarga parcial.

D_s – Diâmetro do sub-condutor [cm].

D_{tm} – Distância da linha ao ponto de medida [m].

D_i – distância entre fase i e ponto de referência de medida.

D₀ – Distância de referência [15m].

d – Distância entre eletrodos.

d – Distância do anodo.

E – Campo elétrico.

E – Gradiente de tensão na superfície do condutor [kV/cm].

E – Tensão.

EMI – Interferência eletromagnética.

E_i – Máximo gradiente de tensão para o sub - condutor i .

E_c – Campo elétrico crítico.

E_{max} – Gradiente máximo na superfície dos condutores.

E₀ – Campo eletrostático aplicado.

E_s – Campo devido às cargas espaciais.

e⁻ - Elétron.

f_p – frequência do fóton.

G₁ – Centelhador de Disparo.

- G₂** = Espaçamento para Medir Tensão de Crista.
- g** – função que fornece os valores de m e w.
- g_{mi}** – Máximo gradiente do condutor na superfície da fase i.
- H** – Altura do condutor até o solo.
- H** – Umidade absoluta do ar.
- h** – Constante de Planck = $6,6257 \times 10^{-34}$ J.s.
- hf_p** – Constante de Planck .
- I_m** – Amplitude máxima do pulso de corrente.
- I₀** – Corrente inicial do catodo.
- I²R** – Perdas por efeito joule.
- J** – Constante de perdas $7,04 \times 10^{-10}$ para linhas de 400 kV, $5,35 \times 10^{-10}$ para linhas de 500 e 700 [kV].
- J** – Taxa de fluxo de carga.
- K** – $1 + 0,014[H/\delta - 1]$.
- K** – Constante de Boltzmann = $1,3806 \times 10^{-23}$ K.
- K** – Fator de forma.
- K_h** – Fator de correção de umidade.
- K_n** – 7,5 para **n** = 1, = 2,6 para **n** = 2 e = 3 para **n** ≥ 3.
- k** – número total de impulsos.
- k₁** – Fator de correção da densidade do ar.
- k₂** – fator de correção de umidade.
- L** – Indutância.
- L₁** – Indutância Interna do Gerador.
- L₂** – Indutância da Carga.
- L₃** – Indutância das Conexões.
- M** – Massa.
- m** – Expoente dependente da geometria do eletrodo, distância entre eletrodos e forma do impulso de tensão aplicado.
- m** – número de aplicações.
- m_e** = massa do elétron.
- m_s** – Fator de irregularidade da superfície.
- NA** – Nível de ruído audível.
- N_p** - Número de pares de moléculas.
- NP_a** – Nível de ruído audível da fase A.
- NP_b** – Nível de ruído audível da fase B.
- NP_i** – Nível de ruído audível para cada fase i.
- NP₀** – Nível de ruído audível para a frequência de 500 kHz.
- N₀** – Número de Avogadro: número de moléculas em um mol $6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol.

- n** – Número total de condutores no feixe.
- n** – Número de sub-condutores por fase.
- n₀** – Concentração inicial.
- n_c** - Número crítico de elétrons ou íons.
- n_d** – Número de elétrons que alcança o anodo a uma distância do anodo.
- n_k** – Número de kilomoles de um gás.
- n_s** - Número de elétrons secundários produzidos no catodo por segundo.
- n_t** - Número total de elétrons deixando o catodo por segundo.
- n_x** – Número de elétrons a uma distância x do catodo.
- n₊** - Concentração de íons positivos.
- n₋** - Concentração de íons negativos.
- P** – Pressão atmosférica atual em mbar.
- P** – Pressão de um gás.
- P_{FW}** – Perdas trifásicas por corona sob condições de tempo bom [kW/km].
- P_L** – Perdas totais por corona.
- P₀** – Pressão atmosférica padrão ao nível do mar = 101,3 mbar.
- QP** – Quase pico.
- q** = número quântico (número inteiro).
- R** – Constante universal dos gases [8314 J/°K].
- R** – Raio do condutor.
- R** – Resistência de arco.
- R** – Taxa de chuva [mm/h].
- R₀** = Resistência do Divisor de Tensão para o Acoplamento do Osciloscópio.
- R₁** – Resistência de amortecimento.
- R₁** – Resistência Série ou de Frente.
- R₂** – Resistência de descarga.
- R₂** – Resistência Paralela ou de Cauda.
- R'₂ – R₂** Posicionado do lado do Gerador
- RI** – Nível de radiointerferência.
- r** – raio da haste.
- r** – Raio do condutor [cm].
- r₁** – Raio da molécula.
- r₂** – Raio da molécula.
- r_d** – Deslocamento médio.
- S** – Centelhadores.
- S(t)** – Intensidade instantânea de ruído gerada por meio de corona.
- T** – Intervalo de tempo entre T_f e T_c.

- T** – Temperatura.
- T₀** – Temperatura ambiente padrão = 20°C.
- T₀** – Temperatura inicial.
- T_a** – Temperatura ambiente atual em °C.
- T_{BD}** – Tempo até a ruptura.
- T_b** – Tempo de ruptura.
- T_c** – Tempo até meio valor ou de cauda.
- T_{dex}** – Tempo de desexitação.
- t_{50%}** - Tempo de cauda do impulso.
- T_e** – Tempo de impulso do elétron.
- T_f** – Tempo de frente.
- t** – Tempo total de atraso ($t_s + t_f$).
- t_{cr}** – Tempo crítico até a crista.
- t_{cr}** – Tempo de frente crítico ou tempo de crescimento.
- t_f** – Tempo formativo.
- t_s** – Tempo estatístico.
- U** – Tensão disruptiva.
- U** – Tensão eficaz da linha [kV].
- U_{0%}** - Tensão Suportável Garantida - amplitude de impulso para qual ocorre ruptura.
- U_{100%}** - Tensão Não Suportável Garantida valor de impulso para o qual ocorre ruptura.
- U_{50%}** - Tensão Disruptiva Crítica de 50% de probabilidade de ruptura.
- U₅₀^x** - U_{50%} para uma configuração x de eletrodos em ar.
- U₅₀^{P-P}** – U_{50%} para a configuração de eletrodos haste – plano.
- U_c** – Tensão de início de corona.
- U_E** – Tensão disruptiva corrigida para as condições atmosféricas padrão.
- U_i** – Tensão de ruptura de impulso.
- U_n** – Tensão de operação.
- U_s** – Tensão disruptiva para um valor particular do produto pd.
- U⁻** - Impulso negativo.
- U⁺** - Impulso positivo.
- V** – Fonte de Tensão Alternada.
- v** – Volume de um gás.
- v₀** – Volume inicial de um gás.
- V** - Velocidade das moléculas de um gás.
- V_r** - Velocidade relativa das moléculas de um gás.
- V_p** - Velocidade mais provável da molécula de um gás.

V_{ef} - velocidade efetiva da molécula de um gás.

\bar{V} - Velocidade média da molécula de um gás.

v_e = velocidade do elétron.

\bar{V}_n - Gradiente de concentração de carga.

v_e – Velocidade do elétron na avalanche.

W – Suportabilidade.

W_1 – energia do átomo.

W_2 – energia do átomo.

W_t – Energia térmica.

w – Expoente similar a m .

x – Distância do catodo.

X_c – Comprimento crítico da avalanche.

α - Primeiro coeficiente de ionização de Townsend.

γ - Segundo coeficiente de ionização de Townsend.

ΔU – U_i – U_s .

$\Delta\omega$ - Faixa de freqüência.

ΔU – Faixa de tensão

Δt – Intervalo entre dois impulsos.

δ - Densidade relativa do ar.

δ - Seção transversal efetiva da molécula.

λ - Caminho livre.

$\bar{\lambda}$ - Caminho livre médio.

σ_a – Captura de elétron pelo SF_6 .

σ - Desvio padrão da tensão disruptiva.

τ_1 – Constante de frente.

τ_2 – Constante de cauda.

ω_0 – Freqüência centra [rad/s].

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Função de distribuição de Maxwell para velocidades moleculares. (Ref. 1 © Wiley, 1971).....	5
Figura 2.2 – O principal processo responsável pela produção de partículas carregadas na descarga do gás.....	6
Figura 2.3 – Os vários processos possíveis de descarga em isolamento a gás.....	11
Figura 2.4 - Circuito experimental para o estudo das descargas em gases segundo Townsend.....	12
Figura 2.5 – O desenvolvimento de uma avalanche para um canal ionizado em um campo uniforme (+ = íons positivos, - = elétrons, F = fótons emitidos da avalanche).	15
Figura 2.6 – Curva de Paschen para o ar.....	18
Figura 2.7 – Ciclo de corrente alternada com várias formas de corona possíveis.....	20
Figura 2.8 – Avalanche de corona negativo.....	21
Figura 2.9 – Corrente de corona negativo (pulsos de Trichel).....	21
Figura 2.10 – Corrente de brilho de corona negativo.....	22
Figura 2.11 – Avalanche de corona positivo: (a) avalanche em progresso; (b) avalanche em pausa.....	23
Figura 2.12 – Corona e tensão disruptiva em função do espaçamento para eletrodos Esfera–plano.....	24
Figura 2.13 – Componentes do tempo de atraso sob tensão em degrau.....	25
Figura 2.14 – Arranjo de eletrodos.....	27
Figura 2.15 – Típica descarga de corrente entre eletrodos.....	28
Figura 3.1 – Distribuição normal da probabilidade da tensão de ruptura.....	34
Figura 3.2 – U50% tensão de ruptura como função do espaçamento utilizando as várias fórmulas mencionadas na Tabela 3.2. Números entre parênteses indicam a referência.....	35
Figura 3.3 – Característica da tensão disruptiva para eletrodos Haste-plano.....	38
Figura 3.4 – Característica da tensão de ruptura para Haste-haste.....	38
Figura 3.5 – Influência do tempo de frente do impulso na tensão de ruptura de eletrodos haste-plano positiva.....	39
Figura 3.6 – Valor dos expoentes m e n nas equações (3.13) e (3.14) de acordo com IEC 60-1.....	41
Figura 3.7 – O valor relativo entre U50% de espaçamento poluído (UP) e o U50% de espaçamento limpo (UC) como função da distância entre eletrodos sob impulsos negativos para estudos de geometria assimétrica.....	43
Figura 3.8 - O valor relativo de U50% para espaçamento poluído (UP) e U50 para espaçamento limpo em função da distância entre eletrodos sob impulsos para haste-haste.....	45
Figura 3.9 – O valor relativo de U50% de espaçamento poluído (UP) com o U50% de espaçamento limpo de d/D sob impulsos de manobra (D=diâmetro da esfera, d=distância entre eletrodos).....	46
Figura 3.10 – Arranjo de Coordenação de Isolamento: (a) esquema de proteção, (b) Curva V-t para uma boa condição de isolamento.....	48
Figura 3.11- Influência de partículas de pó na característica V-t para eletrodos de múltiplas hastes.....	49
Figura 3.12 – Os circuitos equivalentes: (a) Arco em Corrente Contínua e Corrente Alternada durante período de condução, (b) Arco em Corrente Alternada durante o período de extinção [35].....	53
Figura 3.13 – Previsão de Indução Eletromagnética em Linhas de Transmissão para Tipos de Faixas de Tempo (Ref. 41 © IEEE, 1973).....	58
Figura 3.14 – Espectro de frequência para EMI de linhas de 380 kV (gradiente máximo do condutor = 12.1 kV/cm. (Ref. 37 © IEEE, 1989).....	59
Figura 3.15 – Espectro de todas as frequências devido ao clima para EMI produzida por uma linha de distribuição de 33 kV (baseado em mais de 100 medidas em linhas diferentes) (Ref. 38 © IEEE, 1989).....	59
Figura 3.16 – Espectro de frequência para tipos de descargas geradas pela geometria mostrada na Figura 3.14.....	60
Figura 3.17 – Espectro de frequência da EMI de uma linha de 132 kV (gradiente máximo do condutor = 14.4 kV/cm). As medições foram realizadas nas proximidades de uma subestação – curvas superiores – a 300m de distância da mesma – curvas inferiores. Ref.37 © IEEE 1989.....	61
Figura 4.1 – Forma de um impulso atmosférico segundo a NBR 6936 [1].....	66
Figura 4.2 – Circuito de um gerador de impulsos comum.....	66
Figura 4.3 – Gerador de impulsos básico [3].....	67
Figura 4.4 – Gerador de impulsos simplificado.....	68
Figura 4.5 – Vários estágios de um gerador de impulsos comum [2].....	69
Figura 4.6 – Vários estágios de um gerador de impulsos comum de modo simplificado [2].....	70
Figura 4.7 – Modificações do Gerador de Marx [2].....	70
Figura 4.8 – Gerador de impulsos – circuito para evitar grandes frentes de onda.....	70

Figura 4.9 – Gerador de impulsos – circuito utilizado para produzir onda de corrente sem oscilações na parte superior [2].....	71
Figura 4.10 – Gerador de impulsos – Ligação em Cascata [2].....	71
Figura 4.11 – Conexão 6s-1p.....	72
Figura 4.12 – Conexão 3s-2p.....	73
Figura 4.13 - Conexão2s-3p.....	73
Figura 4.14 – Conexão 1s-6p.....	74
Figura 4.15 – Gerador de Impulsos HAEFELY 450kV, 1.2kJ da Universidade Federal de Itajubá - comando.....	74
Figura 4.16 – Gerador de Impulsos HAEFELY 450kV, 1.2kJ da Universidade Federal de Itajubá – conexão 3S-2P.....	75
Figura 5.1 – Região de confiança obtida através da Teoria da Verossimilhança.....	81
Figura 5.2 – Função de Semelhança x Tensão.....	81
Figura 5.3 – Função de Semelhança x Tensão x Desvio Padrão.....	82
Figura 6.1 – Valores de m e w para a correção da densidade e umidade em função do parâmetro g	86
Figura 6.2 – Gerador de impulsos e instrumentação.....	87
Figura 6.3 - Foto do Gerador de impulsos vista de trás com a conexão - capacitores.....	88
Figura 6.4 - Foto dos eletrodos Esfera – esfera dentro da Câmara de Nevoa Salina.....	88
Figura 6.5 – Carta Psicrométrica.....	89
Figura 6.6 – Resultados de ensaios de eletrodos Esfera-Esfera 20mm – Impulso Positivo.....	92
Figura 6.7 – Resultados de ensaios de eletrodos Esfera-Esfera 20mm – Impulso Positivo sem discrepância.....	93
Figura 6.8 – Resultados de ensaios de Impulso Positivo.....	94
Figura 6.9 – Resultados de Ensaios de Impulso Negativo.....	95
Figura 6.10 – Fator de Correção de Umidade Positivo.....	95
Figura 6.10 – Fator de Correção de Umidade Negativo.....	96
Figura 6.11 – Fatores de Correção de Umidade Positivo & Negativo.....	96
Figura 7.1 – Sistema Spacer.....	102
Figura 7.2 – Isolador de Pino PI33255.....	104
Figura 7.3 – Chave Seccionadora.....	105
Figura 7.4 – Isolador de Suspensão.....	106
Figura 7.5 – Isolador Polimérico.....	107
Figura 7.6 – Isolador Pilar.....	108
Figura 8.1 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm.....	110
Figura 8.2 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm.....	111
Figura 8.3 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm.....	111
Figura 8.4 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm.....	112
Figura 8.5 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm.....	113
Figura 8.6 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm.....	113
Figura 8.7 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm.....	114
Figura 8.8 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm.....	114
Figura 8.9 – Descarga Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm.....	115
Figura 8.10 – Descarga Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm.....	115
Figura 8.11 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Haste-haste – 25mm.....	116
Figura 8.12 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Haste-haste – 55mm.....	116
Figura 8.13 – Descarga Positiva em Eletrodos Haste-haste – 25mm.....	117
Figura 8.14 – Descarga Positiva em Eletrodos Haste-haste – 60mm.....	118
Figura 8.15 – Descarga Positiva em Eletrodos Haste-haste – 55mm.....	118
Figura 8.16 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Haste-haste – 25mm.....	119
Figura 8.17 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Haste-haste – 60mm.....	119
Figura 8.18 – Descarga Negativa em Eletrodos Haste-haste – 25mm.....	120
Figura 8.19 – Descarga Negativa em Eletrodos Haste-haste – 60mm.....	120
Figura 8.20 – Suportabilidade Positiva no Sistema Spacer.....	121
Figura 8.21 – Descarga Positiva no Sistema Spacer.....	122
Figura 8.22 – Suportabilidade Negativa no Sistema Spacer.....	122
Figura 8.23 – Descarga Negativa no Sistema Spacer.....	123
Figura 8.24 – Suportabilidade Positiva no Isolador de Pino PI33255.....	124
Figura 8.25 – Descarga Positiva no Isolador de Pino PI33255.....	124
Figura 8.26 – Suportabilidade Negativa no Isolador de Pino PI33255.....	125
Figura 8.27 – Descarga Negativa no Isolador de Pino PI33255.....	125

<i>Figura 8.28 – Suportabilidade Positiva na Chave Seccionadora</i>	126
<i>Figura 8.29 – Descarga Positiva na Chave Seccionadora</i>	126
<i>Figura 8.30 – Suportabilidade Negativa na Chave Seccionadora</i>	127
<i>Figura 8.31 – Descarga Negativa na Chave Seccionadora</i>	128
<i>Figura 8.32 – Suportabilidade Positiva no Isolador de Suspensão</i>	128
<i>Figura 8.33 – Descarga Positiva no Isolador de Suspensão</i>	129
<i>Figura 8.34 – Suportabilidade Negativa no Isolador de Suspensão</i>	129
<i>Figura 8.35 – Descarga Negativa no Isolador de Suspensão</i>	130
<i>Figura 8.36 – Suportabilidade Positiva no Isolador Polimérico</i>	131
<i>Figura 8.37 – Descarga Positiva no Isolador Polimérico</i>	131
<i>Figura 8.38 – Suportabilidade Negativa no Isolador Polimérico</i>	132
<i>Figura 8.39 – Descarga Negativa no Isolador Polimérico</i>	132
<i>Figura 8.40 – Suportabilidade Positiva no Isolador Pilar</i>	133
<i>Figura 8.41 – Descarga Positiva no Isolador Pilar</i>	134
<i>Figura 8.42 – Suportabilidade Negativa no Isolador Pilar</i>	134
<i>Figura 8.43 – Descarga Negativa no Isolador Pilar</i>	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Mínimo potencial de arco para vários gases.....	18
Tabela 2.2 – Formas de Corona.....	20
Tabela 2.3 – Rigidez dielétrica relativa de alguns gases em campos uniformes a 1.5 bar (SF6 =1).....	29
Tabela 3.1 – Isolamento em ar nos sistemas de potência e tipos de eletrodos utilizados em Laboratório para investigação de suas características dielétricas	31
Tabela 3.2 – Fórmulas de tensão disruptiva para eletrodos haste-plano sob impulsos de manobra positivos.....	36
Tabela 3.3 – Fator de forma – K para um número de configurações usuais de eletrodos.....	37
Tabela 3.4 – Exemplos da influência de Ta, P e H no impulso de tensão de ruptura de espaçamento em ar de eletrodos Haste-plano	42
Tabela 3.5 – Espaçamentos entre eletrodos recomendados para eletrodos simples e múltiplos utilizados na proteção de buchas de transformadores instalados em regiões semi-áridas [28].....	49
Tabela 3.6 – Parâmetros da Corrente de Corona	55
Tabela 6.1 – Valores de ensaios no conjunto Esfera-esfera 20mm polaridade positiva	91
Tabela 6.2 – Valores normalizados em relação ao valor para 11 g/m3 de água; Esfera-esfera 20mm polaridade positiva.....	92
Tabela 7.1 – Tensão Disruptiva Crítica dos eletrodos Esfera-esfera corrigida em função dos efeitos da umidade.....	100
Tabela 7.2 – Tensão Disruptiva Crítica dos eletrodos Haste-haste corrigida em função dos efeitos da umidade.....	101
Tabela 7.3 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para Sistema Spacer sem eletrodos flutuantes.....	103
Tabela 7.4 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para o Sistema Spacer com eletrodos flutuantes.....	103
Tabela 7.5 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para o Isolador de Pino PI33255.....	104
Tabela 7.6 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para Chave Seccionadora.....	105
Tabela 7.7 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para um Isolador de Suspensão.....	106
Tabela 7.8 – Tensão Disruptiva Crítica Corrigida em Função dos Efeitos da Umidade para Isolador Polimérico	107
Tabela 7.9 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para Isolador Pilar	108

1 – INTRODUÇÃO

As normas nacionais e internacionais possuem um acordo no que tange à correção de umidade para os ensaios de impulso atmosférico. No entanto, em sistemas de média tensão, as informações não são muitas e tal correção não se faz tão efetiva. Dentro deste contexto, este trabalho busca um detalhamento a respeito dos ensaios de impulso, em sistemas de média tensão, visando maior identidade entre resultados e correções. Desta forma, o presente se baseia em uma atividade exaustivamente experimental quando da realização de ensaios de impulso atmosférico em eletrodos básicos e comerciais.

Para melhor compreensão deste trabalho, os capítulos seguintes comentam os vários tópicos relativos ao presente objetivo.

O capítulo 2 discorre sobre dielétricos gasosos, o comportamento destes na ausência e na presença de campo elétrico, processos de formação de partículas; ionização e desionização; e características de ruptura em campos elétricos uniformes e não uniformes.

O capítulo 3 comenta o isolamento em ar, sua modelagem para ensaios; seu comportamento sob solicitações de tensão; a probabilidade de ruptura frente a impulsos atmosféricos; as características da tensão de ruptura; além de comentar a curva tensão-tempo e coordenação de isolamento, efeitos corona e interferências em rádio e televisão.

O capítulo 4 fala sobre a geração de tensões impulsivas; sobre o impulso atmosférico; e descreve o principal equipamento utilizado no desenvolvimento deste trabalho: o Gerador de Impulsos HAEFELY 450kV 1,2 kJ do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.

O capítulo 5 menciona os métodos de ensaio firmados em norma; detalha o método utilizado no trabalho; explica a análise estatística dos resultados; e ilustra um exemplo de aplicação dos mesmos.

O capítulo 6 ilustra o procedimento de correção dos efeitos da umidade para ensaio de impulso atmosférico firmado em norma; descreve o desenvolvimento do método de correção proposto por este trabalho; bem como a realização dos ensaios.

O capítulo 7 mostra a aplicação, em configurações comerciais, do fator de correção de umidade para ensaios de impulso atmosférico proposto em norma; do fator de correção levantado neste estudo, e a conseqüente comparação de resultados.

O capítulo 8 comenta as formas de corrente adquiridas de impulsos positivos e negativos aplicados aos eletrodos básicos e aos eletrodos reais citados neste trabalho.

E o capítulo 9 faz um comentário do trabalho como um todo, analisando as condições de

aplicabilidade dos fatores de correção firmados em norma e propostos por este estudo.

O capítulo 10, dentro do possível, menciona algumas sugestões sobre futuros desenvolvimentos que podem ser realizados neste campo.

Por fim, o capítulo 11 cita todas as referências bibliográficas mencionadas ao longo de todos os capítulos.

2 - DIELÉTRICOS GASOSOS ^[1]

Para entender a influência dos parâmetros atmosféricos nos projetos dos sistemas de isolamento, e a influência da umidade no valor da amplitude da Tensão Disruptiva Sob Impulsos Atmosféricos, é necessário conhecer os processos físicos que conduzem à ruptura e, por conseguinte, à falha dos dielétricos. Este capítulo discorre sobre os mecanismos físicos básicos associados à ruptura dos dielétricos gasosos de forma a prover os meios mínimos para o entendimento dos conceitos utilizados nos projetos de sistemas de isolamento em engenharia.

2.1 - INTRODUÇÃO

Os gases são os dielétricos mais simples e comumente utilizados. Para utiliza-los, bem como qualquer outro dielétrico, de maneira eficiente, é necessário conhecer seu comportamento sob as principais solicitações frente a campos elétricos. Nestes casos, deve-se atentar especialmente aos processos físicos que causam a ionização e ruptura dos diferentes modos utilizados na construção dos equipamentos e sistemas elétricos. Cada gás entra em ruptura sob um determinado nível de solicitação elétrica – campo elétrico – e define-se tensão de ruptura como o valor de pico da tensão aplicada, no instante do colapso das propriedades dielétricas, ou seja, descarga.

2.2 – COMPORTAMENTO DOS GASES SOB CAMPO ELÉTRICO ZERO

Na ausência de um campo elétrico, um gás obedece à lei de Boyle, conforme mostra a Equação 2.1, ou seja,

$$Pv = C \quad (2.1)$$

onde P e v são, respectivamente, a pressão e volume do gás, e C é uma constante que depende da temperatura absoluta T e da massa m . No entanto, é necessário considerar que v varia com T de acordo com a “Lei de Gay Lussac”, ou seja, Equação 2.2:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{T}{T_0} \quad (2.2)$$

onde v_0 e T_0 são os valores iniciais de volume e temperatura respectivamente.

Das equações (2.1) e (2.2) obtém-se a Equação 2.3:

$$Pv = n_k RT \quad (2.3)$$

onde n_k é o número de kilomoles de gás e R é a constante universal dos gases, ou seja, 8314 J/°K.

Assumindo N_0 como o número de moléculas em um mol = $6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol, ou seja, “Número de Avogadro” e N' como o número total de moléculas no gás que é igual a Nv , onde N é a densidade do gás. É possível substituir na Equação 2.3 n_k por N'/N_0 , e N' por Nv . Deste modo, podem ser obtidas as Equações 2.4 e 2.5:

$$PV = \frac{N'}{N_0} RT = \frac{Nv}{N_0} RT \quad (2.4)$$

assim,

$$P = NkT \quad (2.5)$$

onde $R/N_0 = k$ – Constante de Boltzmann = $1,3806 \times 10^{-23}$ K.

Considerando as “Leis da Mecânica Clássica” é possível associar, conforme mostra a Equação 2.6 que a energia cinética de um gás pode ser relacionada à sua energia térmica:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT \quad (2.6)$$

onde V é a velocidade das moléculas do gás.

Na ausência de campo elétrico, as moléculas dos gases possuem velocidades aleatórias. Segundo Maxwell, para um valor fixo de temperatura, a função de distribuição das velocidades moleculares é uma característica particular de um determinado gás. A Figura 2.1 mostra a forma genérica assumida pela função de distribuição das velocidades moleculares, que em termos matemáticos pode ser expressa conforme mostrado pela Equação 2.7 [1]:

$$f(v_r) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} v_r^2 \exp(-v_r^2) \quad (2.7)$$

onde a velocidade relativa v_r é dada por $\frac{v}{v_p}$ e v_p é a velocidade mais provável.

Em termos das moléculas de um gás, a velocidade média \bar{v} e a velocidade efetiva ou velocidade rms – v_{ef} podem ser associadas à velocidade mais provável – v_p como mostrado pelas Equações 2.8 e 2.9 [1]:

$$\bar{v} = 1,128v_p \quad (2.8)$$

$$v_{ef} = 1,224v_p \quad (2.9)$$

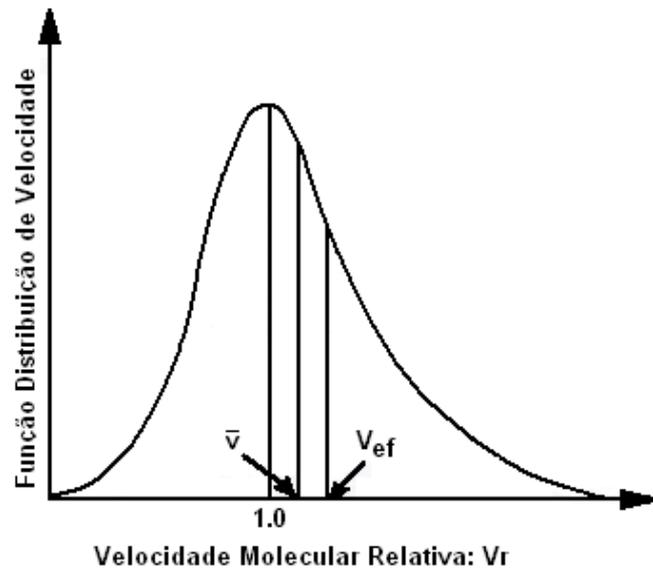


Figura 2.1 – Função de distribuição de Maxwell para velocidades moleculares. (Ref. 1 © Wiley, 1971)

As moléculas do gás, em movimento aleatório, colidem umas com as outras e com as paredes do recipiente que as contém. A distância que as partículas percorrem entre duas colisões sucessivas é chamada caminho livre - λ . Obviamente, os valores de caminho livre para cada molécula diferem grandemente, e portanto, o conceito de caminho livre médio - $\bar{\lambda}$ é um conceito mais adequado. Se existirem N_p pares de moléculas com raios r_1 e r_2 é possível escrever, conforme Equação 2.10 que:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi(r_1 + r_2)^2 N_p} = \frac{1}{\delta} \quad (2.10)$$

onde δ é a seção transversal efetiva. Para um certo gás, $\bar{\lambda}$ é diretamente proporcional à temperatura do gás e inversamente proporcional à pressão do gás.

2.3 PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS

Se uma tensão é aplicada entre dois eletrodos separados por um espaçamento em gás, só existe fluxo de corrente se houver partículas carregadas no interior do gás. Tais partículas podem incluir:

1. Um elétron \bar{e} (carga negativa)
2. Um íon positivo (átomo neutro que perdeu um elétron) $A^+ = A - \bar{e}$
3. Um íon negativo (átomo neutro com um elétron em excesso) $A^- = A + \bar{e}$

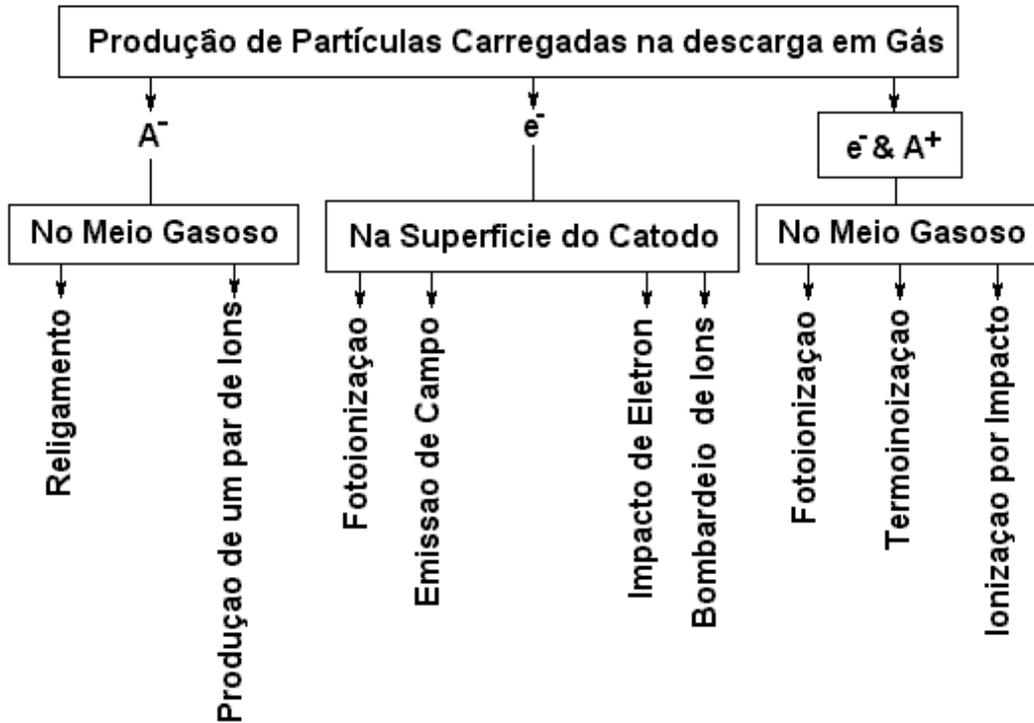


Figura 2.2 – O principal processo responsável pela produção de partículas carregadas na descarga do gás.

Estas partículas podem ser geradas por vários processos. A Figura 2.2 mostra o principal processo que resulta na geração de partículas durante uma descarga em um gás. Deste modo, segundo a “Teoria de Bohr” sobre a estrutura atômica e níveis de energia vem:

1. Os elétrons só podem existir em órbitas estáveis e discretas ao redor do núcleo sem emitir qualquer energia. Estas órbitas estáveis ficam situadas a uma distância r do centro do núcleo, conforme mostrado na Equação 2.11:

$$r = \frac{qh}{2\pi m_e v_e} \quad (2.11)$$

onde q = número quântico (número inteiro), h = Constante de Planck = $6,6257 \times 10^{-34}$ J.s, v_e = velocidade do elétron, e m_e = massa do elétron.

2. Quando a energia de um átomo muda de um valor W_1 para um valor menor W_2 , o

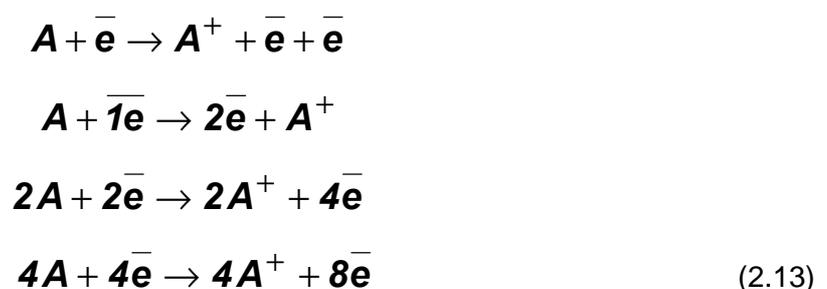
excesso de energia é emitido como um quantum de radiação (fóton) cuja frequência (f_p) é associado à *Constante de Planck*, segundo a Equação 2.12:

$$hf_p = W_1 - W_2 \quad (2.12)$$

A geração de elétrons livres pode resultar da ionização de átomos neutros ou da separação de íons negativos. O processo de ionização necessita de uma quantidade específica de energia. Caso a energia absorvida por um átomo seja inferior a este valor específico, um fenômeno de excitação pode ser iniciado onde o elétron não deixa o átomo, mas vai para um nível de energia mais alto, ou uma camada exterior. Normalmente, o estado de excitação não é estável e o átomo pode absorver mais energia para se tornar ionizado ou retornar ao seu estado original de estabilidade por excesso de radiação de energia.

2.3.1 IONIZAÇÃO POR COLISÃO (IONIZAÇÃO POR IMPACTO)

Quando um campo elétrico é aplicado entre dois eletrodos, um elétron livre surge entre os mesmos e ganha energia enquanto é acelerado em direção ao anodo. Durante este processo, ele também colide com moléculas neutras do gás. Se a energia do elétron for menor que a energia de ionização do átomo ou molécula do gás, pode acontecer uma colisão elástica. Alternativamente, o átomo do gás pode ser excitado. No entanto, quando a energia do elétron é maior que a energia de ionização do gás, uma colisão inelástica pode ocorrer, causando a ionização do átomo ou da molécula do gás. Nestas colisões são produzidos um íon positivo e um elétron extra. O íon positivo é atraído pelo catodo. Subseqüentemente, estes dois elétrons ganham energia do campo e mais adiante podem vir a ionizar moléculas de gás. Dependendo das condições físicas, ou este processo alcança uma condição estável, onde um certo número de partículas carregadas é gerado o que permite o estabelecimento de um fluxo de corrente, ou o processo de ionização evolui para uma avalanche e conseqüente ruptura. A seqüência de Equações 2.13 expressa o processo de ionização:



e assim por diante.

2.3.2 FOTO - IONIZAÇÃO (IONIZAÇÃO POR RADIAÇÃO)

Um átomo excitado geralmente tem um tempo de vida em torno de 10^{-7} a 10^{-9} s. Quando ele retorna ao seu estado inicial, emite seu excesso de energia na forma de fótons de baixa energia que podem iniciar uma ionização como mostrado pela Equação 2.14:



Na Equação 2.14 A^* representa o estado excitado de um átomo A e hf_p , a energia do fóton que se considera maior do que a energia de ionização do átomo B . Fontes externas como raios-X, radiação nuclear ou raios cósmicos podem causar foto-ionização dos mais profundos níveis de energia da molécula. A foto-ionização é um importante processo, especialmente na ruptura de misturas de gases raros cujos estados excitados podem ter longo tempo de vida.

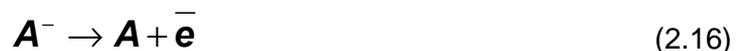
2.3.3 IONIZAÇÃO TÉRMICA

Um incremento suficiente na temperatura do gás faz com que as partículas se movam mais rapidamente e, conseqüentemente, pode ocorrer ionização por colisão entre as moléculas dos átomos e/ou moléculas do gás. A energia térmica W_t pode causar ionização por si própria em altas temperaturas como em chamas e arcos conforme mostra a Equação 2.15:



2.3.4 SEPARAÇÃO DE ELÉTRONS

Um elétron pode se separar de um íon negativo como mostrado pela Equação 2.16:



Embora o número de partículas carregadas não aumente neste processo, a separação pode ser considerada como um processo de ionização uma vez que o movimento lento de íons negativos é convertido em movimento rápido de elétrons. Sendo a energia cinética diretamente proporcional à massa e ao quadrado da velocidade, o movimento rápido dos elétrons possui elevada energia cinética quando comparado com o movimento mais lento dos íons negativos mais pesados. Portanto o movimento dos elétrons pode posteriormente resultar em um processo de ionização mais efetivo do que o movimento dos íons negativos.

2.3.5 PROCESSOS CATÓDICOS

As partículas carregadas também podem provir dos eletrodos, especialmente do catodo. Em estado normal, os elétrons estão ligados à estrutura do eletrodo por meio de forças eletrostáticas entre elétrons e íons presentes na matriz sólida. Para um elétron deixar o catodo é requerida uma energia específica mínima, conhecida como função de trabalho, que depende do material. A fonte da energia requerida pode ser uma ou a combinação das seguintes condições:

ÍON POSITIVO E EXCITADO POR BOMBARDEAMENTO ATÔMICO

Quando um íon positivo atinge o catodo, um elétron é liberado desde que a energia de impacto seja igual ou maior que duas vezes a função de trabalho do catodo. Deste modo, pelo menos dois elétrons são liberados: um neutraliza o íon positivo e o outro é ejetado para o meio do gás. Elétrons podem ser emitidos como resultado do bombardeamento do catodo por elétrons ou moléculas neutras excitadas.

FOTO - EMISSÃO

Caso a energia dos fótons que atingem a superfície do catodo seja tão elevada quanto à função de trabalho, pode ocorrer o fenômeno de ejeção de elétrons do catodo.

EMISSÃO TERMO - IÔNICA

Quando a temperatura do catodo atinge valores elevados (em torno de 2000K) alguns elétrons podem deixar sua superfície desde que a vibração térmica forneça aos elétrons a energia necessária. A emissão termo-iônica é um processo que tem sido amplamente utilizado desde o início da eletrônica.

EMISSÃO DE CAMPO

Valores elevados de campo elétrico podem superar a força de ligação entre os elétrons e prótons e iniciar a liberação de um ou mais elétrons do catodo. Isto acontece quando o valor do campo elétrico é da ordem de 10^7 a 10^9 V/cm. É óbvio que a maioria dos componentes dos sistemas de potência não operam sob solicitações tão elevadas, no entanto, condições para a emissão de campo podem existir em protruções e microdefeitos.

2.4 PROCESSOS DE DESIONIZAÇÃO

Desionização é o processo pelo qual o número de partículas carregadas em um volume de gás, especialmente os elétrons, decresce. Este é um processo oposto à ionização, portanto ele pode ser desejável em algumas aplicações, por exemplo, para impedir o crescimento de avalanche ou nos processos extinção de arco.

2.4.1 DIFUSÃO

Partículas carregadas se movem da região de maior concentração para a região de menor concentração. Este fenômeno conhecido como difusão é mostrado pela Equação 2.17:

$$\mathbf{J} = -D\bar{\nabla}n \quad (2.17)$$

onde \mathbf{J} = a taxa de fluxo de carga, $\bar{\nabla}n$ = gradiente de concentração de carga, e D = constante de difusão, que é expressa pela Equação 2.18:

$$D = \frac{\bar{\lambda} \cdot \bar{v}}{3} \quad (2.18)$$

Devido à elevada velocidade média \bar{v} , para elétrons, D é três ordens de magnitude superior que para os íons. Quando se leva em conta o tempo, a taxa de variação da densidade de carga (íons) - n é fornecida pela Equação 2.19 [1]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot \bar{\mathbf{J}} = D \cdot \bar{\nabla}^2 n \quad (2.19)$$

A solução da equação 2.19 fornece a concentração de íons (n) em quaisquer ponto e instante e ponto. A solução desta equação para o caso de uma concentração de carga cilíndrica fornece o deslocamento médio r_d , conforme mostra a Equação 2.20 [1]:

$$r_d = \sqrt{4Dt} \quad (2.20)$$

2.4.2 RECOMBINAÇÃO

Os íons positivos e negativos se combinam para formar um átomo neutro, segundo a Equação 2.21:



A taxa de recombinação é diretamente proporcional à concentração de ambos íons positivos n_+ e negativos n_- , conforme mostra a Equação 2.22:

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -\rho n_+ n_- \quad (2.22)$$

onde ρ é a constante de recombinação. Em geral, $n_+ = n_- = n$, conforme Equação 2.23:

$$\frac{dn}{dt} = -\rho n^2 \quad (2.23)$$

A Equação 2.24 mostra o resultado da integração desta equação em relação ao tempo. Logo, a densidade de partículas carregadas em um tempo qualquer é:

$$n(t) = \frac{n_0}{1 + n_0 \rho t} \quad (2.24)$$

onde n_0 é a concentração inicial.

2.4.3 CAPTURA DE ELÉTRONS

Alguns gases eletronegativos tais como O_2 , CO_2 e SF_6 capturam elétrons livres em movimento em baixa velocidade para neutralizar uma molécula de gás formando neste processo um íon negativo pesado. Conseqüentemente o processo de captura de um elétron, que se constitui em um processo de desionização, pode ser escrito como $A + \bar{e} \rightarrow \bar{A}$. Este processo é o oposto ao processo de separação de elétrons.

2.5 RUPTURA DE GÁS EM CAMPO UNIFORME

A aplicação de um campo elétrico específico E a um dielétrico gasoso resulta, primeiramente, em sua ionização. Com o passar do tempo e/ou aumento da amplitude do campo aplicado, a ionização pode iniciar um outro processo físico, conforme mostrado na Figura 2.3.

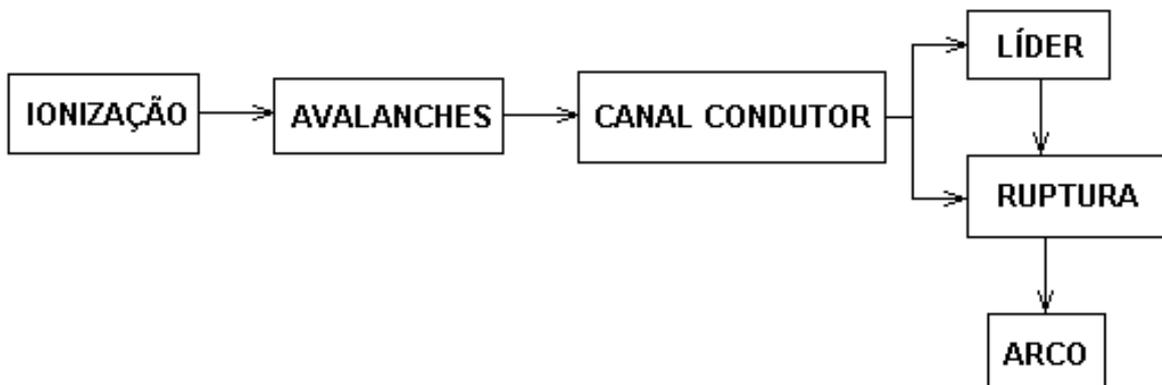


Figura 2.3 – Os vários processos possíveis de descarga em isolamento a gás

O crescimento exponencial da ionização normalmente inicia um processo de avalanche. Tais avalanches podem então resultar na formação de canais condutores (*streamers*), líder, ruptura,

descarga ou plasma. Dependendo do arranjo dos eletrodos, o campo elétrico pode ser uniforme ou não-uniforme. No caso de campos uniformes, a solitação dielétrica é a mesma ao longo de todo o volume entre os eletrodos e conseqüentemente os parâmetros de ionização e desionização são constantes. Logo, os processos físicos associados à ruptura sob campos uniformes podem ser entendidos mais facilmente. Os dois modelos de ruptura mais amplamente aceitos são o Modelo de Townsend (1910) e o Modelo de Canais Condutores (*Streamers*) (1940).

2.5.1 MODELO DE TOWNSEND

Townsend investigou a ionização e a ruptura sob condições de tensão contínua, e propôs um modelo para explicar suas observações experimentais. Considerando o circuito da Figura 2.4, Townsend assumiu que devido à luz ultravioleta n_0 elétrons começam a ser emitidos do catodo por segundo.

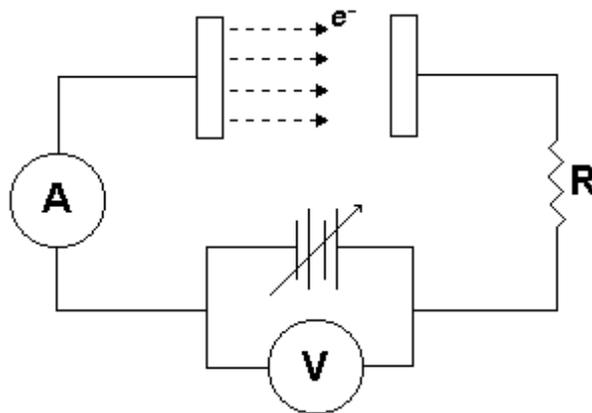


Figura 2.4 - Circuito experimental para o estudo das descargas em gases segundo Townsend

O primeiro coeficiente de ionização de Townsend α , que é uma função da pressão do gás e do campo elétrico, é definido como o número de colisões ionizantes realizadas por um elétron por unidade de distância quando ele viaja na direção do campo aplicado. Deste modo, o número de elétrons a uma distância x do catodo n_x é obtido segundo mostra a Equação 2.25:

$$\frac{dn_x}{dx} = \alpha n_x \quad (2.25)$$

e conseqüentemente:

$$n_x = n_0 \exp(\alpha x) \quad (2.26)$$

De maneira similar, n_d , o número de elétrons que alcança o anodo a uma distância d , é

fornecido pela Equação 2.27:

$$n_d = n_0 \exp(\alpha d) \quad (2.27)$$

Logo, o número de novos elétrons criados em média por cada elétron primário que deixa o catodo é fornecido pela Equação 2.28:

$$\frac{n_d - n_0}{n_0} = \exp(\alpha d) - 1 \quad (2.28)$$

Finalmente, a corrente média no espaçamento entre os eletrodos, que é numericamente proporcional ao número de elétrons viajando por segundo, é dado pela Equação 2.29:

$$I = I_0 \exp(\alpha d) \quad (2.29)$$

onde I_0 é a corrente inicial no catodo.

A Equação 2.29 retrata um processo de avalanche. Durante a amplificação do número de elétrons no campo, no interior do espaçamento entre os eletrodos, elétrons adicionais começam a ser liberados por meio de outros processos (secundários). Os elétrons secundários assim produzidos criam suas próprias avalanches. Processos secundários incluem o bombardeamento de íons positivos no catodo, foto-ionização e separação. O segundo coeficiente de ionização de Townsend – γ é definido como número líquido de elétrons secundários produzidos por cada elétron que deixa o catodo. O coeficiente γ é uma função da razão entre o campo elétrico – E e a pressão – P , bem como do material dos eletrodos, entre outros.

A influência do processo secundário no crescimento da corrente pode ser considerada conforme a seguir: Seja n_s o número de elétrons secundários produzidos no catodo por segundo e $n_t = (n_0 + n_s)$ o número total de elétrons deixando o catodo por segundo. Logo, o número de elétrons que alcança o anodo é fornecido pela Equação 2.30:

$$n_d = n_t \exp(\alpha d) = (n_0 + n_s) \exp(\alpha d) \quad (2.30)$$

porém, por definição:

$$n_s = \gamma(n_d - n_t) \quad (2.31)$$

logo:

$$n_s = \gamma [n_d - (n_0 + n_s)] \quad (2.32)$$

As Equações 2.30 e 2.32, permitem obter a Equação 2.33:

$$n_d = \frac{n_0 \exp(\alpha d)}{1 - \gamma [\exp(\alpha d) - 1]} \quad (2.33)$$

Logo, o fenômeno de crescimento, ou seja, avalanche, da corrente na presença dos processos α e γ é dado pela Equação 2.34:

$$I = \frac{I_0 \exp(\alpha d)}{1 - \gamma [\exp(\alpha d) - 1]} \quad (2.34)$$

No instante em que ocorre a ruptura do meio dielétrico $I = \infty$, uma vez que a corrente é considerada como limitada apenas pela resistência do circuito externo. Esta condição é chamada “*Critério de Ruptura de Townsend*” e pode ser descrita pela Equação 2.35:

$$\gamma [\exp(\alpha d) - 1] = 1 \quad (2.35)$$

Normalmente $\exp(\alpha d) \gg 1$, portanto obtém-se a Equação 2.36:

$$\gamma \exp(\alpha d) = 1 \quad (2.36)$$

Os coeficientes α e γ dependem do Campo Elétrico – E e da Pressão – P . Logo, para um determinado valor de d existe um valor de E , e, conseqüentemente, um valor de U que permite satisfazer o *Critério de Ruptura de Townsend*, chamado tensão disruptiva ou tensão de ruptura – U . A distância d correspondente é chamada de distância de arco.

Para os gases eletronegativos, em adição aos processos α e γ , ocorrem processos de captura de elétron. Logo, o coeficiente de captura também é considerado na equação de avalanche de corrente. Conseqüentemente, o *Critério de Ruptura de Townsend* também é modificado nestes casos [1]. Os mecanismos de *Townsend* explicam o fenômeno de ruptura apenas para baixas pressões. No caso de eletrodos em ar, isto corresponde a um produto $P \times d \angle 1,45$ bar-cm. Para condições que apresentem valores maiores que Pd ou para a ruptura sob tensões com taxas de crescimento rápidas, usualmente é necessário utilizar o *Modelo de Canais Condutores (Streamers)*.

2.5.2 MODELO DOS CANAIS CONDUTORES (STREAMERS)

O Modelo de Townsend falha ao explicar algumas observações experimentais tais como: a existência de caminhos em zig-zag e ramificações nos canais das descargas, e o fenômeno de redução dos tempos de ruptura quando os sistemas de eletrodos são super solicitados ou submetidos a condições que resultem em valores elevados para o produto $P \times d$. Devido a estas e outras limitações foi proposto um modelo denominado “Modelo dos Canais Condutores”. Esta teoria pode ser brevemente sumarizada de forma qualitativa como na Figura 2.5.

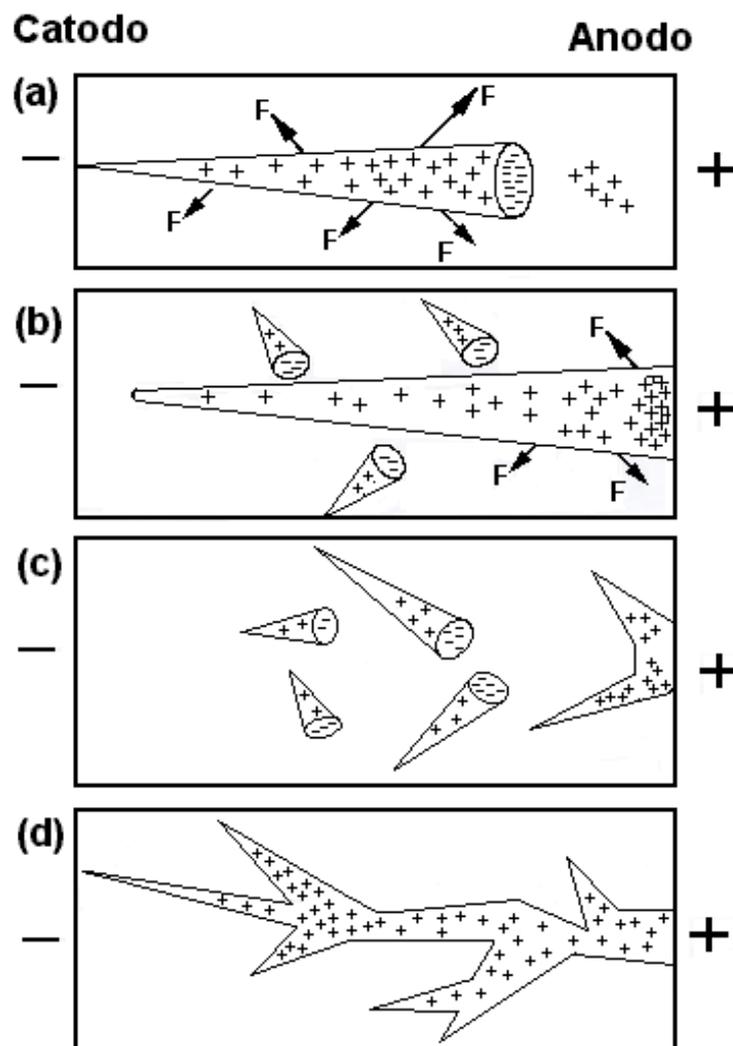


Figura 2.5 – O desenvolvimento de uma avalanche para um canal ionizado em um campo uniforme (+ = íons positivos, - = elétrons, F = fótons emitidos da avalanche).

1. No espaço entre dois eletrodos submetidos a um campo elétrico uniforme conforme mostrado na Figura 2.5 seja uma avalanche de elétrons, composta pelo movimento rápido de elétrons e pelo movimento lento de íons positivos, gerada conforme anteriormente

discutido. Deste modo é formado um campo elétrico, associado às cargas espaciais em movimento, que se opõe ao campo elétrico principal. Os elétrons rápidos são prontamente absorvidos pelo anodo deixando no espaço entre os eletrodos, um acúmulo de íons positivos. O processo de excitação dos átomos também ocorre como resultado das colisões durante a avalanche primária, e fótons são emitidos pelos átomos excitados.

2. Estes fótons são absorvidos pelos átomos do gás. Deste modo, no meio em gás entre os eletrodos, são produzidos fotoelétrons a várias distâncias da avalanche conforme mostra a Figura 2.5-a. Caso o campo associado às cargas espaciais anteriormente mencionado seja da mesma ordem de grandeza que o campo originalmente aplicado, alguns fotoelétrons mais adequadamente localizados iniciam uma segunda seqüência de avalanches auxiliares.
3. Formadas as avalanches auxiliares, novos fótons são produzidos e, conseqüentemente, novos fotoelétrons. Por conseguinte, uma terceira seqüência de avalanches auxiliares é criada, como mostrado na Figura 2.5-b. Os elétrons não seguem mais as linhas de campo original porque as cargas espaciais desenvolvidas distorcem o campo originalmente aplicado. Além do que, várias avalanches podem ser criadas quase que simultaneamente. Esta é a causa das ramificações observadas e dos caminhos em zig-zag das descargas conforme Figura 2.5-c. As avalanches auxiliares são continuamente absorvidas pela avalanche primária e um fluxo crescente de íons positivos segue para o catodo. Deste modo, um canal ionizado se estende do anodo para o catodo. Este canal ionizado é chamado "Streamer". A extremidade do "Streamer" forma ramificações que crescem devido às avalanches principais, como ilustrado na Figura 2.5b. Os elétrons nas extremidades são logo absorvidos e se movem dentro do canal para o anodo devido ao gradiente de potencial interno.
4. A propagação de um canal ionizado avança enquanto os outros param devido à falta de alimentação da avalanche como mostrado na Figura 2.5c. Caso este processo apresente continuidade, é formado um canal ionizado entre o anodo e o catodo, o que resulta em uma ruptura completa do dielétrico. Este canal é similar ao esboçado na Figura 2.5d com inúmeros ramos incompletos.

Formados estes canais ionizados o processo de ruptura não tarda em acontecer. Matemática e empiricamente o critério de ruptura associado à formação de canais ionizados sob campos uniformes pode ser formulado pela Equação 2.37:

$$\int_0^d \alpha \cdot dx = n_c \quad (2.37)$$

onde n_c é o número crítico de elétrons ou íons na avalanche quando ela se transforma em um canal ionizado. Usualmente acredita-se que $n_c=10^8$ para o ar e outros gases.

2.5.3 LEI DE PASCHEN

Baseado no “Critério de Ruptura de Townsend” é possível determinar uma relação entre a tensão de ruptura U_s e o produto da pressão e a distância entre eletrodos conforme demonstrado a seguir.

Ambos “Coeficientes de Townsend” – α e γ são função do campo elétrico E e da pressão do gás P . Deste modo, é possível escrever a Equação 2.38:

$$\frac{\alpha}{P} = f_1\left(\frac{E}{P}\right); \quad \gamma = f_2\left(\frac{E}{P}\right) \quad (2.38)$$

Para a condição de campo uniforme, $E = U/d$ é possível transformar a Equação 2.38 na Equação 2.39,

$$\frac{\alpha}{P} = f_1\left(\frac{U}{Pd}\right); \quad \gamma = f_2\left(\frac{U}{Pd}\right) \quad (2.39)$$

Substituindo a Equação 2.39 na Equação 2.35 resulta em:

$$f_2\left(\frac{U}{Pd}\right) \left[\exp\left\{Pd \cdot f_1\left(\frac{U}{Pd}\right)\right\} - 1 \right] = 1 \quad (2.40)$$

Conforme mostrado, existe apenas um único valor de U para um valor particular de Pd que satisfaz a Equação 2.40. Este valor de U é a tensão de ruptura U_s que pode ser escrita como:

$$U_s = f(Pd) \quad (2.41)$$

A Equação 2.41 mostra que para um gás em particular, a tensão de ruptura é uma função direta do produto da pressão e do espaçamento entre eletrodos. Esta relação é conhecida como *Lei de Paschen*. A *Curva de Paschen* para o ar é mostrada na Figura 2.6 que indica claramente que existe um valor mínimo de U_s para um valor particular do produto Pd [2].

A Tabela 2.1 mostra o valor mínimo da tensão de ruptura U_s e o correspondente valor do

produto Pd para vários gases utilizados na indústria elétrica.

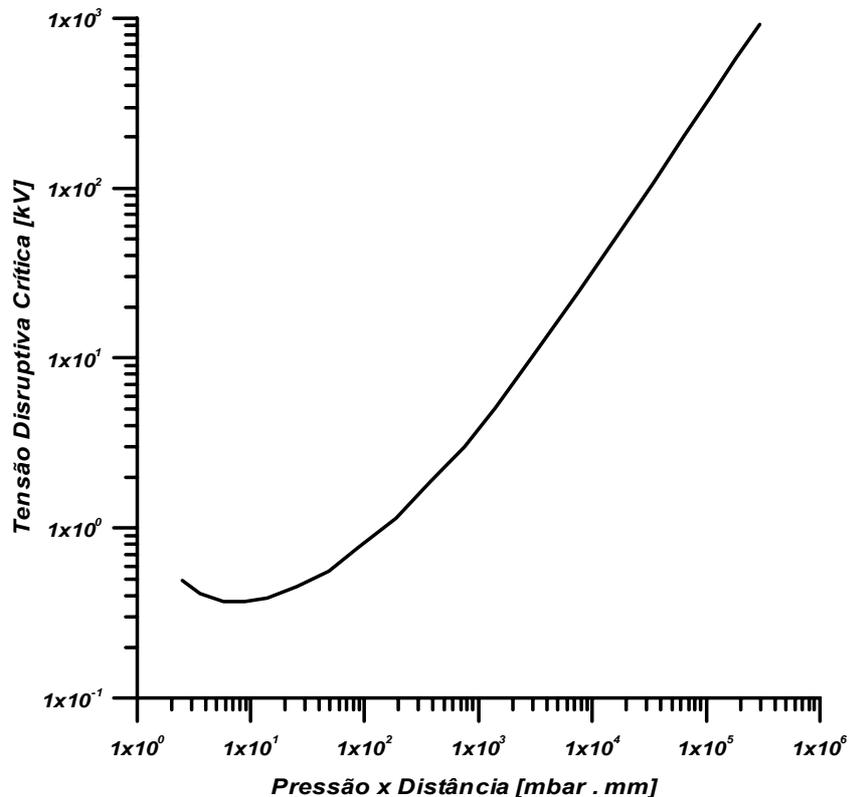


Figura 2.6 – Curva de Paschen para o ar

Tabela 2.1 – Mínimo potencial de arco para vários gases

GÁS	$V_{s\ min} [V]$	$Pd\ a\ V_{s\ min} [Pa-cm]$
Ar	327	75,60
Ar	137	120,00
H ₂	273	153,30
He	156	533,00
CO ₂	420	68,00
N ₂	251	89,00
N ₂ O	418	66,65
O ₂	450	93,30
SO ₂	457	93,30
H ₂ S	414	80,00

2.6 RUPTURA DE GÁS EM CAMPO NÃO-UNIFORME

Os gases suportam solicitações dielétricas que uma vez excedidas resultam em falha dielétrica - ruptura. Como as solicitações em um campo elétrico uniforme são independentes do ponto entre os eletrodos, as descargas são completas. Entretanto, em espaçamentos com campos

elétricos não-uniformes, as descargas ocorrem nas regiões onde as solicitações são maiores que a rigidez dielétrica do gás. Este fenômeno é conhecido como descarga parcial (**DP**), e quando isto ocorre na superfície de eletrodos em ar ou em outros gases, esse fenômeno é chamado “*Corona*”. Usualmente, nos sistemas em alta tensão não é econômico desenvolver equipamentos que sejam livres de corona mesmo sob condições de tensão nominal de operação. Logo, o conhecimento do valor da tensão de início de corona e quais os danos físicos causados por ela torna-se importante.

2.6.1 INÍCIO DE CORONA

A tensão de início de corona é o valor crítico de tensão na superfície do condutor a partir do qual se inicia a formação de corona. Para aplicações em tensão em frequência industrial, as seguintes relações são geralmente aplicáveis para o início de corona:

1. Para um condutor singular sobre o solo, o campo crítico (E_c) que causa corona estável no condutor é dado pela Equação 2.42:

$$E_c = 30m_s\delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \quad [kV_{pico}/cm] \quad (2.42)$$

onde r = raio do condutor, δ = densidade relativa do ar e m_s = fator de irregularidade da superfície ($m_s = 1$ para condutores lisos e $m_s < 1$ para condutores). Neste caso, a tensão de início de corona U_c é dada pela Equação 2.43.

$$U_c = E_c r \ln \left(\frac{2H}{r} \right) \quad (2.43)$$

onde H é a altura do condutor até o solo.

2. Para cilindros coaxiais de raio interno e externo, r_1 e r_2 , respectivamente, E_c e U_c são dados pela Equações 2.44 e 2.45:

$$E_c = 31m_s\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r_1 \cdot \delta}} \right) \quad [kV_{pico}/cm] \quad (2.44)$$

$$U_c = E_c r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.45)$$

Nas equações 2.44 e 2.45, a densidade relativa do ar (δ) à pressão P (mbar) e temperatura T ($^{\circ}\text{K}$) é dada pela Equação 2.46.

$$\delta = \left(\frac{P}{1013} \right) \left(\frac{293}{T} \right) \quad (2.46)$$

2.6.2 CORONA

As descargas corona são melhor investigadas utilizando-se eletrodos *Esfera - plano* ou *Ponta-plano* onde o raio da esfera ou ponta é escolhido de acordo com a não uniformidade de campo desejada. Existem seis modos possíveis de corona que variam de acordo com a tensão utilizada e com a forma do eletrodo: três para tensões positivas DC ou meio ciclo positivo de AC, e três para tensões negativas DC ou meio ciclo negativo de AC. A Tabela 2.2 e a Figura 2.7 mostram a ocorrência de várias modalidades de corona no ar, como aparecem com incremento da tensão aplicada.

Tabela 2.2 – Formas de Corona

CORONA POSITIVO	CORONA NEGATIVO
<i>Pulsos de Início</i>	<i>Pulsos de Trichel</i>
<i>+ ve brilho de Hermstein (+ ve G)</i>	<i>- ve pulseless glow (- ve G)</i>
<i>+ve canal de pré-ruptura (+vê st)</i>	<i>- ve canal de pré-ruptura (- ve st)</i>
<i>Ruptura completa</i>	<i>Ruptura completa</i>

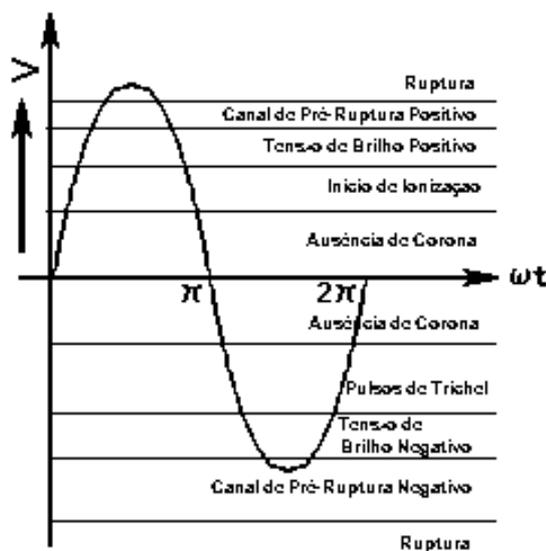


Figura 2.7 – Ciclo de corrente alternada com várias formas de corona possíveis

Os valores de tensão para corona positivo e negativo são aproximadamente similares. Entretanto, a transição entre os diferentes modos ocorre em tensões diferentes para as duas

polaridades. Dependendo do raio da ponta e do espaçamento entre os eletrodos, uma ou mais das modalidades mencionadas podem não ocorrer em alguns arranjos. Por outro lado, em alguns casos, dois modos podem ocorrer simultaneamente.

CORONA NEGATIVO

PULSOS DE TRICHEL

Uma vez que a tensão atinge a intensidade crítica de campo, avalanches de elétrons se formam e se propagam para o anodo deixando para trás íons positivos. Quando os elétrons entram na região de baixa intensidade de campo formam íons negativos, e, por conseguinte, ocorre a formação de cargas espaciais como ilustrado na Figura 2.8, onde E_0 é o campo eletrostático aplicado e E_s é o campo devido às cargas espaciais

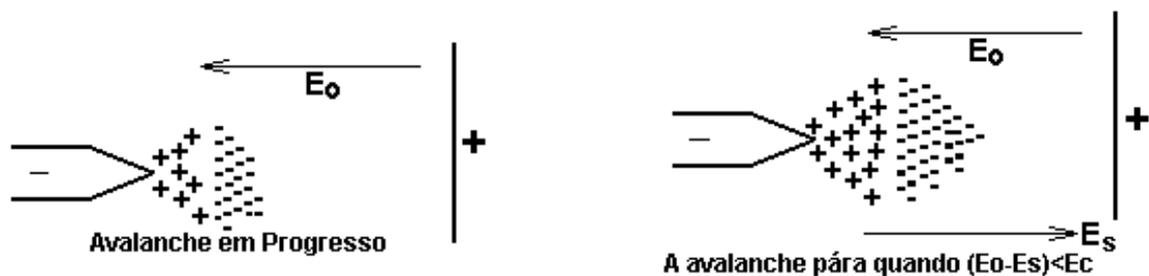


Figura 2.8 – Avalanche de corona negativa

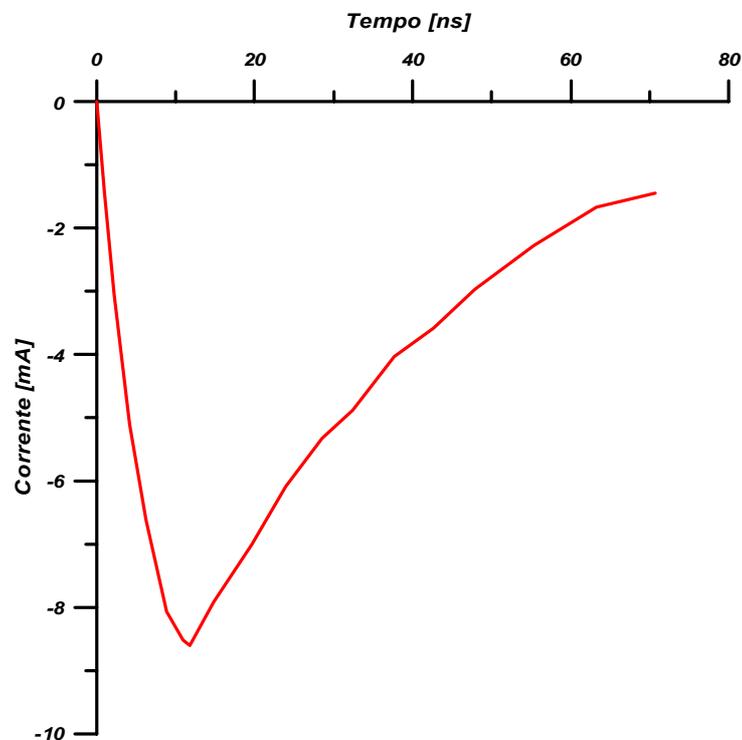


Figura 2.9 – Corrente de corona negativa (pulsos de Trichel)

A descarga pára quando a intensidade efetiva de campo ($E_0 - E_s$) nas proximidades da

superfície do eletrodo torna-se menor que o valor crítico. Uma vez interrompida a condução de corrente no espaçamento entre eletrodos, o campo na vizinhança da ponta, se recupera e o processo se repete, iniciando a formação de pulsos de corrente como representado na Figura 2.9. Ao se elevar a tensão aplicada, o número de pulsos por segundo geralmente aumenta e a sua amplitude é reduzida.

BRILHO NEGATIVO

Com a posterior elevação da tensão atinge-se um valor a partir do qual as cargas espaciais já não são capazes de reduzir a intensidade efetiva do campo elétrico na vizinhança do catodo a um valor menor que o crítico. Conseqüentemente, a descarga torna-se contínua. Esta modalidade é conhecida como corona brilhante (Figura 2.10).

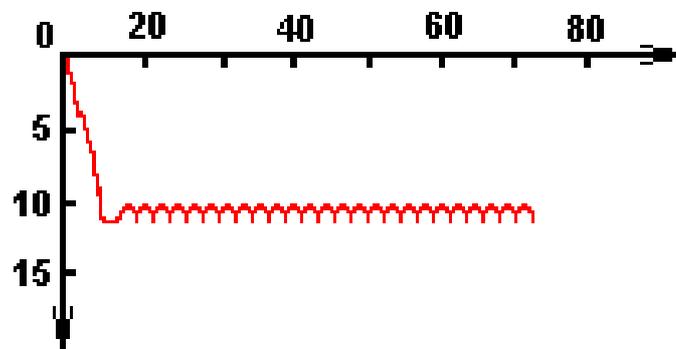


Figura 2.10 – Corrente de brilho de corona negativo

CANAIS DE PRÉ-RUPTURA NEGATIVOS

Aumentando-se ainda mais a tensão, a descarga ocupa uma porção maior do espaço entre eletrodos resultando na formação de canais condutores incompletos. Um novo incremento na tensão provoca uma ruptura completa.

CORONA POSITIVO

CANAIS INICIAIS

Elevando a tensão, campo crítico se estabelece no anodo, atraindo para este, elétrons que são acelerados da região de baixo campo e provocam a ionização na região de campo elevado, onde então, os elétrons se acumulam em torno do anodo e são rapidamente absorvidos por ele (Figura 2.11). A descarga pára quando a intensidade efetiva do campo próximo do anodo começa a cair até as condições iniciais. No entanto, a descarga se reinicia quando os íons positivos saem do anodo para o catodo e o campo na vizinhança do anodo atinge um valor elevado. Em alguns casos especiais, canais que se estendem tangencialmente sobre o anodo podem ser formados. Esses pulsos são caracterizados pelo baixo tempo de elevação e pequenas amplitudes.

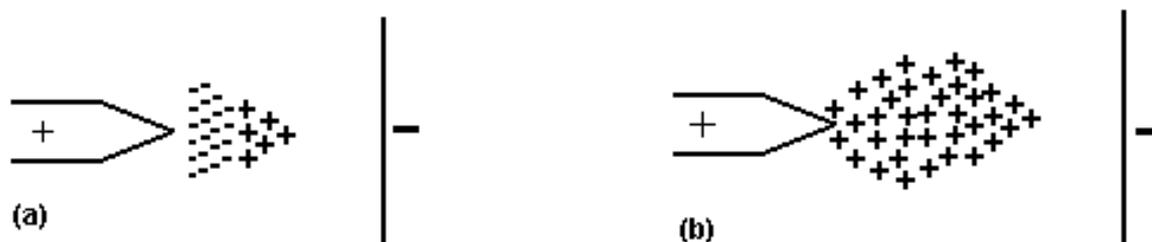


Figura 2.11 – Avalanche de corona positivo: (a) avalanche em progresso; (b) avalanche em pausa

BRILHO POSITIVO

Sob um valor de tensão um pouco superior, o campo no anodo torna-se forte o suficiente para proporcionar o surgimento de um canal condutor mesmo quando existirem cargas espaciais positivas próximas ao anodo. Neste caso se estabelece um fluxo contínuo de corrente.

CANAIS DE PRÉ-RUPTURA POSITIVOS

Ao continuar elevando a tensão, canais incompletos são formados resultando em um modelo de pré-ruptura até a ocorrência da descarga completa entre os eletrodos.

Em sistemas de Potência, o efeito corona ocorre nas linhas de transmissão e pode se manifestar em todas as modalidades discutidas devido à natureza senoidal das tensões AC, o que acentua a atenuação das ondas viajantes de alta tensão que se propagam ao longo dos condutores. Tal fato causa radio-interferência, ruído audível e perdas de potência. O efeito corona também encontra algumas aplicações industriais, tais como em máquinas fotocopadoras de alta velocidade, em precipitadores usados para controle da poluição de gases, em geradores HVDC de Van de Graff, nos sistemas de remoção de cargas indesejáveis em aviões e plásticos, etc. Recentemente os pulsos de corona começaram a ser usados para purificação de água, ar e para outras aplicações industriais.

2.6.3 RUPTURA EM GAPS DE CAMPOS NÃO-UNIFORMES

Em um espaçamento de eletrodos com campo não-uniforme, α e γ não são constantes, mas variam com o campo entre os dois eletrodos. Conseqüentemente, as equações para o crescimento de corrente mantêm uma relação de dependência com α e γ para cada posição. Caso o fator de campo $f = E_{max}/E_{av}$ seja menor do que cinco, o campo é chamado quase uniforme e o fenômeno de descarga é similar ao que ocorre sob campos uniformes. Porém, caso $f > 5$, o campo é não-uniforme, e a tensão de ruptura é fortemente influenciada pelo efeito corona e seus modelos.

Uma vez iniciadas as descargas corona, o campo elétrico é distorcido pelas cargas espaciais, e o processo de ruptura torna-se mais complexo. Se a solicitação no eletrodo é positiva, as cargas espaciais atuam como uma extensão do anodo. Por outro lado, se o eletrodo solicitado

é o catodo, as cargas espaciais atuam como um escudo o que reduz o campo em sua vizinhança e é necessária uma tensão mais alta para a ocorrência de uma ruptura completa. Conseqüentemente, em eletrodos com campo não-uniforme, a tensão disruptiva é menor para a polaridade positiva quando comparada com a negativa. Portanto, para aplicações práticas, a característica da tensão disruptiva negativa, para tensão contínua aplicada ao eletrodo com forma de ponta possui maior importância. A Figura 2.12 ilustra esquematicamente a dependência da tensão disruptiva em função da distância entre eletrodos e do diâmetro da esfera para configurações *Esfera-plano* sob tensão DC positiva. Existem três regiões principais onde a transição é dependente do diâmetro da esfera.

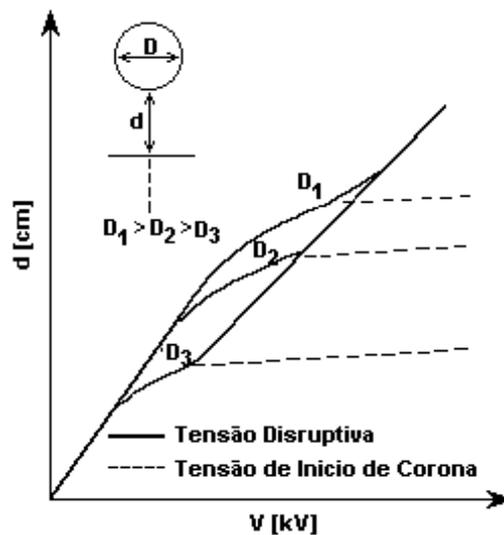


Figura 2.12 – Corona e tensão disruptiva em função do espaçamento para eletrodos *Esfera-plano*

- **REGIÃO 1.** Para pequenos espaçamentos, o campo elétrico é aproximadamente uniforme e a tensão de ruptura depende principalmente da distância entre os eletrodos. Não há corona neste caso.
- **REGIÃO 2.** Para espaçamentos médios, o campo elétrico possui não-uniformidade moderada. Similarmente à Região 1 não ocorre corona nestas regiões e o valor da tensão de ruptura é função do diâmetro da esfera e da distância entre os eletrodos.

REGIÃO 3. Se $d > 2D$, o campo é altamente não-uniforme e a ruptura é precedida por corona. A tensão de início de corona depende principalmente do diâmetro da esfera enquanto a tensão de ruptura depende da distância entre os eletrodos.

2.7 TEMPO PARA RUPTURA

O processo de ruptura – como qualquer outro fenômeno - se desenvolve durante um certo período de tempo que geralmente é muito curto e imperceptível sob tensões DC ou AC.

Entretanto, sob impulsos de tensão, este tempo torna-se importante desde que possa ser comparado com o tempo de frente dos impulsos de tensão ou com o seu próprio tempo de duração. Impulsos de tensão geralmente são utilizados para simular descargas atmosféricas ou sobretensões de manobra que ocorrem em sistemas de potência. Na maioria dos casos, o projeto de isolamento de componentes de sistemas de potência é baseada nas amplitudes das sobretensões de manobra.

O atraso de tempo entre o instante em que a tensão aplicada possui amplitude suficiente para causar ruptura e a real ocorrência do fenômeno da ruptura pode ser dividido em tempo estatístico (t_s) e tempo formativo (t_f). O tempo estatístico é o tempo necessário para o surgimento de um elétron livre na região de alta tensão entre os eletrodos após a aplicação de um impulso. Já o tempo formativo é o intervalo de tempo necessário para a ruptura completa, conforme mostrado na Figura 2.13. Desta forma a tensão de ruptura de impulso U_i é mais alta que a tensão estática de ruptura ou DC U_s . O tempo total de atraso, $t = t_s + t_f$, é inversamente proporcional ao valor de sobretensão, $\Delta U = U_i - U_s$. A natureza estatística do tempo de atraso leva a uma variação probabilística da tensão disruptiva e, conseqüentemente, são observadas variações nas formas da característica tensão–tempo para diferentes formas de tensão.

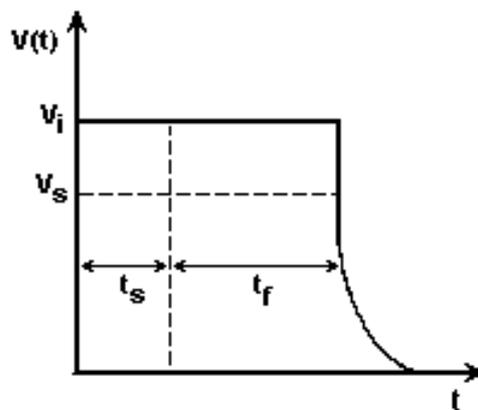


Figura 2.13 – Componentes do tempo de atraso sob tensão em degrau

2.8 DESCARGAS SOB IMPULSOS DE TENSÃO DE NANO SEGUNDOS

Na presença de campo elétrico, o número de elétrons cresce exponencialmente, então $n_x = n_0 \exp(\alpha x)$. No comprimento crítico da avalanche X_c , o número de elétrons no topo da avalanche passa a ser $n_x = n_c$, onde $n_c \approx 10^8$ para o ar. Neste caso, o campo de cargas espaciais torna-se comparável ao do campo eletrostático aplicado, as condições para a formação do canal ionizado são estabelecidas e a ruptura pode então acontecer. Para o caso mais conservativo, $n_0 = 1$, e o comprimento crítico da avalanche é dado por:

$$X_c = \frac{\ln(n_c)}{\alpha} \quad (2.47)$$

Se $X_c > d$ (distância entre eletrodos) a avalanche primária é incapaz de se transformar em um canal ionizado e para que aconteça uma ruptura, torna-se necessária a existência de avalanches subseqüentes. Se $X_c < d$, uma avalanche primária pode se tornar um canal desde que gere fótons o suficiente para ionizar as moléculas do gás nas extremidades da avalanche. Tais fótons são produzidos quando moléculas excitadas passam para o estado não excitado durante um tempo de dês-excitação (T_{dex}) - de 10^{-9} a 10^{-7} segundos [1] – que deve ser comparável ao tempo de impulso do elétron T_c , dado por:

$$T_e = \frac{\ln(n_c)}{\alpha v_e} \quad (2.48)$$

onde v_e é a velocidade do elétron na avalanche. Deste modo, das equações (2.47) e (2.48) as condições de formação do canal podem ser resumidas como:

$$X_c = \frac{\ln(n_c)}{\alpha} < d ; T_e = \frac{\ln(n_c)}{\alpha v_e} > T_{dex} \quad (2.49)$$

Estas condições podem ser alcançadas se um impulso de alta tensão de nano segundos de duração for aplicado ao eletrodo e, sob tais condições de tensão, para que a descarga se complete, deve ser produzido um alto número de avalanche de elétrons por fotoelétrons próximos ao catodo. Na iniciação de multi-avalanche uma corrente de cargas espaciais, comparável com a máxima corrente do circuito torna-se possível com a aplicação de um campo elétrico muito mais alto que o associado com DC, AC e com impulsos de tensão de manobra ou de descargas atmosféricas. Pulsos de tensão de nano segundos podem produzir corona muito intenso com a aplicação de campos elétricos elevados. Uma de suas vantagens é o baixo consumo de energia, uma vez que somente elétrons são acelerados por não haver tempo suficiente para aceleração de íons. Em tais circunstâncias a temperatura do gás permanece baixa e a faísca é evitada exceto na aplicação de valores de campos extremamente altos.

2.9 TIPOS DE CENTELHADORES DE DESCARGAS

Uma descarga entre eletrodos significa uma falha completa do isolamento entre duas superfícies carregadas. Isto ocorre na forma de faísca em microgaps (<1 mm) onde o gradiente de potencial é grande o suficiente para iniciar uma descarga. Em um dado arranjo, ambos os

eletrodos ou apenas um eletrodo é capacitivamente acoplado a uma fonte de tensão ou a terra. A Figura 2.14 mostra um arranjo típico de descargas em centelhadores onde um dos eletrodos é capacitivamente acoplado a uma fonte de alta tensão. Associado a esta descarga há uma corrente de impulso caracterizada por um valor de crista muito alto (de poucos ampères a dezenas de ampères) e um tempo de frente extremamente curto ($\approx 1.0\text{ns}$). Esta descarga pode ser repetitiva dependendo do local entre os eletrodos. Ainda, este tipo de descarga é um espectro largo e fonte de ruído eletromagnético (acima de centenas de MHz) que pode ser irradiado ou conduzido a longas distâncias causando severas interferências nos computadores vizinhos, sistemas de controle e comunicações [3,4].

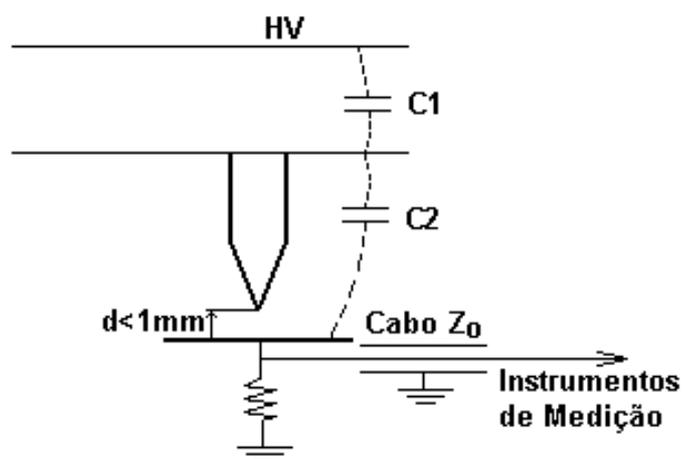


Figura 2.14 – Arranjo de eletrodos

As descargas em centelhadores não são restritas às linhas de extra-alta tensão, mas podem também ocorrer em sistemas de distribuição imprópriamente projetados ou construídos, desde que a tensão entre os eletrodos alcance um certo valor crítico. Existem casos de descargas onde a faísca pode ocorrer em um mau contato entre partes metálicas expostas a alta tensão. Dentre eles pode-se citar:

- 1- entre topo e pinos de isoladores;
- 2- entre cruzetas flutuantes anexadas em postes de madeira;
- 3- em junções de fios de isoladores e torres de linhas de transmissão;
- 4- entre espaçadores e subcondutores de linhas de transmissão a multicondutores.

Maus-contatos entre partes metálicas podem ser causados por corrosão, poeira ou poluição seca, ou ainda por outros fatores como vibrações devido ao vento, carga mecânica insuficiente e mudanças de dimensões devido a variações de temperatura. Uma micro-descarga também pode ocorrer durante uma chuva em um micro espaçamento entre uma gota de água e a linha de transmissão, ou entre duas gotas de água perto da linha de transmissão [5,6]. A Figura 2.15

mostra uma forma de onda de descarga de corrente resultante de uma descarga em centelhador.

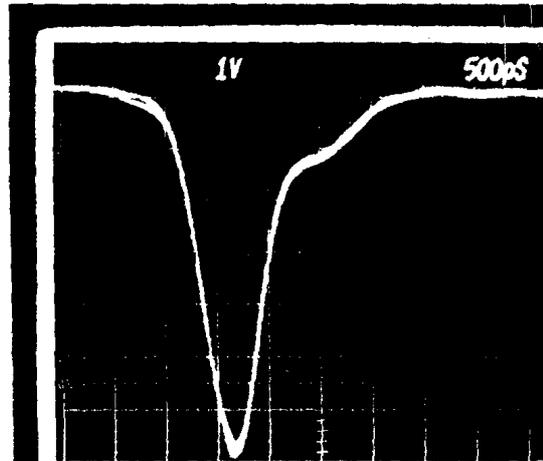


Figura 2.15 – Típica descarga de corrente entre eletrodos

2.10 ESCOLHA DE GASES DIELÉTRICOS

Um gás isolante ideal deve ser barato, química e termicamente estável, e não formar produtos tóxicos, corrosivos ou inflamáveis sob solitação elétrica prolongada; deve ter boas propriedades de transferência de calor e de extinção de arco, além de baixa temperatura de condensação mesmo quando pressurizado. E o mais importante, deve ter alta rigidez dielétrica em campo elétrico uniforme ou não-uniforme sob tensão alternada, contínua ou impulso, e não sofrer perdas de qualquer dessas características em uso prolongado.

O SF₆ e o ar são os gases mais utilizados em isolamento de sistemas de alta tensão por possuírem a maioria das propriedades desejadas em um gás isolante. Apesar do desempenho satisfatório do SF₆ no isolamento de equipamentos de alta tensão, a utilização de gases alternativos vem sendo pesquisada. Um gás com alta força dielétrica permite que projetos já existentes sejam operados em alta tensão, e ainda, a redução de tamanho dos equipamentos, o que significa menor quantidade de gás, de invólucro e outros materiais isolantes. As outras propriedades consideradas para o melhor gás são a imunidade contra a partícula inicial para ruptura, a aparição de rugosidade e área de efeito [6]. Um gás similar a ser usado em interruptores como substituto para o SF₆ deve possuir propriedades extintoras de arco tão boas como do primeiro.

A força dielétrica de um gás tem origem na sua habilidade de capturar elétrons livres acima de uma larga banda de energia, no entanto a maioria dos gases dielétricos captura elétrons efetivamente apenas em uma restrita banda de baixa energia; e.g., SF₆ captura elétrons com energia $\leq 0,4$ eV. Além desta faixa de energia, a captura de elétron pelo SF₆ (σ_a) decresce

rapidamente, e elétrons com alta energia terminam por escapar. O comportamento de σ_a de SF_6 também explica o considerável decréscimo na força dielétrica do gás SF_6 sob campos não uniformes, superfícies rugosas, e partículas de contaminação. Dentro deste contexto, a pesquisa por novos gases visa o alto σ_a . A Tabela 2.3 mostra algumas propriedades de alguns gases dielétricos. É claro que gases isolantes tais como perfluorocarbonos que se destacam pelo alto σ_a que exibem alta tensão de ruptura e custos satisfatórios, no entanto, propriedades como toxicidade, baixa pressão de vapor, ponto de ebulição, tendência à carbonização e perigos ambientais também devem ser considerados. Como mostrado na Tabela 2.3, perfluoro-n-butano (C_4F_8) possui um valor de rigidez dielétrica tão alta quanto o SF_6 por um fator de 1,5. Mas seu ponto de ebulição alto (+2.0°C) em comparação com o do SF_6 (-64°C), dispensa a aplicação em estados resfriados ou comprimidos. A grande potencialidade para novas práticas de gases isolantes então reside no desenvolvimento de misturas de componentes cinérgicos, os componentes que são selecionados com base em suas propriedades físico-químicas individuais [7,8].

Tabela 2.3 – Rigidez dielétrica relativa de alguns gases em campos uniformes a 1.5 bar ($SF_6 = 1$)

NOME	FÓRMULA	PONTO DE EBULIÇÃO [°C]	RIGIDEZ DIELÉTRICA
Hexafluor -2 - butino	C_4F_6	-25	2.2
Pentafluoreto de enxofre trifluormetil	CF_3SF_5	-20	1.55
Fluoreto de trifluormetanosulfonil	CF_3SO_2F	-22	1.49
Fluoreto de tionil	SOF_2	-44	1.42
Trifluornitrometano	CF_3NO_2	-31	1.34
Perfluor-n-butano	C_4F_8	2	1.5
Cloropentafluoretano (F - 115)	C_2F_5Cl	-39	1.13
Perfluor-butano	C_4F_{10}	-2	1.06
Dióxido de Enxofre	SO_2	-10	1.0
Hexafluoreto de Enxofre (F-12)	SF_6	-64	1.0
Diclorodifluoretometano	CCl_2F_2	-30	0.99
Octofluoropropano (F218)	C_3F_8	-37	0.98
Perfluordimetil eter	C_2F_6O	-59	0.84
Hexafluoretano (F-116)	C_2F_6	-78	0.79
Bromotrifluormetano (F-1381)	$CBrF_3$	-58	0.75
Clorotrifluoretileno (CTFE)	C_2F_3Cl	-28	0.69
Óxido nitroso	N_2O	-89	0.5
Tetrafluoreto de carbono	CF_4	-128	0.42
Ar	$N_2 + O_2$		0.37
Nitrogênio	N_2	-196	0.37
Dióxido de carbono	CO_2	-79	0.32

2.11 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 2

1. E. Naser, *Fundamental of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, Wiley Interscience, New York, 1971.
 2. M.S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi, Índia, 1982.
 3. A.A. Al-Arainy, "Laboratory Analysis of Gap Discharge on Power Lines", Ph.D. thesis, University of Toronto, Canada, 1982.
 4. W. Janischewskyj and A.A. Al-Arainy "Corona Characteristics of Simulated Rain", IEEE Trans. On PAS, Vol. 100, No. 2, pp. 539-551, 1981.
 5. A.A. Al-Arainy, " The Effects of Rain on Electromagnetic Characteristics of Corona", M.Sc. thesis, University of Toronto, Canadá 1977.
 6. L.G. Christophorous, *Gaseous Dielectrics*, Vol. II. Pergamon Press, New York, 1980.
 7. L.G. Christophorous and L.A. Pinnaduwege, "Basic Physics of Gaseous Dielectrics", IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol 25, No 1, pp. 55-74, 1990.
 8. L.G. Christophorous and S.J. Dale, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, R.A. Meyors (ed.), Vol 4, pp. 246-262, Academic Press, New York, 1987.
- I . *Electrical Insulation in Power Systems* N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi Marcel Dekker Inc. New York - 1998

3 – ISOLAMENTO EM AR ^[1]

O ar é o gás mais utilizado para o isolamento de sistemas e redes de potência de média e alta tensão porque além de não possuir preço de manufatura é abundante e se reconstitui após os processos de ruptura. A capacidade auto-regenerativa do ar é um fator determinante para os projetistas e operadores de equipamentos de alta tensão. Por este motivo os modos de pré-ruptura e ruptura do ar têm sido objeto de ampla investigação desde o começo do século passado, o que tornou disponível uma vasta literatura e inúmeros dados. Deste modo, com base nestas informações, as recomendações internacionais para espaçamentos em ar foram definidas e utilizadas nos projetos de isolamento em ar, linhas de potência de alta tensão e outros equipamentos.

3.1 – UTILIZAÇÃO DE ISOLAMENTO EM AR E SUA MODELAGEM PARA ENSAIOS

O ar é utilizado como elemento isolante em sistemas elétricos de potência de alta tensão para instalação externa e interna – tanto para distâncias Fase-fase quanto para distâncias Fase-terra. Adicionalmente o ar também se encontra presente em centelhadores para proteção e medição. Devido à grande variedade de aplicações os sistemas de eletrodos em ar apresentam as mais variadas formas. No entanto, a maioria destes casos pode ser modelada por meio de configurações simples de eletrodos.

Tabela 3.1 – Isolamento em ar nos sistemas de potência e tipos de eletrodos utilizados em Laboratório para investigação de suas características dielétricas

PARTE DO SISTEMA DE ALTA TENSÃO	FUNÇÃO	TIPO DE ELETRODOS UTILIZADOS PARA ENSAIOS
<i>Isolamento Fase-fase</i>	<i>Prover isolamento entre duas fases de uma linha de transmissão em corrente alternada ou entre pólos opostos de uma linha bipolar em corrente contínua</i>	<i>Cilindros paralelos ou eletrodos Haste-plano para simular o pior caso de uma haste no condutor oposto ao outro condutor</i>
<i>Isolamento Fase-torre ou Fase-terra</i>	<i>Prover isolamento entre condutor fase e torre aterrada ou o próprio terra</i>	<i>Condutor-plano, ou eletrodo Haste-plano</i>
<i>Isolamento entre condutores de pequeno diâmetro e objetos aterrados</i>	<i>Prover isolamento entre um condutor energizado e um objeto plano aterrado em frente ao mesmo. Este tipo de geometria apresenta os menores valores de tensão de ruptura</i>	<i>Eletrodos Ponto-plano, ou Haste-plano</i>
<i>Centelhadores Esfera-esfera</i>	<i>Medidas de alta tensão e impulsos de manobra em geradores de impulso</i>	<i>Eletrodos Esfera-esfera</i>
<i>Proteção em alta tensão ou centelhadores de medição</i>	<i>Descarregar surtos de alta tensão para a terra após ruptura. Geração de formas de impulso cortadas. Medidas diretas de alta tensão</i>	<i>Eletrodos Haste-haste</i>

A Tabela 3.1 fornece a correlação entre as principais configurações de eletrodos em ar existentes nos principais elementos dos sistemas de potência e os tipos de eletrodos comumente adotados na avaliação do seu comportamento dielétrico.

3.2 – SOLICITAÇÕES DE TENSÃO

Além das solicitações devidas à tensão nominal, os componentes dos sistemas de potência de alta tensão estão submetidos a freqüentes esforços devidos a sobretensões causadas por faltas na rede, transitórios resultados das descargas atmosféricas (surtos atmosféricos) ou de manobras no sistema (surtos de manobra).

Deste modo, dependendo da tensão de operação, o dimensionamento dos sistemas de isolamento é definido pelo comportamento dos espaçamentos em ar quando submetidos a descargas atmosféricas padrão ou a impulsos de manobra padrão. Para sistemas com classe de tensão nominal inferior a 300 kV eficazes, o comportamento frente a impulsos atmosféricos é determinante. Já para sistemas com classe de tensão superior o comportamento frente aos impulsos de manobra se torna o dominante. Portanto, para o projeto dos sistemas de isolamento em ar é necessário conhecer, da forma mais completa possível, os mecanismos de ruptura sob impulsos atmosféricos e de manobra.

3.3 – PROBABILIDADE DE RUPTURA FRENTE A IMPULSOS

Como mencionado, para condições de temperatura constante, a tensão de ruptura para tensões contínuas e alternadas de um espaçamento em ar sob a presença de campo não uniforme depende da pressão do gás – P e da distância entre os eletrodos – d . Quando a distribuição do campo é não uniforme, a tensão de ruptura também sofre influência da presença de corona. E cargas espaciais entre os eletrodos e os arranjos de eletrodo com distribuição de campo assimétrica possuem pronunciado efeito de polaridade. Conforme se observa, a aplicação de tensões de polaridade positiva aos arranjos de eletrodo, resulta em valores de tensão de ruptura inferiores aos correspondentes valores para polaridade negativa. Logo fica justificada a importância dos dados de ruptura de polaridade positiva.

Para espaçamentos em ar o valor da tensão disruptiva sob impulsos exhibe variações estatísticas devido aos atrasos de tempo estatístico e de formação. Conseqüentemente, quando um dado sistema de eletrodos é submetido repetidas vezes a impulsos com amplitude fixa existe associada a cada uma das aplicações uma probabilidade de ruptura. Para impulsos de tensão, existe uma função de probabilidade que indica a variação da probabilidade de ruptura com o valor da tensão aplicada, de onde os seguintes parâmetros podem ser determinados:

CFO - $U_{50\%}$ - *Tensão Disruptiva Crítica ou Tensão de 50%* - Amplitude do impulso que apresenta 50% de probabilidade de ruptura;

$U_{0\%}$ - *Tensão Suportável Garantida ou Nível de Suportabilidade* – Maior amplitude de impulso para o qual ocorre ruptura.

$U_{100\%}$ - *Tensão Não Suportável Garantida ou Nível de Falha* – Menor valor de impulso para o qual ocorre ruptura.

σ - *Desvio padrão da tensão disruptiva.*

COV = $\sigma/U_{50\%}$ - *Coeficiente de variação da tensão disruptiva.*

Para o comportamento da tensão disruptiva, a maioria dos espaçamentos em ar apresenta uma *Distribuição de Probabilidade Gaussiana ou Normal*. Deste modo, o gráfico da probabilidade versus tensão disruptiva é uma linha reta quando traçada em um papel com escala probabilística - linear como mostrado na Figura 3.1. Algumas vezes a função da probabilidade de ruptura não é normal devido à presença de cargas espaciais ou a algumas variações experimentais. Deste modo, é possível obter funções de distribuição de probabilidade mistas.

Para uma função de distribuição de probabilidade normal, σ pode ser calculado por meio da Equação 3.1:

$$\sigma = U_{84\%} - U_{50\%} = U_{50\%} - U_{16\%} \quad (3.1)$$

Além disso, em termos práticos é usual considerar que, $U_{0\%} \approx U_{50\%} - 3\sigma$ e $U_{100\%} \approx (U_{50\%} + 3\sigma)$. No entanto, cabe ressaltar que a referência para os dados de ruptura dos sistemas de eletrodos em ar é o valor $U_{50\%}$, conhecido como – *Tensão Disruptiva Crítica*.

3.4 – CARACTERÍSTICAS DA TENSÃO DE RUPTURA

A Tabela 3.1 mostra que diferentes configurações de eletrodos são utilizadas para simular arranjos de campo reais existentes. Para a maioria das aplicações, as configurações empregadas apresentam uma distribuição de campo não-uniforme. Outros fatores que podem influenciar o comportamento dos isolamentos em ar são a forma do impulso de tensão, a polaridade, a pressão atmosférica, a temperatura e a umidade do ar bem como a presença de poluição atmosférica.

3.4.1 ELETRODOS BÁSICOS

Como discutido, ensaios em modelos em laboratório são utilizados para simular o comportamento de eletrodos reais de sistemas de alta tensão. Os arranjos de eletrodos geralmente utilizados nos estudos sobre o comportamento dos isolamentos em ar são:

- 1 – *Eletrodos Esfera-esfera*: Estes arranjos de eletrodos possuem uma distribuição de campo simétrica e uniforme além dos valores mais elevados de tensão disruptiva média. Estes valores dependem do diâmetro da esfera, da distância entre os eletrodos e da polaridade e forma do impulso de tensão.
- 2 – *Eletrodos Haste-haste*: Estes arranjos de eletrodos apresentam uma distribuição de campo simétrica, mas não-uniforme; suas aplicações estão listadas na Tabela 3.1
- 3 – *Eletrodos Haste-plano*: Estes arranjos possuem uma distribuição de campo assimétrica e não-uniforme; estes eletrodos geralmente possuem os valores mais reduzidos de tensão disruptiva média.

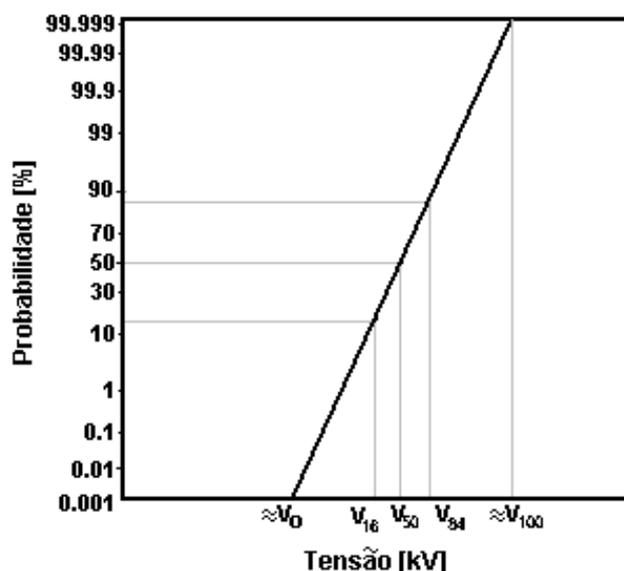


Figura 3.1 – Distribuição normal da probabilidade da tensão de ruptura

3.4.2 CENTELHADORES HASTE-PLANO

No dimensionamento das distâncias entre Fase-fase e Fase-torre das linhas de transmissão são utilizados dados de ruptura obtidos através de ensaios em eletrodos *Haste-plano*. Para linhas de média e alta tensão, o vão mínimo em ar é determinado pelas solicitações em frequência industrial, pelos mecanismos que controlam a disrupção dos isoladores, pelo efeito corona e pelo nível de suportabilidade sob impulsos atmosféricos. No entanto, para as linhas de extra-alta tensão os impulsos de manobra positivos são as solicitações mais críticas. Por esse motivo, os dados sobre o comportamento dos eletrodos *Haste-plano* sob impulsos de

manobra de polaridade positiva têm sido objeto de estudo por parte de alguns pesquisadores. Deste modo, várias fontes têm proposto fórmulas empíricas para a relação entre tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ e a distância entre eletrodos, considerando a configuração *Haste-plano* sob impulso de manobra de polaridade positiva.

A Tabela 3.2 apresenta várias destas fórmulas e a sua correspondente faixa de aplicação. Por sua vez, a Figura 3.2 mostra a relação entre $U_{50\%}$ e a distância entre eletrodos usando algumas das fórmulas mencionadas na Tabela 3.2. É interessante ressaltar que existe uma concordância sobre a ausência de uma única fórmula capaz de representar os fenômenos de ruptura entre eletrodos haste e plano para distâncias até **30 metros**. No entanto, é interessante observar que para as distâncias de isolamento normalmente utilizadas na construção de equipamentos e sistemas de potência, a maioria destas fórmulas apresenta resultados similares. Também é digno de nota que é possível observar a existência de alguma saturação no valor da tensão de ruptura com o aumento da distância entre eletrodos. Finalmente vale realçar que não existe uma concordância sobre o comportamento dos eletrodos *Haste-plano* para distâncias elevadas, ou seja, $d > 30$ metros. A tendência à saturação mostrada na Figura 3.2 sugere a existência de um limite superior para o nível de tensão para linhas de transmissão de extra-alta tensão.

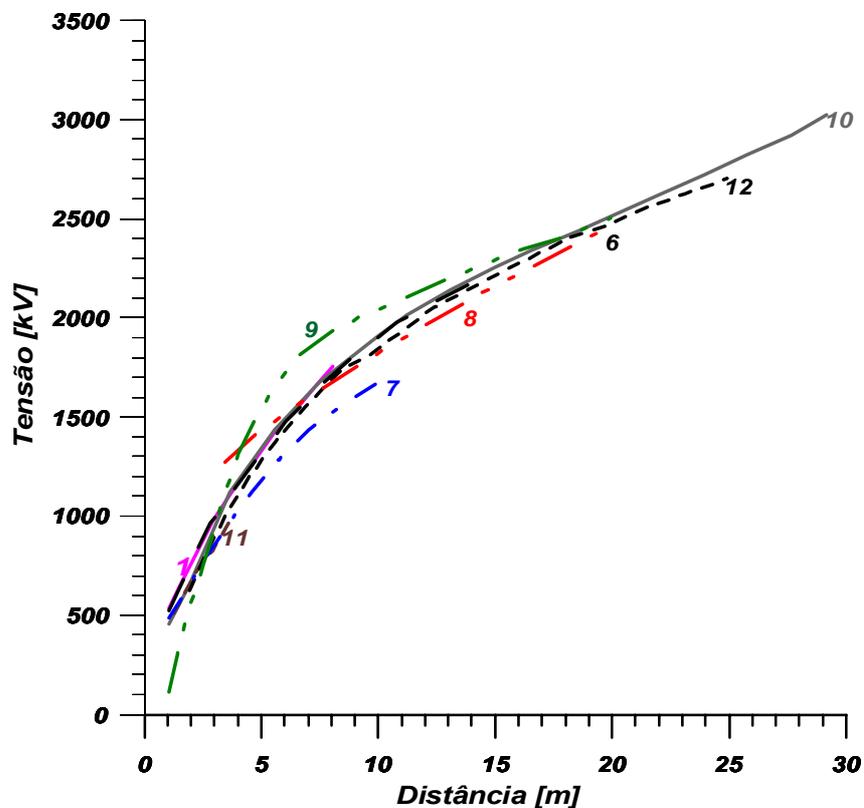


Figura 3.2 – $U_{50\%}$ tensão de ruptura como função do espaçamento utilizando as várias fórmulas mencionadas na Tabela 3.2. Números entre parênteses indicam a referência.

Tabela 3.2 – Fórmulas de tensão disruptiva para eletrodos haste-plano sob impulsos de manobra positivos

U_{50} [kV]	FAIXA [m]	REFERÊNCIA	EQUAÇÃO
$500 (d^{0,6})$	$2 \leq d \leq 8$	PARIS [1]	3.2
$3400/(1+8/d)$	$d \leq 15$	GALLET ET AL. [6]	3.3
$450[1+1,33 \text{Ln} (d - \text{Ln} d)]$	$d \leq 10$	LEMKE [7]	3.4
$[1,5 \times 10^6 + 3,2 \times 10^5 d]^{0,5} - 350$	$d \leq 20$	WATERS [8]	3.5
$1260r[1 - (r/d)]^{0,5} \tanh^{-1} \sqrt{(1-r/d)}$	$d \leq 20$	ALEKSANDROV [9]	3.6
$1400 + 55d$	$13 \leq d \leq 30$	PIGINI ET AL. [10]	3.7
$[1556 + 50d]/(1 + 3,89/d) + 78$	$d \geq 4$	RIZK [11]	3.8
$1080 \text{Ln} (0,46d + 1)$	$d \leq 25$	KISHIZIMA ET AL. [12]	3.9

$d = \text{espaçamento em ar}; r = \text{raio da haste (ambos em metros)}$

3.4.3 EFEITO DA FORMA DOS ELETRODOS

Foi demonstrado por Paris [1] que o valor de $U_{50\%}$ de algumas configurações de isolamento em ar solicitados por impulsos de manobra positivos é proporcional ao valor de U_{50} de uma configuração *Haste-plano* de mesmo espaçamento em ar. Este comportamento é mostrado pela Equação 3.10:

$$U_{50}^x = K U_{50}^{p-p} \quad (3.10)$$

onde

U_{50}^x - Valor da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ para uma configuração x de eletrodos em ar, e

U_{50}^{p-p} – Valor da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ para a configuração de eletrodos Haste-plano para uma mesma distância em ar e um fator de forma = K .

Posteriormente, vários outros pesquisadores investigaram este assunto com a intenção de estabelecer limites para o fator de forma K e as suas faixas de aplicação [2-5]. Com base nestes dados a Tabela 3.3 mostra os valores de K para as configurações mais usuais de eletrodos onde, como esperado, vê-se que o fator de forma varia com a geometria do eletrodo. Normalmente caso $K > 1,6$, a tensão suportável para impulsos negativos de manobra é inferior à polaridade positiva [5]. Nestes casos, os dados de suportabilidade para impulsos com polaridade negativa possuem maior significado devendo ser utilizados como referências de projeto.

Tabela 3.3 – Fator de forma – K para um número de configurações usuais de eletrodos

CONFIGURAÇÃO DOS ELETRODOS	FATOR DE FORMA (K)
<i>Haste-plano</i>	1
<i>Condutor-plano</i>	1,12 – 1,25 (Dependendo de d)
<i>Haste-haste horizontal sobre acima do chão</i>	1,35 – (d/H ₁ – 0,5)
<i>H₁ = Altura das hastes ao chão para Haste-haste vertical</i>	1 + 0,6 [H/(H+d)]
<i>Condutor-haste</i>	(1.1 a 1.15) ^ [0,7H/(H/H + d)]
<i>Condutores Paralelos</i>	1,6 – 1,75 (Dependendo de d)
<i>Condutor-cabo</i>	1,4
<i>Condutor-Mão francesa</i>	1,45 (Valor típico)
<i>Condutor-Janela</i>	1,25 (Valor típico)
<i>H = Altura da haste aterrada, d = Espaçamento em ar</i>	

3.4.4 INFLUÊNCIA DA FORMA DO IMPULSO

A amplitude da tensão disruptiva depende da forma do impulso aplicado uma vez que o montante de cargas espaciais injetadas no espaçamento entre os eletrodos no período pré-ruptura é função do tempo necessário para a tensão atingir o seu valor de crista. Isto é devido à presença das cargas acumuladas que durante o processo de pré-descarga modificam a distribuição do campo elétrico e, conseqüentemente, influenciam os mecanismos de disrupção.

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a amplitude da tensão disruptiva em função da distância entre eletrodos, para diferentes formas de impulso, para as configurações de eletrodos Haste-plano e Haste-haste, respectivamente. Nestas figuras é possível observar que para algumas distâncias em ar, a configuração Haste-plano apresenta valores de tensão disruptiva similares ou quase similares à configuração Haste-haste. Além disto, a amplitude da tensão disruptiva, sob impulsos de polaridade positiva é geralmente inferior à amplitude para os impulsos negativos correspondentes. Em alguns raros casos, especialmente sob a presença de valores elevados de umidade, os espaçamentos em ar podem se romper sob impulsos negativos de amplitude inferior aos positivos correspondentes [11]. Os resultados da Figura 3.3 evidenciam a existência de tempos de crista críticos, correspondentes à amplitude da tensão disruptiva mínima, para configurações de eletrodos *Haste-plano* sob impulsos positivos. Conforme se observa, com o aumento no tempo de frente do impulso, a amplitude tensão disruptiva diminui até um certo valor crítico. A partir de aumentos posteriores do tempo de frente, a amplitude da tensão disruptiva começa a aumentar. Deste modo é obtida uma curva típica, em forma de “U” para a relação entre a amplitude da tensão disruptiva e o tempo de frente como as mostradas na Figura 3.5.

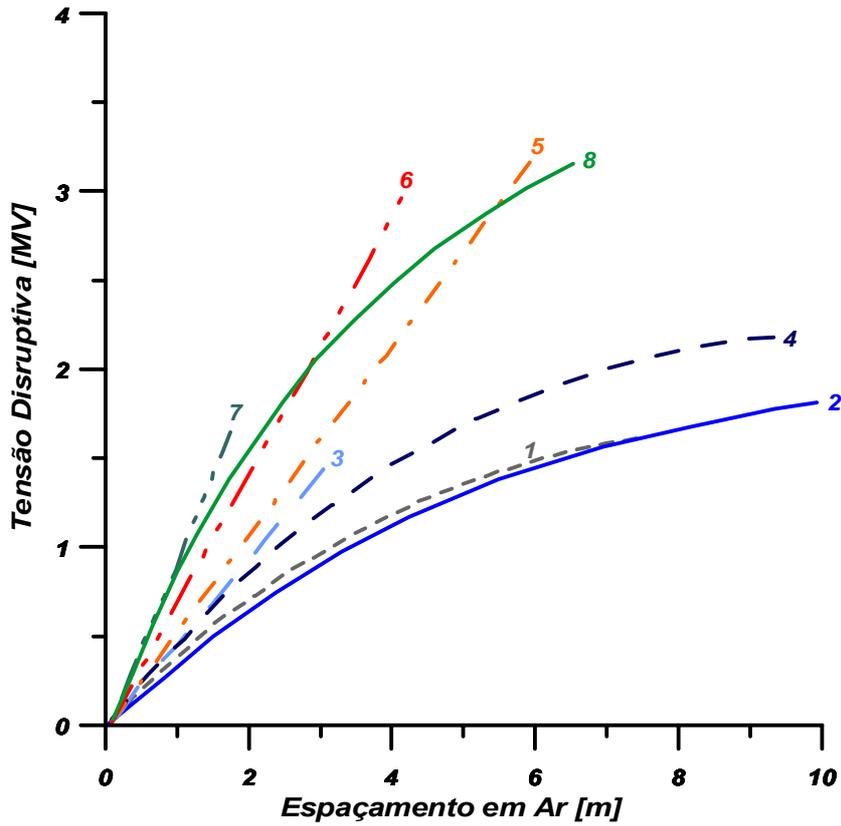


Figura 3.3 – Característica da tensão disruptiva para eletrodos Haste-plano

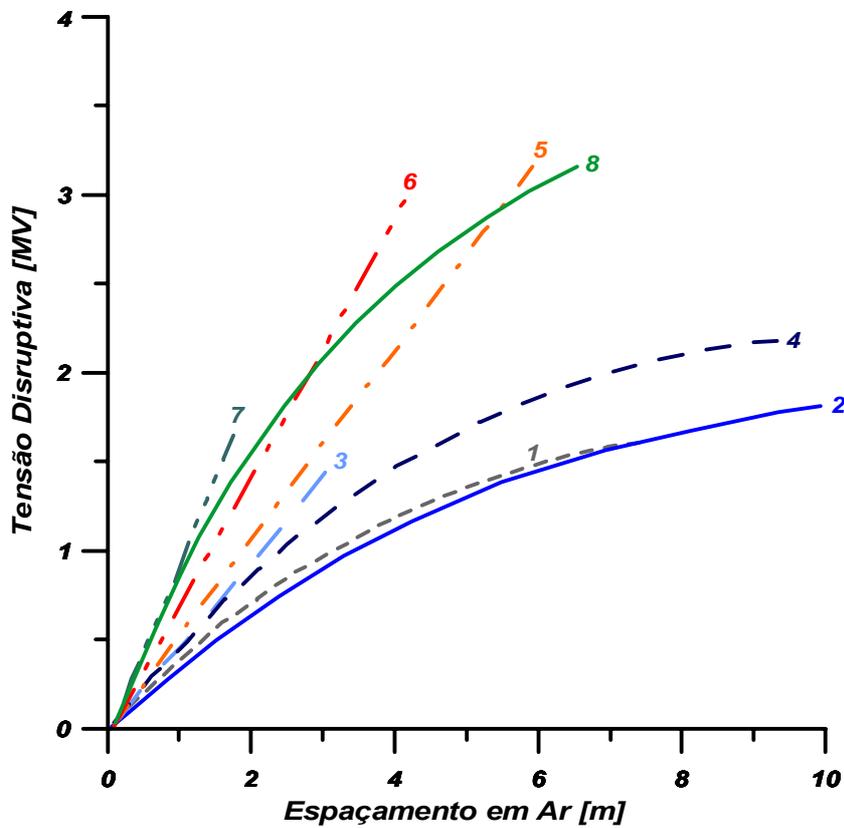


Figura 3.4 –Característica da tensão de ruptura para Haste-haste

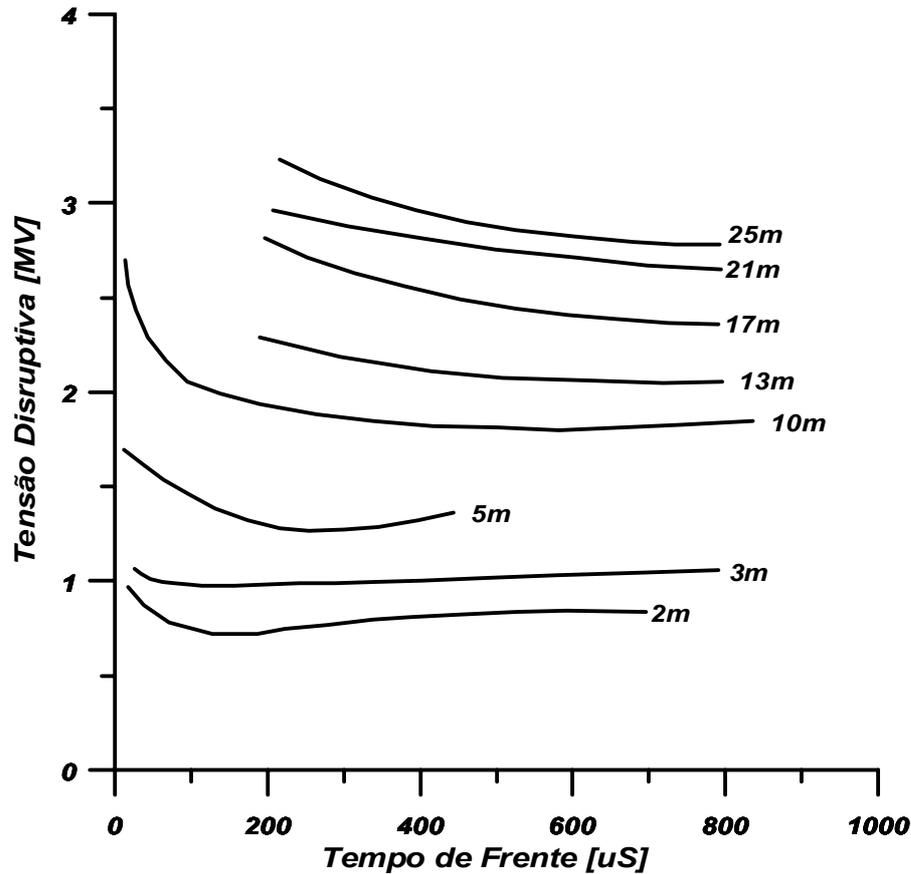


Figura 3.5 – Influência do tempo de frente do impulso na tensão de ruptura de eletrodos haste-plano positiva

Do ponto de vista da utilização e projeto de isolamentos em ar, as piores combinações, ou seja, as que resultam nas menores amplitudes da tensão disruptiva, são as configurações que apresentam comportamento similar ao dos eletrodos *Haste-plano* sob impulsos de manobra positivos com tempo de frente crítico – t_{cr} . O tempo de frente crítico – t_{cr} em μs pode ser relacionado à distância e à forma dos eletrodos como mostra a Equação 3.11 [13]:

$$t_{cr} = [50 - 35(K - 1)]d \quad (3.11)$$

onde K é o fator de forma.

No projeto de linhas de extra-alta tensão e ultra-alta tensão são utilizados impulsos com tempo de crescimento igual a t_{cr} . Dados relativos à influência do tempo de cauda do impulso $t_{50\%}$ no valor de tensão disruptiva são escassos. Os atuais estudos [14] mostram que $U_{50\%}$ e $U_{10\%}$ aumentam com a redução da cauda do impulso contanto que t_{cr} seja mantido mais ou menos constante. Em geral se $t_{50\%} \gg t_{cr}$, a tensão disruptiva torna-se menos sensível a mudanças nos valores de $t_{50\%}$.

3.4.5 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS

Parâmetros atmosféricos como temperatura, pressão, umidade, chuva ou ainda neve e vento podem influenciar na amplitude da tensão disruptiva. O aumento na temperatura absoluta resulta em um aumento na distância entre moléculas. Este fenômeno apresenta o mesmo efeito que a redução da pressão e vice-versa. Estas duas variáveis, ou seja, P e T , podem ser combinadas com base na densidade relativa do ar - δ que é definida conforme mostra a Equação 3.12:

$$\delta = \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) = \left(\frac{P}{760} \right) \left(\frac{273 + 20}{273 + T_a} \right) \quad (3.12)$$

onde P_0 = pressão atmosférica padrão ao nível do mar = 1013 mbar (ou 101,3 kPa), T_0 = temperatura ambiente padrão = 20°C, T_a = temperatura ambiente atual em °C e P = pressão atmosférica atual em mbar.

Em geral, um aumento na densidade relativa do ar resulta em um aumento na tensão disruptiva. A umidade do ar influencia alguns parâmetros físicos da descarga tais como a ionização e os coeficientes relacionados. Conseqüentemente, o valor da tensão disruptiva é influenciado por mudanças na umidade absoluta do ar - H , em peso de água por unidade de volume de ar (g/m^3). Geralmente a tensão disruptiva aumenta com a umidade absoluta do ar H ao longo da faixa usual de valores de $2 \leq H \leq 25 g/m^3$. A extensão deste incremento depende da configuração de campo, da distância entre os eletrodos, da forma e da polaridade do impulso aplicado, e do valor de H . Embora exista um certo acordo sobre os métodos de correção de umidade K_h recomendados pelas normas [15,16], ainda existem várias discordâncias entre pesquisadores [3,17,18]. De acordo com as *Normas Internacionais - IEC* [15], os seguintes fatores de correção são aplicáveis para tensões disruptivas obtidas em condições atmosféricas diferentes das condições padrão:

1. Fator de correção de densidade do ar - k_1 , que é dado pela Equação 3.13:

$$k_1 = \delta^m \quad (3.13)$$

onde m é um expoente que depende da geometria do eletrodo, distância entre eletrodos e forma do impulso de tensão aplicado.

2. Fator de correção de umidade - k_2 . Quando a umidade absoluta - H é diferente da umidade padrão de $11 g/m^3$, deve ser aplicado o fator de correção de umidade definido pela Equação 3.14:

$$k_2 = k^w \quad (3.14)$$

onde w é um expoente similar a m e k é obtido pela Equação 3.15:

$$k = 1 + A \left[\frac{H}{\delta} - 1 \right] \quad (3.15)$$

sendo $A = 0,01$; $0,012$ e $0,014$ para impulso, e tensões alternadas e contínuas, respectivamente.

A Figura 3.6 mostra os valores dos expoentes m e w em função de g , onde g é definido pela Equação 3.16:

$$g = \frac{U_{50}}{500dk\delta} \quad (3.16)$$

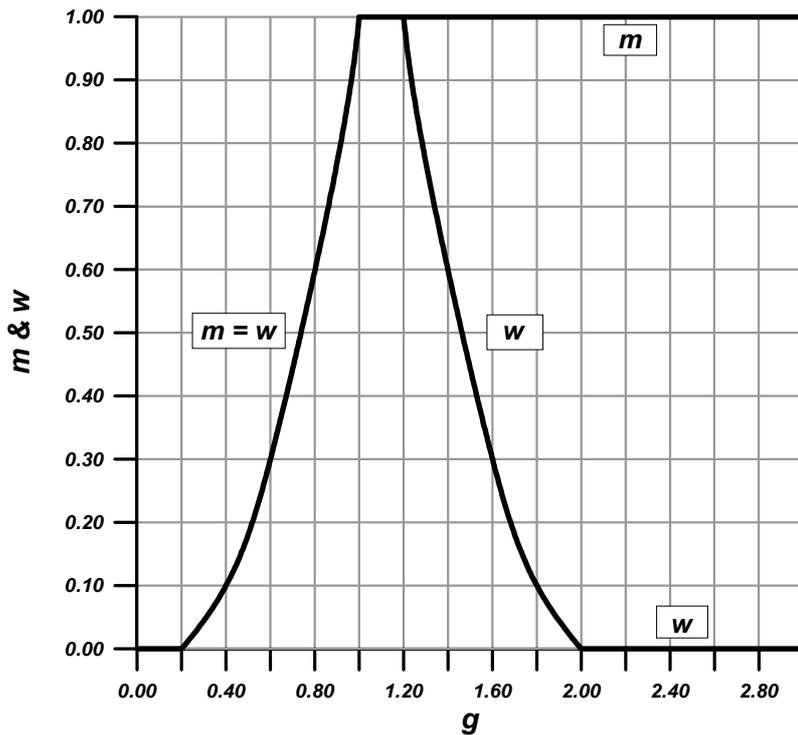


Figura 3.6 – Valor dos expoentes m e n nas equações (3.13) e (3.14) de acordo com IEC 60-1

Deste modo, o valor de tensão disruptiva real, obtida dos ensaios em condições diferentes das condições padrão - U_E é corrigido para as condições atmosféricas padrão U_S pela Equação 3.17:

$$U_E = U_S \cdot k_t = U_S (k_1 \cdot k_2) \quad (3.17)$$

A Tabela 3.4 mostra alguns valores típicos de T , P e H em diferentes regiões geográficas e suas influências na tensão disruptiva. Da Tabela 3.4, pode-se notar que P , T e H representam um importante papel no projeto de isolamento em ar. Por exemplo, um certo espaçamento em ar localizado na região 3 irá romper a uma tensão de apenas $\approx 65\%$ da tensão necessária para romper o mesmo espaçamento na região 2.

Tabela 3.4 – Exemplos da influência de T_a , P e H no impulso de tensão de ruptura de espaçamento em ar de eletrodos Haste-plano

T_a [°C]	P [mbar]	H [g/m ³]	K_1	K_2	$U_E = K_1 K_2 U_s$	REGIÃO
20	1013	11	1	1	1,0 U_s	Condições Padrão
-30	1013	5	1,2	0,93	1,125 U_s	Seca e fria ao nível do mar
40	650	3	0,795	0,928	0,738 U_s	Quente, seca em altitude
40	1013	25	0,936	1,16	1,08 U_s	Quente e úmida nível do mar
-30	850	5	0,94	0,92	0,865 U_s	Fria, seca em altitude

O vento exerce alguma influência no efeito corona, mas em geral tem pequeno efeito nos valores da tensão disruptiva caso a distância entre os eletrodos for mantida inalterada. No entanto, o vento pode movimentar os condutores das linhas de transmissão e fazer com que duas fases se aproximem aumentando a possibilidade de ruptura. Conseqüentemente, a tensão disruptiva crítica pode ser consideravelmente reduzida pela ação do vento.

A chuva também pode afetar o valor da tensão disruptiva dos sistemas de eletrodo em ar projetados para instalação externa. No caso específico dos eletrodos de grandes dimensões a presença de chuva pode resultar em uma redução considerável na amplitude da tensão disruptiva. Isto se deve ao fato que, de um modo geral, as gotas de chuva formam protuberâncias superficiais que distorcem o campo elétrico transformando uma configuração de campo quase uniforme em uma não-uniforme, o que por sua vez, resulta na redução da tensão disruptiva do arranjo de eletrodos.

3.4.6 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE PARTÍCULAS DE AREIA OU PÓ

Partículas no ar provenientes de tempestades na forma de areia e pó podem influenciar o comportamento dos isolamentos externos em ar. A maioria dos primeiros estudos a respeito foi confinada ao comportamento de pequenas distâncias em ar, logo dotados de aplicação prática extremamente limitada. No entanto, recentemente [19-22] foi projetada e utilizada uma câmara ambiental capaz de simular tempestades naturais de areia e pó comuns nas regiões desérticas. Nestes estudos, vários tipos de tensão e formas de eletrodos foram utilizados para investigar as características dos fenômenos de ruptura. O comportamento sob poluição dos eletrodos *Haste-plano*, *Haste-haste*, *Esfera-plano* e *Esfera-esfera* e os resultados sob impulsos

atmosféricos iguais ou inferiores a 1000 kV, e impulsos de manobra iguais ou inferiores a 850 kV, sob um valor de umidade absoluta H igual ou inferior a 11 g/m³ são apresentados a seguir.

ELETRODOS HASTE-PLANO

As partículas de areia e pó reduzem ligeiramente o valor da tensão disruptiva dos eletrodos *Haste-plano* sob impulsos positivos de tensão. A maior redução medida para impulsos com polaridade positiva foi de 3%, valor dentro das tolerâncias usuais de norma. No entanto, conforme observado, a poluição atmosférica apresenta uma influência mais pronunciada quando da aplicação de impulsos com polaridade negativa. Nestes casos, o grau de influência imposto pela poluição atmosférica é dependente da distância entre os eletrodos, do raio do catodo (r) e da forma do impulso de tensão, conforme mostrado pela Figura 3.7 [20]. Nesta e demais Figuras subseqüentes U_p é o valor da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ para o ar contaminado com partículas de areia e pó. Já U_c é o valor da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ para o mesmo arranjo e distância entre eletrodos e livre de poluição.

Fica claro de acordo com a Figura 3.7, que para distâncias reduzidas entre eletrodos o valor de $U_{50\%}$ diminui de 35%. No entanto, quando são consideradas distâncias médias entre os eletrodos é possível observar aumentos de $U_{50\%}$ de até 50% devido à existência de poluição atmosférica. Como observado, para distâncias entre eletrodos elevadas, a influência da poluição é mínima.

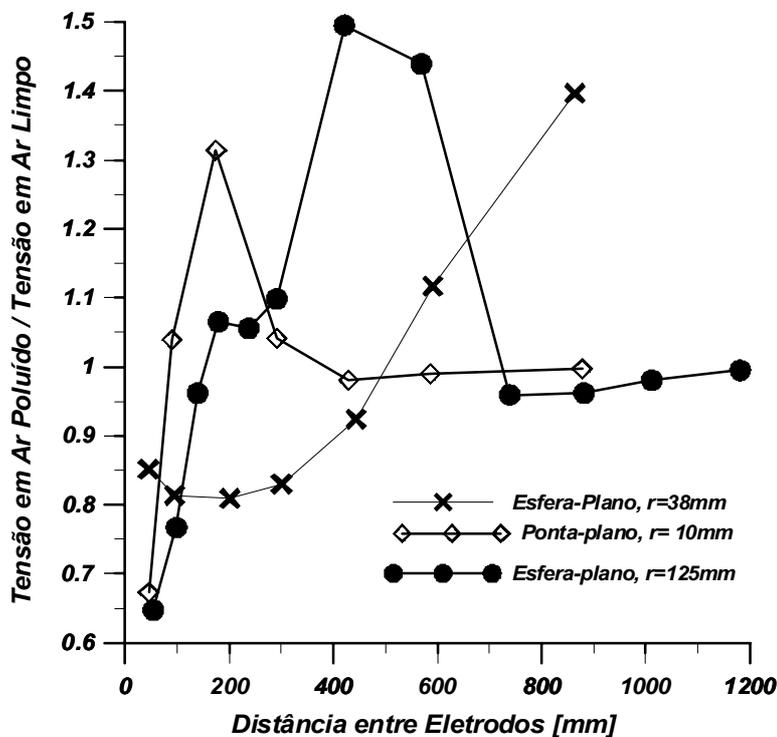


Figura 3.7 – O valor relativo entre $U_{50\%}$ de espaçamento poluído (U_p) e o $U_{50\%}$ de espaçamento limpo (U_c) como função da distância entre eletrodos sob impulsos negativos para estudos de geometria assimétrica

Os resultados também mostram que para a maioria das distâncias de isolamento empregadas nas linhas de distribuição ou transmissão, a amplitude da tensão disruptiva sob impulsos negativos é um pouco mais elevada ou praticamente similar ao observado sob impulsos positivos mesmo sob casos de extrema poluição. Apenas em casos de distâncias muito reduzidas sob contaminação, a polaridade negativa apresenta valores de tensão disruptiva crítica inferiores aos correspondentes para polaridade positiva.

Os equipamentos externos da subestação freqüentemente utilizam eletrodos de grande área para minimizar o efeito corona e/ou para distribuir a tensão uniformemente. Logo, estes eletrodos apresentam uma distribuição de campo quase uniforme.

Conforme mostrado pela Figura 3.7, a presença de contaminação pode reduzir acentuadamente a tensão disruptiva sob impulso negativo para os arranjos de eletrodo que apresentam campo quase-uniforme. Resultados similares também foram encontrados para ensaios utilizando impulsos de manobra. Conseqüentemente, em ambientes poluídos, a tensão disruptiva sob impulsos negativos pode se tornar inferior à correspondente positiva. Portanto, no processo de seleção das distâncias adequadas entre equipamentos para subestações, os impulsos negativos podem ser mais críticos que os positivos. Finalmente, caso os equipamentos necessitem operar em ambientes onde tempestades de areia e pó são freqüentes, o impacto associado à presença destes contaminantes deve ser cuidadosamente considerado.

ELETRODOS HASTE-HASTE

Um importante requisito dos projetos de isolamento das linhas aéreas e equipamentos de subestações é a garantia de que as descargas associadas a sobretensões sejam restritas aos seus eletrodos de proteção. Como eletrodos de proteção são utilizadas as mais variadas configurações de *Haste-haste*. A configuração de eletrodos mais comum é a de anéis com forma quadrada ou semicircular.

Os estudos sob impulsos atmosféricos e de manobra mostram que a poluição na forma areia e pó possui um considerável efeito nos gradientes da tensão disruptiva média de eletrodos *Haste-haste*. A amplitude destes efeitos depende da polaridade, forma e distância dos eletrodos. A Figura 3.8 compara o valor de $U_{50\%}$ dos eletrodos *Haste-haste* sob condições limpas e poluídas quando os mesmos são submetidos a impulsos atmosféricos. Conforme se observa, o efeito da poluição pode ser dividido em três regiões dentro da faixa de espaçamento entre eletrodos estudada: pequena, média e grande. A região de pequeno espaçamento evidencia a redução da amplitude da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ em relação à poluição. Na região média, a poluição atua no sentido de aumentar a amplitude da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$, e para grandes espaçamentos a poluição não apresenta influência na amplitude da

tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$. Resultados similares foram encontrados para impulsos de manobra. A faixa na qual a poluição apresenta efeitos severos é confinada a impulsos com amplitude igual ou inferior a 450kV. Logo, os sistemas com classe de tensão de até 36.2 kV (média tensão) e 72kV (alta tensão) são os mais susceptíveis com respeito às características de desempenho dos eletrodos de proteção devido a desvios relativos à poluição. É também observado que os eletrodos com forma de anéis quadrados apresentam maior imunidade em relação à influência de contaminação que os eletrodos com forma de anéis semicirculares.

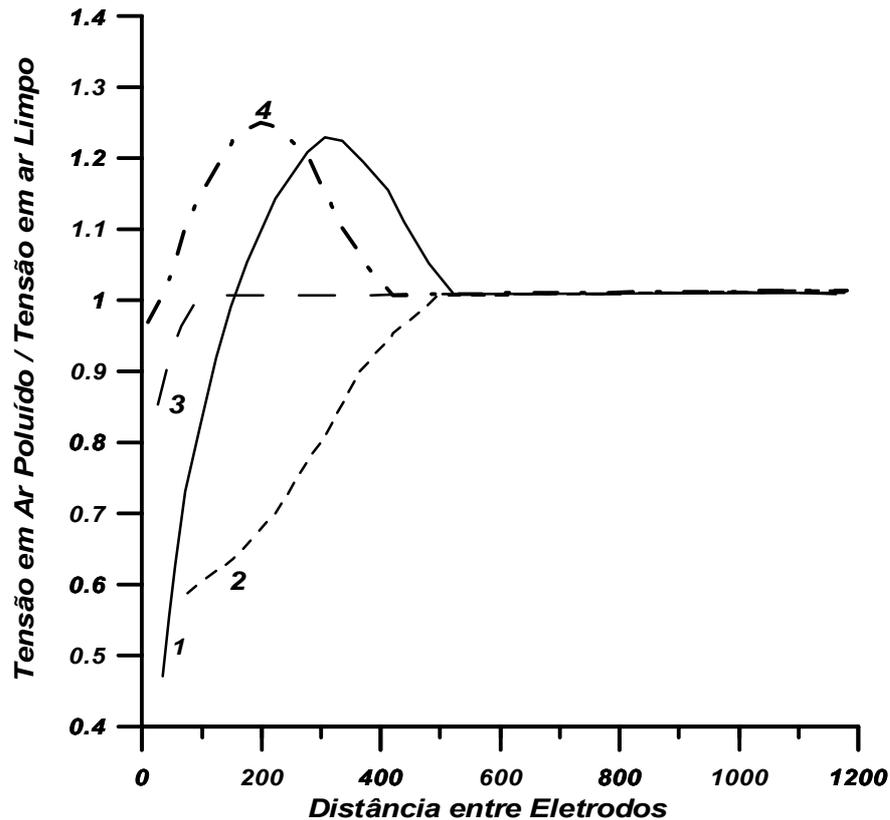


Figura 3.8 - O valor relativo de $U_{50\%}$ para espaçamento poluído (UP) e $U_{50\%}$ para espaçamento limpo em função da distância entre eletrodos sob impulsos para haste-haste

Independentemente da forma dos eletrodos, desde que a relação d/r seja mantida ≥ 30 onde d = distância entre os eletrodos e r = raio da haste, a amplitude da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$ sob condições de poluição não varia mais do que $\pm 2\%$ em relação às condições de eletrodos limpos. Isto é igualmente aplicável para impulsos atmosféricos e de manobra de ambas polaridades. De modo similar ao observado nos estudos para a determinação da amplitude da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$, para distâncias entre eletrodos $d/r \geq 30$, a dispersão observada para o tempo de ruptura – T_b é consideravelmente reduzida pela presença de poluição. No entanto, nestas condições, o valor médio do tempo de ruptura – T_b não se desvia mais do que $\pm 10\%$ em relação à condição sem a presença de poluição.

Nos eletrodos *Haste-haste*, a maioria dos efeitos de poluição pode ser atribuída à adesão de partículas de pó à superfície dos eletrodos. As normas americanas CD801-1968 (1973) fornecem os valores de $U_{50\%}$ para distâncias entre os eletrodos variando de 20 a 2400 mm submetidos a impulsos atmosféricos com precisão de $\pm 8\%$. De modo similar os resultados para $U_{50\%}$ obtidos em vários laboratórios de alta tensão da Europa para os ensaios de eletrodos *Haste-haste* apresentam diferenças em torno de $\pm 10\%$ [23]. Portanto, para grandes distâncias entre eletrodos, a variação em torno de $\pm 2\%$ resultante das tempestades de pó e areia pode ser considerada como praticamente insignificante, e os eletrodos *Haste* utilizados para a proteção de equipamentos e sistemas de isolamento podem seguramente ser projetados para áreas com tempestades de areia e pó, baseados nos critérios utilizados para as condições sem a presença de poluição, desde que em forma de anéis quadrados apresentem uma relação $d/r \geq 30$.

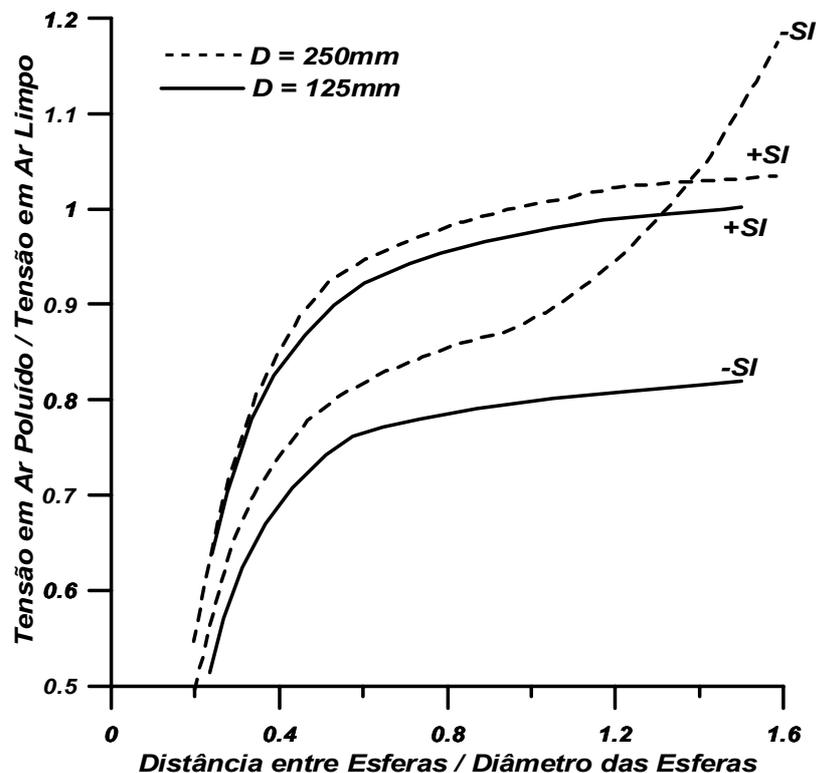


Figura 3.9 – O valor relativo de $U_{50\%}$ de espaçamento poluído (U_p) com o $U_{50\%}$ de espaçamento limpo de d/D sob impulsos de manobra (D =diâmetro da esfera, d =distância entre eletrodos)

ELETRODOS ESFERA-ESFERA

Esferas são eletrodos comumente utilizados para medidas de amplitudes de tensões elevadas com precisão de $\pm 3\%$. A presença de poluição no ar entre os eletrodos ou na superfície das esferas pode influenciar significativamente os processos de ruptura. A Figura 3.9, para impulsos de manobra, mostra a relação U_p/U_c em função da razão d/D para dois diâmetros

diferentes de esferas onde D = diâmetro da esfera e d = distância entre as esferas. Conforme mostrado na Figura 3.9, nos eletrodos utilizados para medidas de alta tensão, onde $d/D \leq 0,5$, a poluição do ar causa redução na tensão disruptiva. Resultados similares também foram obtidos para impulsos atmosféricos. Conforme prática comum, certas distâncias de esfera devem ser adequadamente irradiadas para reproduzir tensões de ruptura com precisão de $\pm 3\%$ [15,24]. Al-Arainy et al. [22] observou que a tensão disruptiva de um conjunto esferas limpas, de pequeno diâmetro, “escondidas” da luz gerada pela descarga de um gerador de impulso, pode ter amplitude superior a 100% aos valores tabelados pelas normas [24]. Deste modo, é possível afirmar que se o ar entre os eletrodos receber suficiente quantidade de luz ultravioleta, a presença de poluição não tem qualquer importância nos valores de tensão disruptiva do arranjo. Por outro lado, em arranjos de eletrodos não irradiados a presença de areia e de poluição reduz drasticamente o valor de $U_{50\%}$.

3.5 CURVA TENSÃO-TEMPO E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

Para um meio isolante entrar em ruptura são necessários os seguintes requisitos:

1. A existência de pelo menos um elétron livre para iniciar o processo de ionização.
2. Tensão suficiente para causar ionização e formação de avalanche.
3. Tempo suficiente para completar o processo de ruptura.

Na natureza, elétrons livres são disponíveis de fontes tais como foto-ionização e raios cósmicos, e seu número em um volume específico é um fenômeno de característica estatística que depende de vários fatores. O atraso de tempo para a ruptura depende da amplitude da sobretensão, e pode ser definido como o tempo decorrido entre o momento que a tensão alcança o nível de ruptura e a sua ocorrência efetiva. Logo, é possível afirmar que o valor da tensão disruptiva se encontra relacionado com o tempo de ruptura. Esta relação é denominada característica “Tensão – tempo” ou “Curva $V \times t$ ”. A característica tensão versus tempo depende principalmente do material isolante, da forma da tensão e da forma do eletrodo, bem como da pressão, umidade, entre outros. Para equipamentos e sistemas para alta tensão a “Curva $V \times t$ ” pode ser determinada pela aplicação de impulsos padrão com forma fixa e diferentes amplitudes. Para cada aplicação a tensão disruptiva e o tempo até a ruptura são determinados. Destes pontos obtém-se uma curva contínua por sobre os pontos extremos levantados no ensaio.

As “Curvas $V \times t$ ” são extremamente importantes para o projeto dos sistemas de proteção contra sobretensões. A Figura 3.10(a) mostra um dispositivo de proteção em paralelo com um objeto protegido onde as “Curvas $V \times t$ ” devem possuir a configuração mostrada na Figura 3.10(b). Deste modo, o dispositivo de proteção, por exemplo, na forma de hastes, sempre entra

em ruptura antes do objeto protegido que pode ser um isolador, buchas, transformadores, etc, evitando desta maneira, danos associados à exposição a sobretensões. Caso as duas curvas venham a se interceptar surge um problema de “*Coordenação de Isolamento*” e os eletrodos de proteção passam a atuar de forma parcial cobrindo somente uma certa faixa de sobretensões ou tempo.

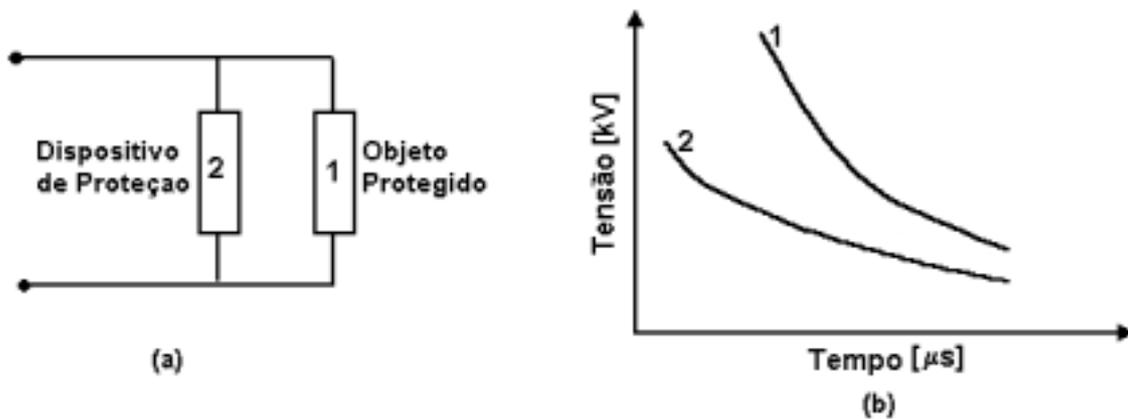


Figura 3.10 – Arranjo de Coordenação de Isolamento: (a) esquema de proteção, (b) Curva V-t para uma boa condição de isolamento

Em redes de potência de alta tensão, eletrodos *Haste-haste* comumente conhecidos como “*Centelhadores Chifre*” de vários tipos e formas são usados para proteção contra sobretensões de diferentes tipos de equipamentos tais como transformadores, buchas, isoladores, etc. Uma vez que estes dispositivos são para instalação externa eles ficam sujeitos a variações nos parâmetros atmosféricos e nos níveis de poluição. Deste modo as extremidades das hastes permanecem cobertas por um filme de areia fina e partículas de poluição por extensos períodos de tempo principalmente em regiões onde a chuva for escassa como em áreas áridas e semi-áridas.

Vários resultados de estudos sobre o comportamento de eletrodos *Haste-haste* têm sido relatados sendo que as suas principais constatações se encontram resumidas em publicações realizadas pelo IEEE [26,27]. Os sistemas com hastes múltiplas (usualmente três hastes) se constituem em uma alternativa para os sistemas padrão tipo *Haste-haste*. Estes sistemas vêm sendo largamente utilizados na proteção de equipamentos para sistemas de potência em média e alta tensão em algumas partes do mundo. O sistema a três eletrodos tem sido preferido porque permite obter valores mais consistentes de disrupção – dispersão reduzida – com tempos até a disrupção e amplitude da tensão de corte inferior aos obtidos com centelhadores padrão. De modo complementar, estes sistemas permitem a extinção confiável dos arcos de potência que se estabelecem após a disrupção [27].

Na seleção de centelhadores *Haste-haste* para proteção contra sobretensões é necessário considerar o perfil do terminal da haste, o raio de sua extremidade, à distância entre os

eletrodos, sua configuração – simples ou hastes múltiplas – e se a sua instalação é horizontal ou vertical. Para ambientes poluídos a escolha deve contemplar hastes e formas que apresentem a menor influência sob poluição. Como os efeitos da poluição são similares tanto para eletrodos simples ou múltiplos, bem como para instalação vertical ou horizontal, os principais parâmetros para a escolha dos centelhadores são o raio da haste, o perfil de sua extremidade e a distância entre os eletrodos. Para configurações que utilizam hastes de grande diâmetro e que, no entanto trabalham com pequenas distâncias entre eletrodos, existe uma diferença significativa entre as “Curvas $V \times t$ ” sob condições limpas e poluídas mesmo quando para tempos até disrupção reduzidos, como mostra a Figura 3.11. Conforme verificado por ensaios, hastes com a forma de anel quadrado e pequenas dimensões são preferíveis por apresentarem uma relativa imunidade frente à poluição. Deste modo, o raio da haste deve ser tão pequeno quanto possível para minimizar os efeitos da poluição, no entanto, deve possuir diâmetro suficiente para evitar a formação de corona sob tensões normais de operação.

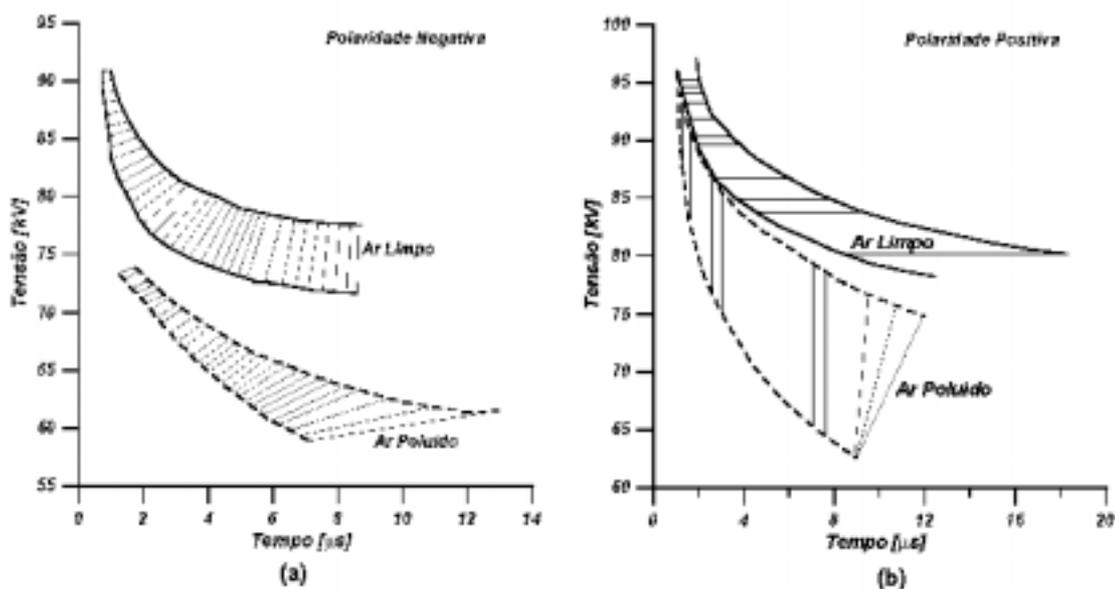


Figura 3.11- Influência de partículas de pó na característica $V-t$ para eletrodos de múltiplas hastes

A Tabela 3.5 mostra exemplo de centelhadores *Haste-haste* utilizados para a proteção de sistemas classe de tensão 15 kV e 36.2 kV em regiões semi-áridas.

Tabela 3.5 – Espaçamentos entre eletrodos recomendados para eletrodos simples e múltiplos utilizados na proteção de buchas de transformadores instalados em regiões semi-áridas [28]

TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA [kV]	NBI	ELETRODO SIMPLES RECOMENDADO	FAIXA EXTREMA DE TENSÃO DE RUPTURA [kV]	ELETRODO MÚLTIPLO RECOMENDADO	FAIXA EXTREMA DE TENSÃO DE RUPTURA [kV]
13,8	95	6,5	58 – 83	1,5 + 1,5	64 – 86
33	170	16	106 – 145	5,5 + 5,5	110 – 150

Estes centelhadores são construídos com eletrodos cilíndricos na forma de anel quadrado e diâmetro equivalente inferior a 8 mm. Os limites extremos das faixas de tensão disruptivas mostrados na Tabela 3.5 são associados a uma probabilidade de descarga variando entre 5% e 100%, temperaturas entre 0 e 50°C, pressão entre 925 a 940 mbar e a influência de partículas poluentes. Considerando que as variações mencionadas são distintas quando de regiões diferentes, à distância entre os eletrodos para cada região necessita ser ajustada adequadamente caso a caso.

3.6 DESCARGAS FASE-FASE

Nos primeiros projetos de linhas para ultra-alta-tensão, o espaçamento entre fases foi determinado pelo efeito corona e não pelos requisitos de tensão disruptiva. No entanto, a utilização de tensões de transmissão mais elevadas resulta em surtos de manobra mais elevados. De maneira adicional, alguns dos critérios de projeto econômico das linhas implicam na redução da distância entre fases. A distância entre fases nas linhas de ultra-alta tensão se encontra na faixa de vários metros e nestes casos, os processos de ruptura apresentam algumas diferenças em relação ao verificado para distâncias mais reduzidas.

Para distâncias elevadas as descargas associadas aos impulsos de manobra positivos podem ser divididas em 3 estágios: formação de corona, propagação líder e salto final. Na maioria das geometrias de condutores utilizadas o campo é divergente, logo, a tensão de início de corona é muito inferior à tensão disruptiva. As cargas espaciais resultantes da formação de corona influenciam significativamente na amplitude do campo elétrico. Dependendo da forma da tensão aplicada, a ionização pode continuar por algum tempo (período escuro), ao fim deste período ocorre um surto corona secundário. No eletrodo positivo, o corona é geralmente seguido por um canal altamente ionizado denominado líder. O comportamento do líder depende da geometria dos eletrodos e da forma da tensão aplicada. Se a tensão não é suficiente, o líder pára de se propagar e não ocorre a ruptura do meio entre os eletrodos. Por outro lado, se a tensão é alta o suficiente, o líder se aproxima do eletrodo aterrado, sua velocidade é repentinamente aumentada de repente e com o salto final é completado o processo de ruptura do meio entre os eletrodos. O tempo crítico até a crista – t_{cr} se encontra associado com a duração da propagação do líder antes do salto final [5]. Dentro deste contexto, $t_{cr}^- < t_{cr}^+$ uma vez que o líder negativo possui uma velocidade de propagação superior a do líder positivo. O tempo crítico até a crista – t_{cr} também aumenta linearmente com a distância entre os eletrodos sendo relacionado com a forma dos eletrodos, em especial do catodo.

Na maioria dos casos a probabilidade de ruptura para impulsos de manobra positivos e distâncias entre eletrodos elevadas pode ser modelada por uma distribuição normal.

Entretanto, nos casos onde se verificam dois ou mais modos de ruptura, o modelo para o comportamento dos eletrodos pode utilizar uma distribuição de probabilidade anormal de ruptura. Para espaçamentos elevados, o tempo até a ruptura – T_{BD} também pode ser modelado por meio de uma distribuição normal, uma vez que o líder é o processo dominante para estes casos. Distribuições anormais podem ocorrer para espaçamentos entre eletrodos inferiores a 5 [m] onde os tempos de atraso para início do líder corona são significantes em relação ao tempo até a ruptura – T_{BD} .

As solicitações de tensão entre fases são mais complexas que as entre fase e terra devido às imprevisibilidades em termos de tempo e posição dos surtos nas duas fases. A suportabilidade Fase-fase é função da tensão aplicada entre as fases e entre as fases e a terra [3]. Deste modo, os sistemas de isolamento Fase-fase são formados por dois eletrodos energizados e o terra. Aos eletrodos são aplicadas duas tensões para o terra. Nestes ensaios, a tensão disruptiva Fase-terra é sempre superior à tensão disruptiva entre fases. Logo, o espaçamento Fase-terra é maior que o Fase-fase. De modo adicional, a amplitude das sobretensões entre fases é 1,4 a 1,8 vezes superior às sobretensões entre fase e terra [28].

Ao se estudar os fenômenos de ruptura entre Fase-fase, é importante levar em conta o valor relativo entre os impulsos positivos – U^+ e negativos – U^- aplicados às fases, definido pelo parâmetro α , conforme mostra a Equação 3.18.

Assumindo que os dois impulsos sejam sincronizados, a tensão disruptiva aumenta de forma aproximadamente linear com α [29], que geralmente varia entre 0,3 e 0,7. No entanto, em termos práticos, esta faixa pode ser limitada entre 0,3 e 0,5 pois caso $\alpha \geq 0,5$ $U \geq U^+$ o que não é muito interessante para fins de engenharia uma vez que, nestes casos $U_{50}^+ \leq U_{50}$.

$$\alpha = \frac{|U^-|}{|U^+| + |U^-|} \quad (3.18)$$

O tempo relativo entre os impulsos aplicado às fases é importante uma vez que a tensão suportável entre as fases pode ser substancialmente reduzida caso o surto com polaridade negativa preceder o de polaridade positiva [28]. Este deslocamento de tempo, nos casos onde o surto negativo precede o positivo, é dado por $\Delta t = t_f - t_f^+$. O isolamento em ar entre os eletrodos é fortemente influenciado pela presença das cargas espaciais criadas durante a aplicação do impulso negativo. A pré-existência de cargas espaciais negativas auxilia o início e propagação do líder positivo. Para $0,2 \leq \Delta t \leq 300\text{ms}$, a tensão disruptiva é inferior quando da presença de somente o impulso positivo.

Em complemento à solicitação devido a impulsos simples ou duplos com forma padrão existem na prática outros tipos de surtos tais como impulsos com picos duplos ou múltiplos e formas irregulares resultantes de mudanças súbitas de forma durante os fenômenos de propagação dos surtos ao longo das linhas de transmissão [28]. O conhecimento detalhado destes assuntos é importante no projeto e operação dos procedimentos de manutenção em linha viva [30].

Nas linhas de alta e ultra-alta-tensão, os feixes de sub-condutores podem ser arranjados de uma forma adequada para aumentar a suportabilidade do isolamento entre fases. A otimização do feixe de sub-condutores [29] pode resultar em uma rigidez dielétrica média de 5,4 [kV/cm] e 4,5 [kV/cm] para distâncias entre fases de 1 [m] e 8 [m] respectivamente.

3.7 ARCO DE POTÊNCIA

Arco é definido como um canal transitório de plasma que liga dois eletrodos separados por um isolamento em gás. Os arcos com natureza contínua são denominados “Arcos de Potência”. Estes arcos produzem calor e luz intensos que são extremamente úteis em algumas aplicações industriais tais como aquecimento, soldas e lâmpadas a arco. Nos sistemas de potência, estes arcos são indesejáveis. No entanto, eles ocorrem durante operação dos disjuntores e quando de curtos circuitos. Existem muitos tipos de arcos de potência que podem ser classificados de acordo com o método de emissão eletrônica do catodo ou com a pressão do gás utilizado. Nos sistemas de potência, os arcos são classificados de acordo com condições tais como:

1. Arcos com elevada corrente de curto circuito;
2. Arcos em espaçamentos reduzidos, onde a coluna do arco é afetada pelos eletrodos;
3. Arcos espaçamentos elevados, onde o arco independe dos eletrodos tais como em uma descarga atmosférica.

Para analisar um sistema elétrico contendo um arco de potência deve-se representá-lo adequadamente por meio de um circuito equivalente. Uma das maneiras de se representar um arco de potência é mostrada na Figura 3.12 onde a resistência de arco R , a indutância L e a tensão E , geralmente obtidos experimentalmente, são funções do comprimento, da corrente de arco e da taxa de variação do arco com relação ao tempo [31].

Os disjuntores são projetados para interromper correntes alternadas no momento de um zero de corrente. Após a interrupção da corrente de curto circuito é desenvolvida, entre os contatos, uma tensão denominada *Tensão de Recuperação Transitória – TRT*. Caso a TRT seja elevada o arco entre os contatos pode entrar em re-ignição conduzindo à falha no processo de interrupção da corrente. O processo de extinção de arco nos disjuntores é afetado pela

geração e pelas taxas de dissipação de calor. As taxas de dissipação de calor podem ser aumentadas pelo movimento do arco resultado da aplicação de forças eletromagnéticas. Esta técnica é utilizada na interrupção de arcos disjuntores, centelhadores de pára-raios e centelhadores Haste-haste na forma de chifres. Uma outra técnica utilizada com sucesso na interrupção do arco em disjuntores em ar comprimido é a utilização de um sopro em ar com alta pressão e, por conseguinte velocidade. Nestes casos, o fenômeno na forma de explosão alonga o arco e aumenta suas perdas por calor.

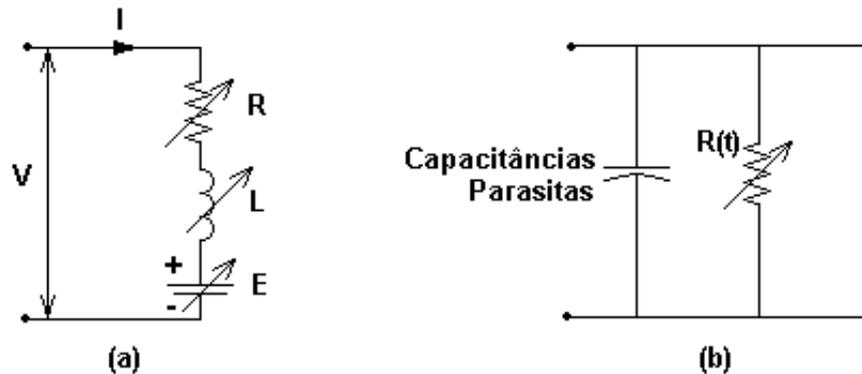


Figura 3.12 – Os circuitos equivalentes: (a) Arco em Corrente Contínua e Corrente Alternada durante período de condução, (b) Arco em Corrente Alternada durante o período de extinção [35].

3.8 EFEITOS INDESEJÁVEIS DO CORONA

O corona atenua a propagação dos surtos ao longo das linhas de transmissão uma vez que usualmente os condutores das linhas apresentam elevado nível de corona quando submetidos a elevados níveis de tensão. Entretanto, nas redes de potência a presença de corona tem efeitos indesejáveis como perdas, ruído audível, rádio interferência e decomposição química do ar.

3.8.1 PERDAS POR CORONA

Nas linhas de transmissão, sob condições de corrente nominal, as perdas – I^2R por efeito joule se situam entre 20 e 200 kW/km. As perdas por corona sob condições de tempo bom, independente da corrente de carga, são geralmente projetadas para serem em torno de 10% das perdas I^2R . Sob condições adversas de tempo, as perdas por corona aumentam em menos 10 vezes. Além das condições do tempo, as perdas por corona sofrem a influência da diferença entre a tensão de operação – U_n e a tensão de início de corona – U_c , ou seja, $U - U_c$, gradiente de campo na superfície do condutor, das condições da superfície do condutor, da frequência do sistema e do tamanho dos condutores. De um modo geral, as perdas por corona em tempo bom podem ser estimadas com base nos resultados de linhas similares. As perdas por corona podem ser negligenciadas se o gradiente de tensão sobre a superfície do condutor

for reduzido e os condutores apresentam um desempenho aceitável quanto ao ruído. Para linhas de ultra-alta-tensão o EPRI [3] propôs a Equação 3.19 para determinar as perdas totais por corona, nas três fases [kW/km] sob condições adversas de tempo – P_L :

$$P_L = P_{FW} + \left[\frac{U}{\sqrt{3}} J r^2 \ln(1 + 10R) \right] \sum_{i=1}^n E_i^5 \quad (3.19)$$

onde P_{FW} = perdas trifásicas por corona sob condições de tempo bom [kW/km], U = tensão eficaz da linha [kV], J = constante de perdas [$7,04 \times 10^{-10}$ para linhas de 400 kV; $5,35 \times 10^{-10}$ para linhas de 500 e 700 kV], r = raio do condutor [cm], n = número total de condutores no feixe, E_i = máximo gradiente de tensão para o sub-condutor i e R = taxa de chuva [mm/h].

Em alguns casos especiais tais como condutores de linha de transmissão muito sujos ou linhas de transmissão passando por florestas contendo populações elevadas de insetos, as perdas por corona podem se tornar parte significativa da potência total entregue.

3.8.2 RUÍDO AUDÍVEL

Uma larga faixa de ruído audível pelo ouvido humano é gerada durante as descargas corona. Além da distância lateral da linha de transmissão, o nível de ruído audível depende dos mesmos fatores que influenciam as perdas por corona. Geralmente o ruído audível é desprezável para as condições de tempo bom. No entanto, sob chuva forte pode alcançar valores acima de 60 dB em locais próximos às linhas de transmissão o que pode se tornar incômodo. É uma prática comum limitar o ruído audível nas faixas de passagem das linhas de transmissão a valores de no máximo 52 dB.

A Equação 3.20, desenvolvida de forma empírica, pode ser usada para calcular o nível de ruído audível para uma linha com 3 sub-condutores por fase sob condições de chuva forte [3]. O nível de ruído audível – AN é dado em dB sendo 20 μ Pa o nível de pressão do som de referência:

$$AN = 20 \log n + 44 \log D_s - 665/E + K_n - 10 \log D_{tm} - 0,02 D_{tm} + A_n + B_n \left[22,9(n-1) \frac{D_s}{D} \right] \quad (3.20)$$

onde n = número de sub-condutores por fase, D_s = diâmetro do sub-condutor [cm], D = diâmetro do feixe de sub-condutores, E = gradiente de tensão na superfície do condutor [kV/cm], D_{tm} = distância da linha ao ponto de medida [m], $K_n = 7,5$ para $n = 1$, $K_n = 2,6$ para $n = 2$ e $K_n = 3$ para $n \geq 3$, $A_n = 75,2$ para $n = 1$ e 2 e $A_n = 67,9$ para $n \geq 3$, e $B_n = 0$ para $n = 1$ e 2 para $B_n = 1$ para $n \geq 3$.

3.8.3 RADIO-INTERFERÊNCIA

As correntes associadas à presença de corona são responsáveis por interferências eletromagnéticas – **EMI**. De modo aproximado, a corrente injetada nos condutores das linhas de transmissão devido ao corona pode ser obtida através da Equação 3.21:

$$i(t) = I_{\alpha} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (3.21)$$

onde τ_1 e τ_2 são as constantes de tempo e de cauda respectivamente.

De modo geral, a amplitude máxima do pulso de corrente – I_m fica em torno de **0,6** I_0 . Os valores aproximados de τ_1 e τ_2 e I_m para pulsos corona negativo e positivo são mostrados na Tabela 3.6 Estes pulsos podem ser representados por um espectro em frequência com intensidade – $S(\omega)$ dada pela Equação 3.22:

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.22)$$

Quando o pulso de corona é injetado em uma linha, ele se divide em duas partes iguais que se propagam ao longo do condutor em ambas direções a partir do ponto de injeção. Dependendo de seu comprimento de onda, cada componente espectral destes pulsos se comporta de modo distinto. Na faixa de frequência entre 0,15 a 30 MHz, a radiação eletromagnética direta dos pulsos de corona não contribui muito para a geração de interferências eletromagnéticas – **EMI** que é então resultante da propagação, ao longo do condutor, dos vários componentes espectrais dos pulsos da corrente. Quando o comprimento de onda de um componente espectral é longo, dois campos ortogonais associados, um elétrico e outro magnético, se propagam ao longo da linha. Este sistema constitui um guia de ondas planas com uma atenuação relativamente baixa. Portanto, os campos responsáveis pela geração de interferências eletromagnéticas – **EMI** são dominadas pela agregação dos efeitos de todas as cargas dispersas em algumas dezenas de quilômetros de ambos os lados do local de medida. Para componentes espectrais acima de 30 MHz, os comprimentos de onda são próximos, ou menores que as distâncias de isolamento das linhas, logo, a propagação de ruído ocorre por radiação.

Tabela 3.6 – Parâmetros da Corrente de Corona

POLARIDADE DO PULSO DE CORONA	τ_1 (ns)	τ_2 (ns)	I_m (mA)
Negativo	6	45	2.7
Positivo	30	180	60

A qualidade da recepção de rádio depende da razão entre o sinal e o ruído. Para caracterizar esta razão corretamente, é essencial quantificar o ruído por meio de uma quantidade mensurável. Em geral, a intensidade instantânea de ruído gerada por meio de corona - $S(t)$ varia de maneira contínua e irregular. No entanto, caso a energia média durante um longo período de tempo, por exemplo, um segundo for constante, este ruído é denominado “Aleatório Estacionário”. O valor eficaz - AN de parte do ruído contido em uma estreita faixa de frequência $\Delta\omega$ centrado em ω_0 [rad/s] expresso pela Equação 3.23:

$$RN = \sqrt{\frac{S^2(\omega)\Delta\omega}{2\pi}} \quad (3.23)$$

Portanto, um sistema para medida de rádio interferência é constituído basicamente por um voltímetro caracterizado por uma banda de passagem com largura igual a $(\Delta\omega/2\pi)$ que pode ser sintonizado na frequência central $f_0 = (\omega_0/2\pi)$. Usualmente, o “Nível de Rádio Interferência - RI' ” é medido na faixa de frequência entre 0,15 - 30MHz, sendo o nível de ruído proporcional a raiz quadrada da banda de passagem.

Para as medidas de Rádio Interferência – RI são utilizados diferentes detectores que podem trabalhar com valores médios, pico, e quase pico. De acordo com as normas internacionais [32,33], os medidores de ruído de rádio interferência que trabalham com valores de “quase pico” são preferidos aos que trabalham com valores médios, pico ou valor real eficaz. Este tipo de detector conduz à uma medida mais realística, pois representa os efeitos psicológicos das interferências eletromagnéticas experimentadas pelo ouvinte. O detector de “quase pico” - QP é basicamente um diodo que carrega um capacitor em paralelo com um resistor. Quando o ruído é aplicado ao dispositivo, depois de passar pelo filtro passa – faixa do receptor e satisfatoriamente amplificado, a tensão no capacitor flutua em torno de um valor ligeiramente inferior ao valor de pico do sinal de ruído. A constante do tempo de carga do detector é ≈ 1 ms enquanto sua constante de tempo da descarga é 160ms ou 600ms conforme especificação ANSI ou IEC (CISPR), respectivamente.

Baseado extensivamente nos dados de interferências eletromagnéticas – EMI obtidos em um grande número de linhas, foi proposta pela CIGRÉ o modelo matemático definido pelas Equações 3.24 e 3.25 que possui boa aplicabilidade para vários tipos de linhas [32]. O conjunto de parâmetros para o qual o modelo proposto pela CIGRÉ foi derivado é o seguinte:

Tensão nominal da linha: 200 - 765 kV_{rms}

Máximo gradiente elétrico: 12 a 20 kV_{rms}/cm

Raio do condutor: 1 a 2,5cm

Número de sub-condutores por feixe: 1 a 4

Espaço entre os sub-condutores: 10 a 20 vezes o diâmetro do condutor

Este modelo fornece o nível de interferência mais provável quando se utiliza um detector CISPR ajustado para uma frequência de 500 kHz, em dB por 1 $\mu\text{V}/\text{m}$, para condutores na condição seca, envelhecidos e moderadamente contaminados por poeira, estando o ponto de observação em uma posição aproximada de 2 metros de altura em relação ao nível do solo e 15 metros de distância do condutor externo da linha. Este modelo calcula primeiramente o nível de ruído - NP_i para cada uma das fases segundo a Equação 3.24.

$$NP_i = 3,5g_{mi} + 12r_i - 33 \log\left(\frac{D_i}{20}\right) - 30 \quad (3.24)$$

onde g_{mi} = máximo gradiente do condutor na superfície da fase i , e D_i = distância entre fase i e ponto de referência de medida.

O nível de ruído - NP no ponto de medida, para o caso de linhas trifásicas, é obtido pela soma dos ruídos oriundos das três fases. Caso um dos campos for pelo menos 3 dB superior aos demais, estes são negligenciados. Caso contrário utiliza-se a Equação 3.25.

$$NP = \frac{NP_a + NP_b}{2} + 1,5\text{dB} \quad (3.25)$$

onde NP_a e NP_b são os dois maiores valores obtidos pela aplicação da Equação (3.24), às três fases da linha.

Para circuitos duplos, a interferência no ponto de medida, devido a cada um dos 6 condutores é calculada com a Equação 3.24. Os campos produzidos pelas fases correspondentes no tempo são somados de forma quadrática e depois de aplicados os critérios associados à Equação 3.25.

Para obter o nível de ruído - NP para frequências diferentes de 500 kHz, é suficiente aplicar a correção dada pelas Equações (3.26) e (3.27) para o valor de NP_0 .

Para linhas de circuitos duplos ou em lençol triangular:

$$NP = NP_0 - (18 \log F + 10 \log^2 F + 4,3) \quad (3.26)$$

Para linhas em lençol horizontal:

$$NP = NP_0 - (23 \log F + 12 \log^2 F + 5,8) \quad (3.27)$$

De modo similar, o nível ruído a uma distância lateral – D diferente da distância de referência de 15 metros – D_0 , é dada pela Equação 3.28:

$$NP = NP_0 - 20K_1 \log\left(\frac{D}{D_0}\right) \quad (3.28)$$

onde $K_1 = 1,4$ para linhas em lençol triangular, vertical e duplos e $K_1 = 1,6$ a $1,9$ para linhas em lençol horizontal, função do nível de tensão.

Os níveis interferências eletromagnéticas – EMI obtidos para condições atmosféricas diferentes do tempo limpo e seco, podem ser estimados com o auxílio da Figura 3.13.

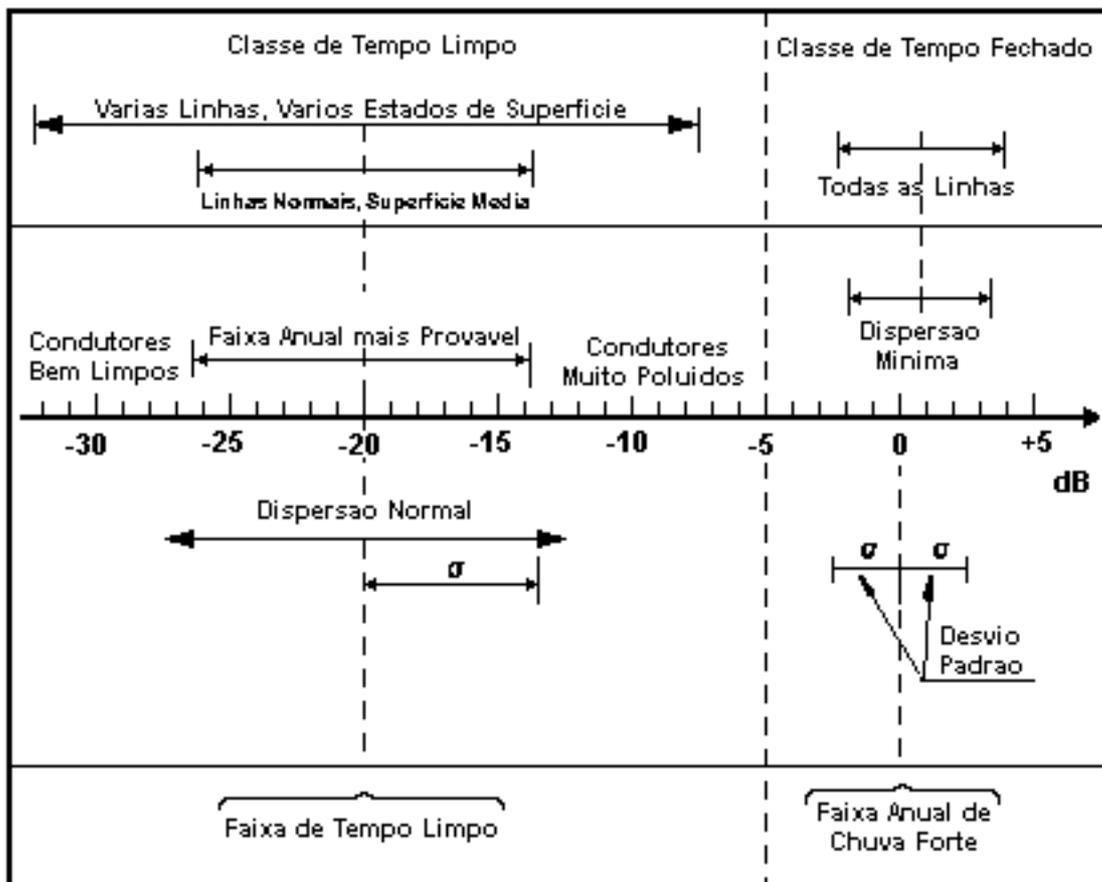


Figura 3.13 – Previsão de Indução Eletromagnética em Linhas de Transmissão para Tipos de Faixas de Tempo (Ref. 41 © IEEE, 1973)

A Figura 3.14 mostra os níveis de rádio interferência - RI medidos em linhas de 380 kV operando com gradiente máximo na superfície dos condutores de $E_{max} = 12,1$ kV/cm, localizadas em regiões secas e semi-áridas [34].

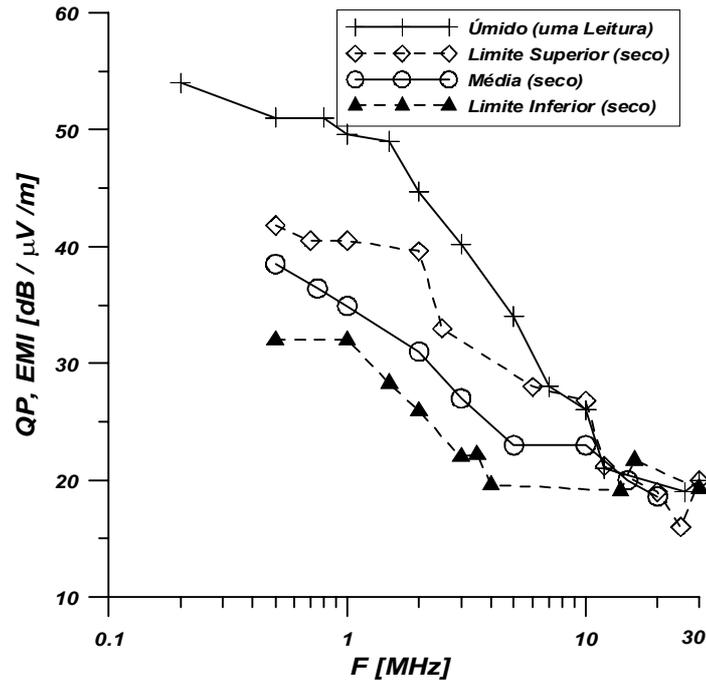


Figura 3.14 – Espectro de freqüência para EMI de linhas de 380 kV (gradiente máximo do condutor = 12.1 kV/cm. (Ref. 37 © IEEE, 1989)

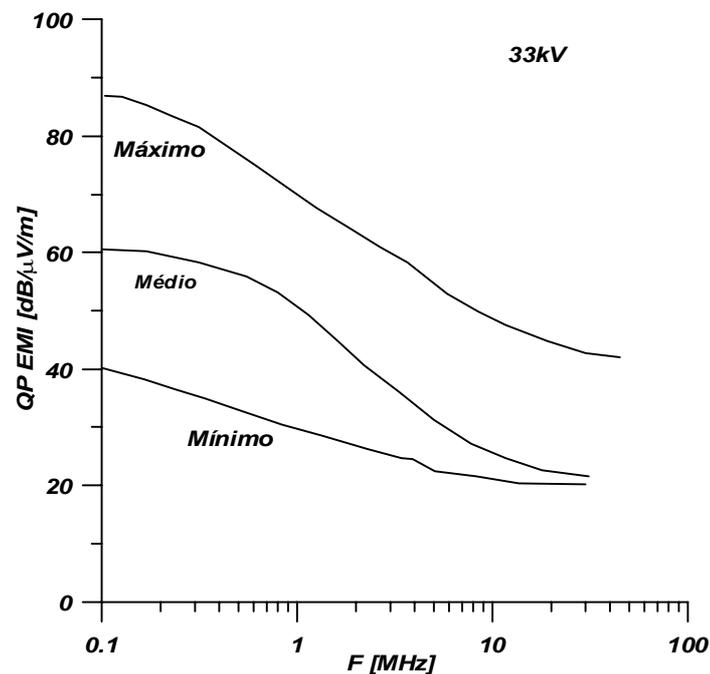


Figura 3.15 – Espectro de todas as freqüências devido ao clima para EMI produzida por uma linha de distribuição de 33 kV (baseado em mais de 100 medidas em linhas diferentes) (Ref. 38 © IEEE, 1989)

Os problemas de rádio interferência não são somente restritos a linhas de transmissão de extra e ultra-alta-tensão. Em alguns casos, linhas de distribuição operando em média e alta tensão com gradientes de tensão na superfície inferiores aos padrões de alta e extra-alta-tensão

também podem exibir níveis significantes de rádio interferência. Uma possível fonte de ruído nestas linhas é o corona nas ferragens e/ou emendas mal construídas, descargas entre superfície e corona nos sistemas de isolamento. Uma vez que a altura destas linhas é, usualmente, muito menor que as linhas de extra e ultra-alta-tensão, o ouvinte está perto da fonte de ruído. A Figura 3.15 mostra um espectro de freqüência típico do nível de rádio interferência medida em linhas de distribuição localizadas em regiões secas e semi-áridas [35].

3.8.4 INTERFERÊNCIA EM TELEVISÃO

A rede de alta tensão pode causar interferências de televisão nas proximidades. A Interferência em televisão não é causada pelo corona, mas pelo tipo da descarga, como já comentado no capítulo 2. O espectro do ruído audível gerado não é bem definido como a radiointerferência devido à corona, pelo contrário, varia grandemente dependendo das condições geométricas e operacionais [36]. O nível e a faixa da interferência do tipo de descarga depende principalmente do nível da tensão, das dimensões dos microespaçamentos e a da impedância do circuito externo para a descarga [36-37]. A Figura 3.16 mostra ruídos gerados por um modelo de descarga [24] utilizando um detector de pico [37]. Medições em campo mostram resultados similares.

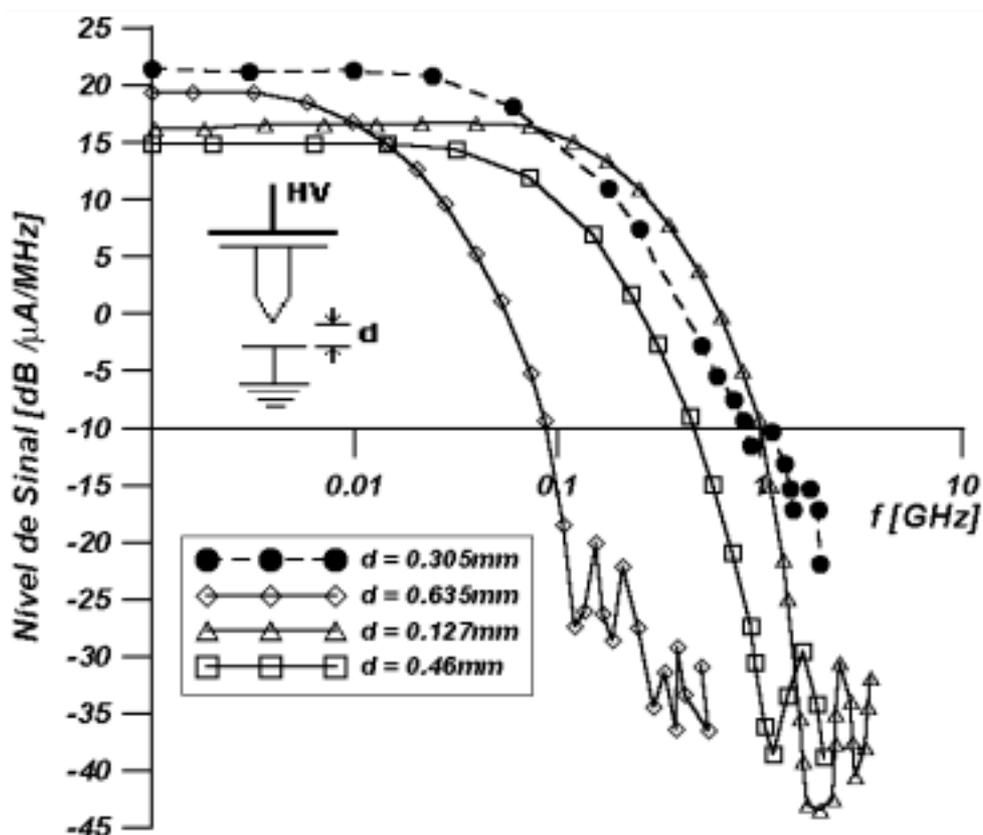


Figura 3.16 – Espectro de freqüência para tipos de descargas geradas pela geometria mostrada na Figura 3.14

Como exemplo, a Figura 3.17 mostra as medidas da interferência eletromagnética utilizando um detector de quase pico para uma linha de duplo circuito de 132 kV localizado em uma região semi-árida [34].

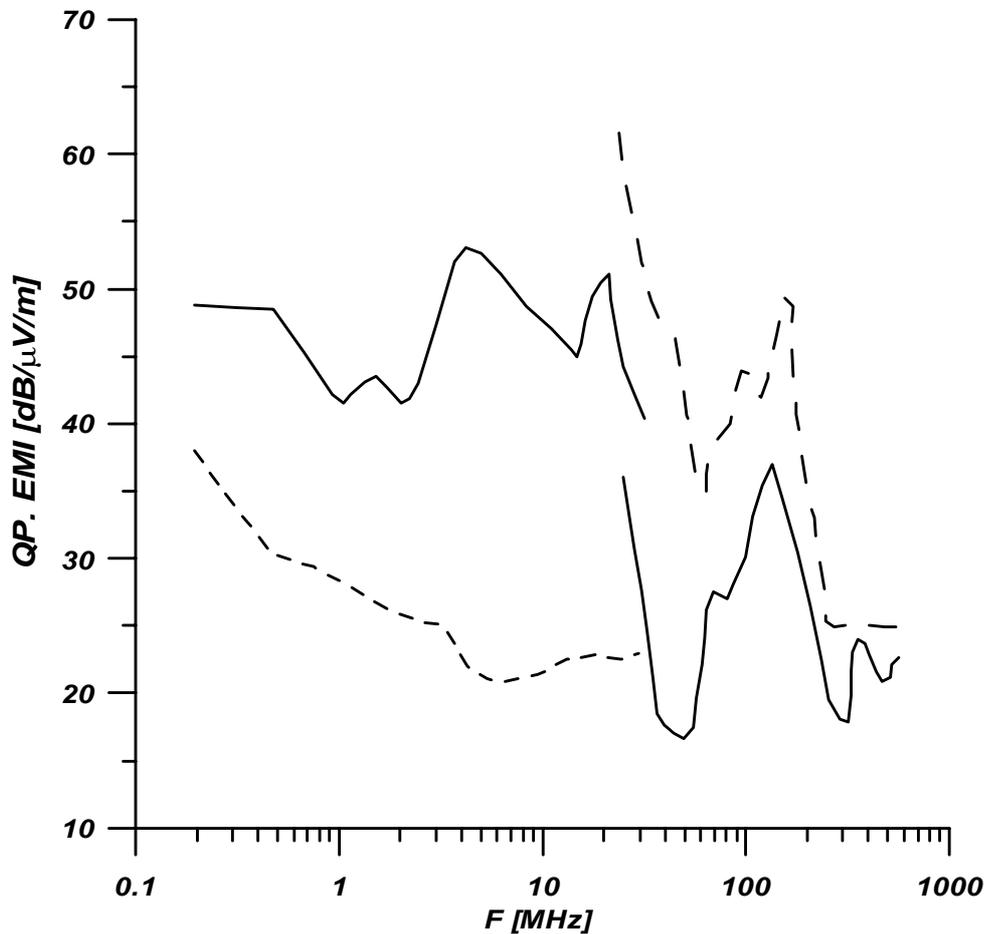


Figura 3.17 – Espectro de frequência da EMI de uma linha de 132 kV (gradiente máximo do condutor = 14.4 kV/cm). As medições foram realizadas nas proximidades de uma subestação – curvas superiores – a 300m de distância da mesma – curvas inferiores. Ref.37 © IEEE 1989

3.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3

1. L. Paris, "Influence of Air Gap Characteristics On Line To Ground Switching Surge Strength", IEEE Trans., Vol. PAS-86, No. 8. pp.936-947, 1967;
2. Y. Aihara, "Impulse Flashover Characteristics of Long Air Gaps and Atmospheric Correction", IEEE Trans., Vol. PAS-97, No. 2, pp. 342-347, 1978;
3. Transmission line Reference Book, EPRI, Califórnia, 1982;
4. K. Schneider and N. Weck Electra, "Parameters Influencing The Gap Factor", No 35, pp-25-48, 1974;
5. CIGRE Task Force, "Guidelines for the Evaluation of the Dielectric Strength of External Insulation", CIGRE 33.92, (Wg-07) 1 IWD, Paris, France, 1992;
6. G. Gallet, G. Leroy, R. Lacey, and I. Kromer, "General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps", IEEE Trans., Vol. PAS-94, No. 6, pp. 1989-1993, 1975.
7. E. Lemke, Z.Electr. Inform. Energetechnik, Leipzig, Germany, Vol. 3, No 4, pp. 186-192, 1973.
8. R.T. Waters, "Spark Breakdown in Nonuniform Field", in Electrical Breakdown of Gases, by J.M. Meek and J. D. Craggs (eds), John Wiley & Sons. New York, pp. 510-513, 1978;
9. G.N. Aleksandrov, Zurnal Technicheskoi Fiziki, Vol. 9, pp. 744-756, 1969.
10. A. Pignini, G. Rizzi, R. Barmilla, and E. Garbagnati, "Switching Impulse Strength of Very Large Gaps", 3rd ISH Milan, Paper No. 51.15, 1979.
11. F. Rizk, "A Model For Switching Impulse Leader Inception and Breakdown of Long Air Gaps", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 596-606, 1989.
12. I. Kishizimask, Matsumoto and Watanabe, IEEE trans., Vol PAS. 103, No. 6, pp. 1211-1216, 1984.
13. L. Thione, Electra, "Evaluating of the Switching Impulse Strength of External Insulation", No. 94, 1984.
14. M. Dietrich, J. Wolf, E. Lemke and J. Kurcera, "Influence of the Tail Duration on the Positives Switching Impulse Breakdown of Large Air Gaps", Proc. 4th ISH, Athens, Greece, 1983.
15. IEC-60-1,2,3,4, "High Voltage Testing Techniques", 1989.
16. "IEEE Standards Techniques for High Voltage Testing", IEEE Std. 4-1978.
17. A. Albert, "Phase-phase Switching Surge Flashovers: Design Data", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No 7, pp. 3666-3672, 1981.
18. P. Zacke, "Breakdown Phenomena of Rod-rod Gaps Under Impulse Voltages of Opposite Polarity on Both Electrodes", IEEE Trans., Vol PAS-96, No 2, pp. 701-708, 1977.
19. M.I. Qureshi, A. Al Arainy and N.H. Malik, "Performance of Rod-rod Gaps in the Presence of Dust Particles Under Standard Switching Impulses", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No 2, pp 706-714, 1991.

20. A. Al Arainy and N.H. Malik and M.I. Qureshi, "Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of Assymetrical Air Gaps Under Switching Impulses", IEEE Trans on Dielectrics and Elec. Insul., Vol. 27, No. 2, pp 193-206, 1991
21. M.I. Qureshi, A. Al Arainy na N.H. Malik, "Performance of Rod-rod Gaps in the Presence of Dust Particles Under Standard Switching Impulses", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 8, No 3, pp. 1045-1051, 1992.
22. AA. Al-Arainy, N.H. Malik and M.I. Qureshi, "Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of Assymetrical Air Gaps Under Swtitching Impulses", IEEE Trans on Dielectrics and Elect. Insul., Vol 1, No 2, pp. 305-314, 1994.
23. H. Batz, "Comparative Impulse Tests with Impulse Voltage on Rod Gaps" CIGRE Report No. 325, Paris, France, 1962.
24. IEC Publication 52, "Recommendation for High Voltage Measurement by Means of Sphere-Gaps (One Sphere Earthed)", Geneva, Switzerland, 1960.
25. IEEE Committee Report, "Report on Industry Survey of Protective Gap Applications in High Voltage Systems", IEEE trans., Vol. PAS-86, pp. 1432-1437, 1967.
26. IEEE Working Group Report, "Sparkover Characteristics of High Voltage Portective Gaps", IEEE Trans., Vol. PAS-93, pp. 196-205, 1974.
27. Ohio Brass Company, "Hi Tension News", Vol.48, No 9, pp. 2-3, 1979.
28. Special Issue on "UHV Air Insulation: Physical and Engineering Research – Part 1", IEE Proceedings, Vol. 133, Part A, No. 7, 1986.
29. G.N. Alexandrov, G.V. Podporkgn, Yu. G. Seleznev and A.D. Sivayev, "A Study of the Electric Strenght of Phase-to phase Air Gaps in Compacts Overheads Lines", 4th ISH, Athens, Greece, Paper No. 44.11, 1983.
30. WG No 7 of Committee 33 *Dielectric Strength of External Insulation Systems Under Live Working*, CIGRE, Paris, 1994.
31. M. Khalifa, (ed), *High Voltage Engineering: Theory and Praticce*, Marcel Dekker, New York, 1990.
32. CIGRE Committee Report, "Interference Produced by Corona Effects of Electric System: Description of Phenomena, Practical Guide for Calculation", CIGRE (Electra), Paris, France, pp. 89-97, 1971.
33. ANSI, "Specifications for Radio Noise and Field Strength Meters 0.015 to 30 megacycles/second", New York, 1963.
34. A. Al-Arainy, N.H. Malik and L.N. Abdulal, "Electromagnetic Interference from Transmission Lines Located in Central Region of Saudi Arabia", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. 4, No 1, pp. 532-538, 1989.
35. N.H. Malik and A. Al-Arainy, "EMI Characteristics of Distribution Lines Located in Desert Lands", IEEE Trans, on EMC, Vo. 31, No. 3, pp. 273-279, 1989.

36. W. Janischewskyj and A. Al-Arainy, "Statistical Characteristics of Microgap Discharge", U.S. – Japan Seminar on EMI in Highly Advanced Social Systems, Honolulu, August 1988.
 37. A. Al-Arainy, "Laboratory Analysis of Gap Discharge on Power Lines", Ph.D. thesis, University of Toronto, Canada, 1982.
 38. IEEE Radio Noise Subcommittee Report, IEEE Trans. On PAS, Vol 92, pp. 1029-1042, 1973.
- I. Electrical Insulation in Power Systems N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi Marcel Dekker Inc. New York – 1998.

4. GERAÇÃO DE TENSÕES IMPULSIVAS

Este capítulo apresenta comentários a respeito do impulso e sua forma bem como do equipamento utilizado na obtenção dos dados de ensaio utilizados neste trabalho – O Gerador de Impulsos Haefely 450 [kV] - 1.2kJ do *LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ* detalhando o seu princípio de funcionamento, circuitos e modelos simplificados.

4.1 O IMPULSO ATMOSFÉRICO

De acordo com a NBR 6936 [1] define-se “impulso” como tensão ou corrente transitória aperiódica aplicada intencionalmente, que, em geral, cresce rapidamente até o valor de crista e depois decresce mais lentamente até zero.

Dentro deste contexto podem ser feitas as seguintes observações:

- O impulso é em geral representado analiticamente pela soma de duas funções exponenciais;
- Para fins especiais são utilizados impulsos com frente aproximadamente linear, impulsos oscilantes ou aproximadamente retangulares;
- O termo “impulso” deve ser distinguido do termo “surto” que se refere aos fenômenos transitórios que ocorrem em equipamentos ou sistemas elétricos em serviço;
- Distingue-se impulso atmosférico de impulso de manobra pelo tempo de frente: impulsos com tempo de frente até 20 μs são em geral considerados como impulsos atmosféricos, e aqueles com tempo superior como impulsos de manobra. Em geral, o impulso de manobra é também caracterizado pelo tempo de queda até a metade do valor máximo, tempo de cauda, superior ao correspondente do impulso atmosférico.

Para ensaios dielétricos com tensão de impulso atmosférico, a NBR 6936 [1] adota um impulso com tempo de frente de 1,2 μs e tempo de cauda de 50 μs . Este impulso é designado como 1,2/50 μs , conforme mostra a Figura 4.1.

Tempo de frente T_f é um parâmetro virtual definido como 1,67 vez o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de crista. Tempo até meio valor, ou tempo de cauda T_c é um parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a tensão atinge a metade do valor de crista, na cauda, onde origem virtual é o instante que precede o tempo correspondente ao ponto A de 0,3 T_f .

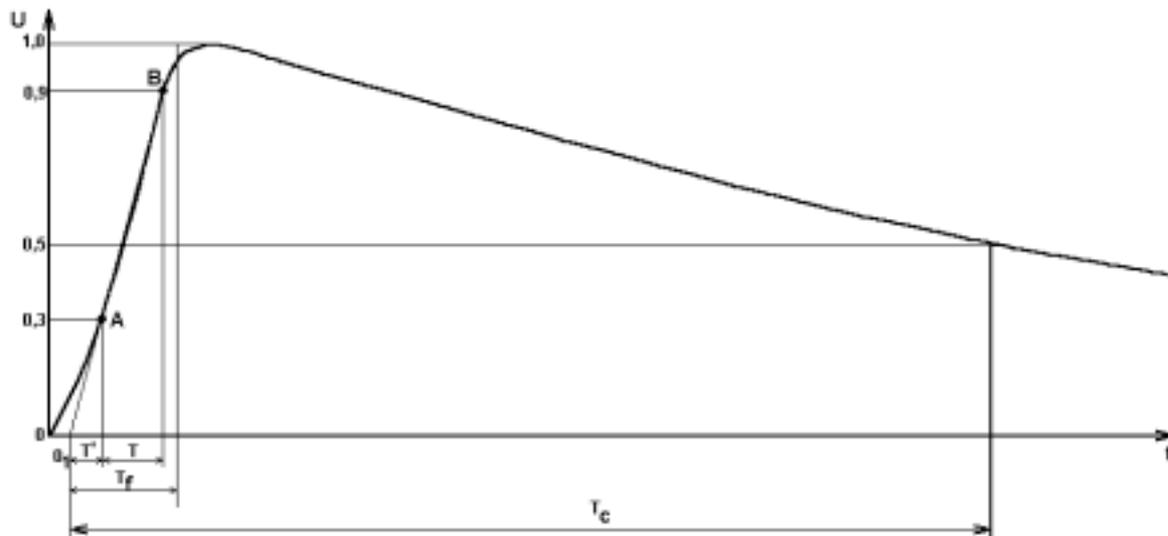


Figura 4.1 – Forma de um impulso atmosférico segundo a NBR 6936 [1]

4.2 O GERADOR DE IMPULSOS

A finalidade de um gerador de impulso é reproduzir tensões provocadas por descargas atmosféricas e/ou surtos de manobra, satisfazendo as propriedades exigidas por normas, tais como, uma subida muito rápida e uma parte decrescente muito lenta, além de não ter oscilações superpostas [2].

A Figura 4.2 mostra o circuito de um gerador de impulso comum, onde C_1 é o capacitor de impulso, C_2 o capacitor de carga, R_1 a resistência de amortecimento e R_2 a resistência de descarga.

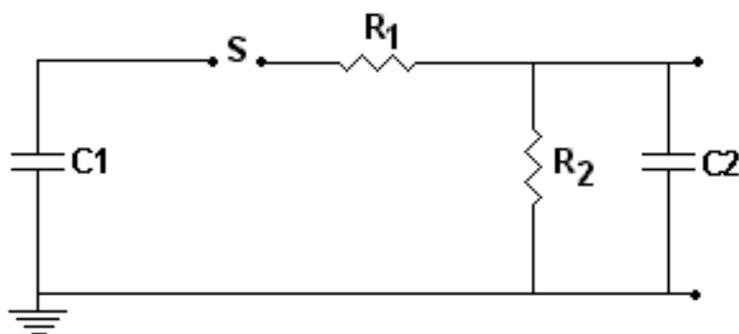


Figura 4.2 – Circuito de um gerador de impulsos comum

A forma da cauda da onda é praticamente determinada pela resistência de descarga e do capacitor de impulso. A forma da frente da onda depende do capacitor de carga e da resistência de amortecimento, através da qual o capacitor se descarrega.

Um gerador de impulso com um único estágio pode ser representado basicamente conforme mostrado na Figura 4.3.

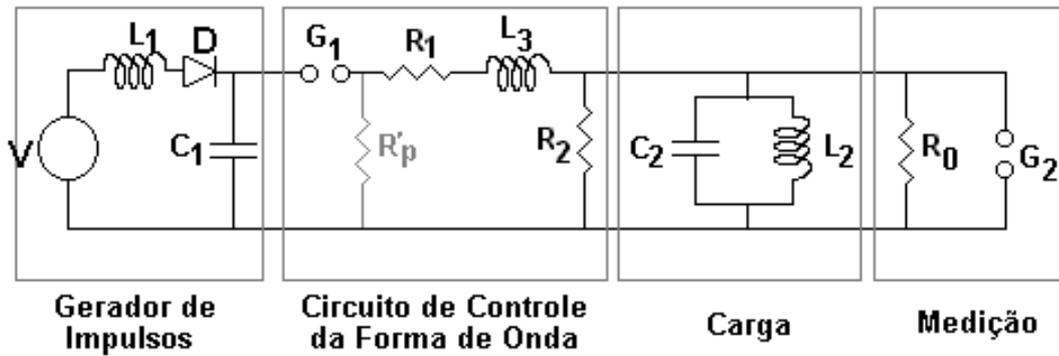


Figura 4.3 – Gerador de impulsos básico [3]

Onde:

V = Fonte de Tensão Alternada;

D = Diodo Retificador para Fonte de Tensão;

L_1 = Indutância Interna do Gerador;

C_1 = Capacitor de Carga do Gerador;

G_1 = Centelhador de Disparo;

R_1 = Resistência Série ou de Frente;

R_2 = Resistência Paralela ou de Cauda;

R'_2 = R_2 posicionada ao lado da carga;

C_2 = Capacitor de Surto ou de Impulso;

L_3 = Indutância das Conexões;

L_2 = Indutância da Carga;

R_0 = Resistência do Divisor de Tensão para o Acoplamento do Osciloscópio;

G_2 = Espaçamento para Medir Tensão de Crista.

O princípio de funcionamento do circuito descrito acima se baseia no carregamento do capacitor C_1 com tensão retificada da fonte. Quando a tensão em C_1 supera a suportabilidade dielétrica do centelhador G_1 – Tensão Disruptiva – ele entra em condução.

As indutâncias série, representadas por L_3 e resistências série, representadas por R_1 tendem, em geral, a retardar a duração da frente do impulso. A indutância também introduz oscilações e por esta razão é usualmente feita tão pequena quanto possível.

As resistências R_2 ou R'_2 controlam a duração da cauda do impulso, sendo que sua posição pode algumas vezes ser de grande importância prática. É imediatamente visível que quando R_2 estiver do lado da carga, os dois resistores formam um divisor de tensão que reduz a tensão de saída e se R_2 estiver do lado do gerador (posição R'_2), esta queda de tensão não é nitidamente observada.

Neste circuito L_2 e C_2 representam o objeto ou carga de ensaio. As demais capacitâncias para

terra devem ser adicionadas a esta para obter uma capacitância de carga total. Já G_2 e R_0 representam os equipamentos de medida, sendo que os mesmos possuem alguma capacitância para a terra; no entanto estes valores são adicionados à capacitância da carga.

É evidente que a complexidade do circuito mostrado na Figura 4.3 resulta de uma rigorosa solução teórica, porém o circuito pode ser simplificado para análise sem comprometer significativamente os resultados. Além disto, a razão para ignorar certas constantes pode depender de resultados de ensaios ou de julgamentos práticos. Assim, a forma simplificada do circuito é apresentada na Figura 4.4:

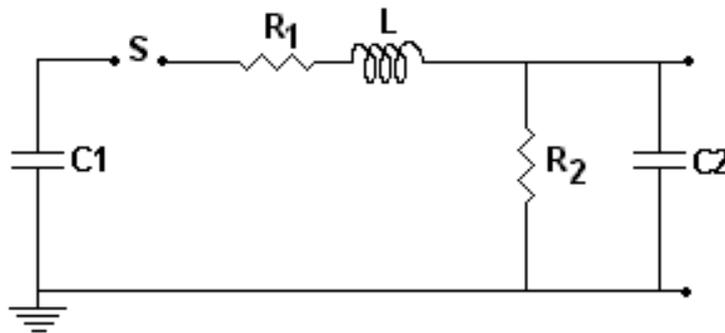


Figura 4.4 – Gerador de impulsos simplificado

A construção de um gerador de impulsos é limitada pela amplitude da tensão da fonte. No entanto, para obtenção de tensões superiores, utiliza-se um dispositivo com vários capacitores que se carregam em paralelo e se descarregam em série. Os vários estágios multiplicadores constituem o gerador de impulso segundo Marx e são apresentados no circuito mostrado na Figura 4.5.

Geralmente um gerador de impulsos é constituído de:

- A – Um grupo de capacitores de capacidade C_1 carregados em paralelo sob a tensão V , através das resistências R , resistências de valores consideráveis com relação a R_1 , R_2 e R_3 ; uma vez carregados, os capacitores são ligados em série pelos centelhadores S , suas tensões se somam e os capacitores se descarregam nas resistências de amortecimento R_a da Figura 4.5. Durante a curta duração do impulso, os capacitores em série podem ser considerados como um capacitor de impulso único de capacidade C_1/n . Este dispositivo a vários estágios constitui o Gerador de Impulso de Marx. A tensão de um estágio é determinada pela escolha dos retificadores;
- B – De três resistências R_1 , R_2 , e R_3 , cujos valores são determinados de modo que, para um dado valor da capacitância C_2 do objeto a ensaiar, isto é, entre os pontos d e e , se obtenha uma tensão de impulso da forma desejada. R_1 é o valor da resistência total do circuito e, a, b , onde $R_1 = R'_1 + nR_a$;

- C – A resistência R_0 do divisor de tensão, por hipótese resistivo, ligada aos sistemas de medição – Voltímetro de Crista e Osciloscópios;
- D – As resistências de carga R geralmente não têm grande importância na forma do impulso do gerador;

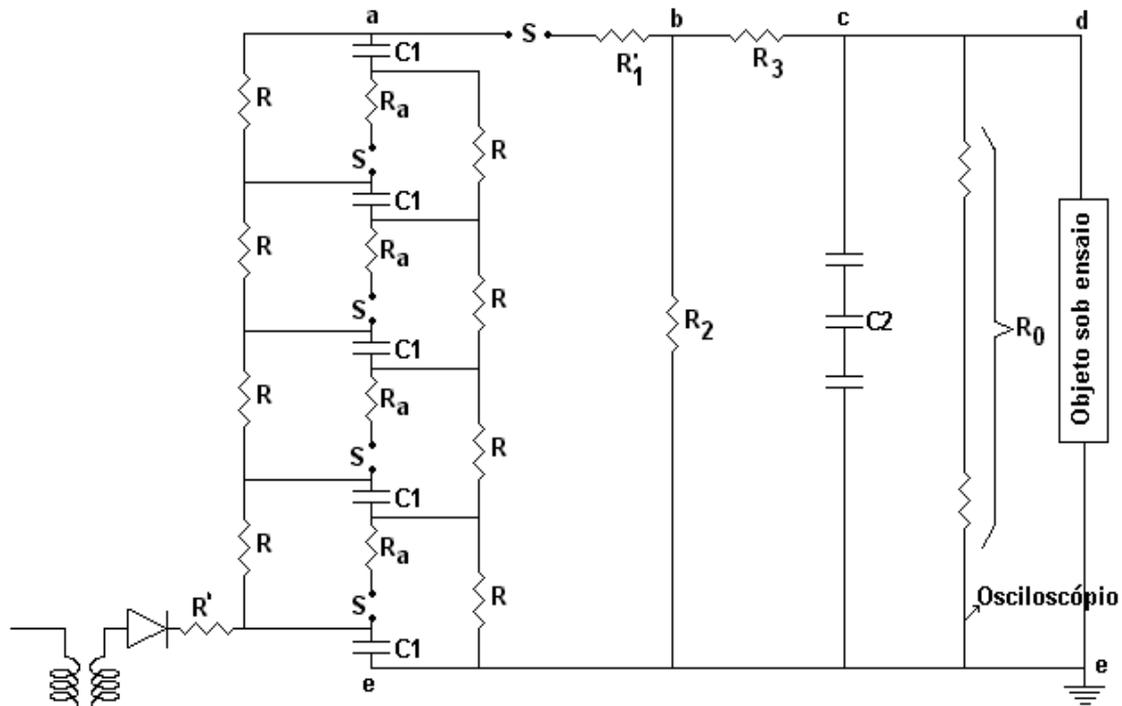


Figura 4.5 – Vários estágios de um gerador de impulsos comum [2]

Quanto ao circuito básico convém ressaltar os seguintes pontos:

1- A indutância resultante dos diversos cabos do circuito deve ser desprezável, enquadrando as características do gerador nas prescrições da ABNT [1], ou seja:

I - Para eliminar ou pelo menos limitar as oscilações parasitas, deve-se estabelecer a condição $R_1 \gg \sqrt{L_c/C_2}$. A indutância total do circuito de descarga L_c , que pode ser calculada aproximadamente, deve ser tão pequena quanto possível.

II – O dispositivo de carga dos capacitores de impulso C_1 não deve ter grande influência sobre a descarga. Esta condição pode ser satisfeita, colocando-se entre a fonte e os capacitores resistências de valores suficientes.

III – A capacitância de impulso C_1/n do gerador deve ser pelo menos 5, idealmente 10, vezes maior do que a capacitância de carga que compreende as capacitâncias do objeto sob ensaio – C_2 , dos centelhadores, do divisor de tensão, do osciloscópio e as determinadas pelas conexões.

2 – Pode-se comparar o equipamento a ensaiar a um capacitor e a uma resistência em paralelo. Se o equipamento ensaiado não satisfaz a estas condições, a corrente que o percorre deve ser pequena diante da corrente no capacitor de carga C_2 .

Se todas estas condições forem satisfeitas, o circuito da Figura 4.5 pode ser substituído nos cálculos pelo circuito da Figura 4.6:

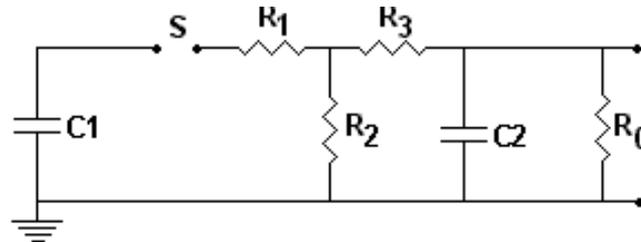


Figura 4.6 – Vários estágios de um gerador de impulsos comum de modo simplificado [2]

É claro que existem muitas outras ligações constituindo geradores de impulso, utilizados principalmente em laboratórios. Por exemplo, os três circuitos abaixo são modificações do Gerador de Marx.

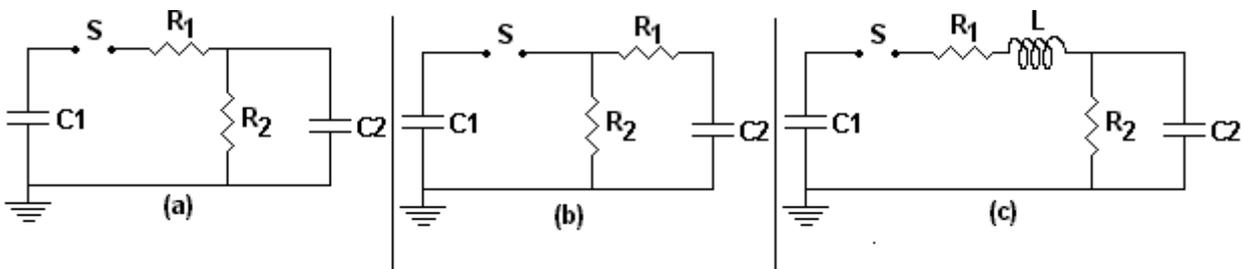


Figura 4.7 – Modificações do Gerador de Marx [2]

Na Figura 4.7(a) $R_3 = 0$ e $R_0 = \infty$; na Figura 4.7(b) $R_1 = 0$, $R_3 = R_1$ e $R_0 = \infty$.

O gerador da Figura 4.8, observando-se a relação $(R'_1/R_1) = (R'_2 = R_2)$, permite evitar grandes deformações na frente do impulso.

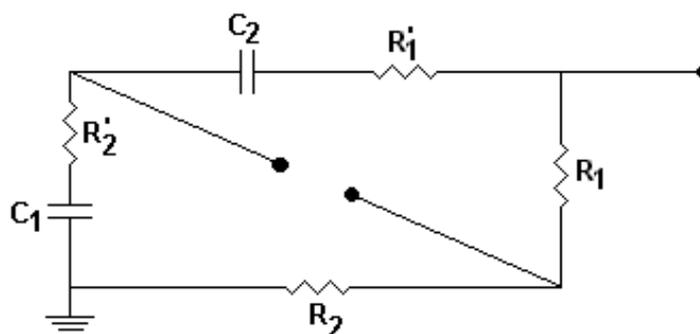


Figura 4.8 – Gerador de impulsos – circuito para evitar grandes frentes de onda

A Figura 4.9 mostra um circuito conhecido há muito e que permite produzir uma onda de corrente sem oscilações.

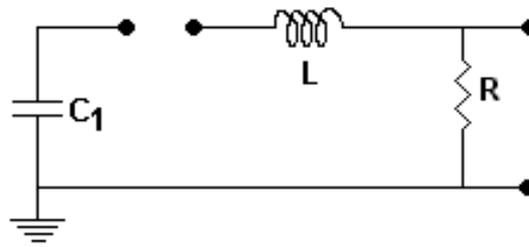


Figura 4.9 – Gerador de impulsos – circuito utilizado para produzir onda de corrente sem oscilações na parte superior [2]

A tensão de impulso que aparece nos terminais dos geradores é composta de duas funções exponenciais que podem ser calculadas a partir das constantes dos circuitos. Admite-se que a capacitância C_1 dos arranjos para os geradores de impulso indicadas anteriormente é a resultante da conexão série das capacitâncias dos estágios no momento do disparo do gerador. Os circuitos simplificados – 1 Estágio – fornecem um nível de tensão de impulso limitado pelo dispositivo retificador. Os circuitos em cascata, por exemplo, segundo Marx, permitem teoricamente obter tensões de impulso de qualquer amplitude. O circuito da Figura 4.10 mostra modificações no circuito da Figura 4.8 de forma a permitir a construção de um circuito em cascata.

Considerando-se o circuito fundamental na Figura 4.5, observa-se que as resistências de carga R são ligadas em série e que os diferentes estágios não se carregam de forma simultânea. A tensão de carga decresce de estágio em estágio e este não é um tempo suficientemente longo para que a tensão se torne a mesma em todos os estágios.

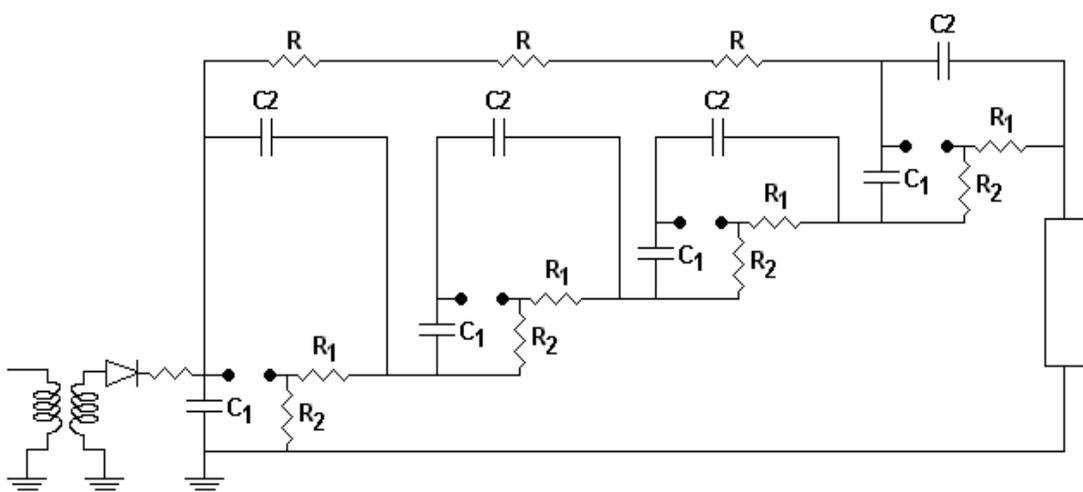


Figura 4.10 – Gerador de impulsos – Ligação em Cascata [2]

4.2.1 CIRCUITOS PARA O GERADOR DE IMPULSO HAEFELY 1,2 [kJ], 450 [kV] DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

O Gerador de impulsos do *LAT-EFEI* possui quatro circuitos ou conexões distintas adequadas para trabalhar em determinadas faixas de tensão [4]:

- 1- Conexão 6s-1p como mostra a Figura 4.11, possui 1 grupo de 6 capacitores em série, estando assim, apta para operar entre 360 [kV] e 450 [kV].
- 2- Conexão 3s-2p apresenta 2 grupos de capacitores em paralelo, cada grupo contendo 3 capacitores em série. Com esta conexão, o gerador de impulsos alcança uma maior eficiência trabalhando na faixa entre 30 [kV] e 180 [kV], Figura 4.12.
- 3- Conexão 2s-3p é geralmente recomendada para ensaios de equipamentos de Nível Básico de Isolamento –NBI de aproximadamente 95 [kV]. Nesta conexão, trabalham 2 grupos em série, e cada grupo é composto por 3 capacitores em paralelo, Figura 4.13.
- 4- Conexão 1s-6p é adequada para ensaios de equipamentos de NBI igual a 50 [kV], ou ainda equipamentos de baixa tensão, como por exemplo, televisores. Nesta, 6 grupos de um capacitor cada estão colocados em série, Figura 4.14.

Para a faixa de tensão dos equipamentos, sistemas e centelhadores utilizados nesse trabalho optou-se por trabalhar com a Conexão 3s-2p que apresenta uma maior eficiência entre 30 [kV] e 180 [kV].

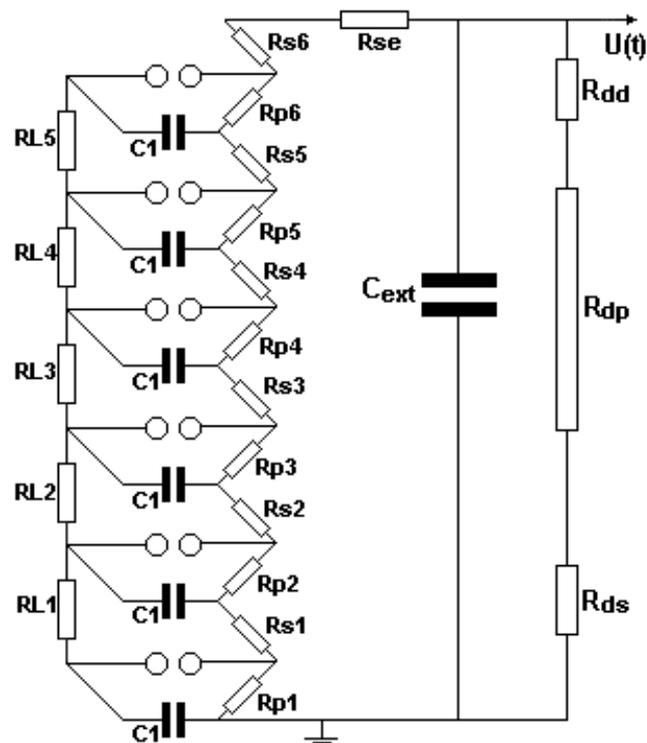


Figura 4.11 – Conexão 6s-1p

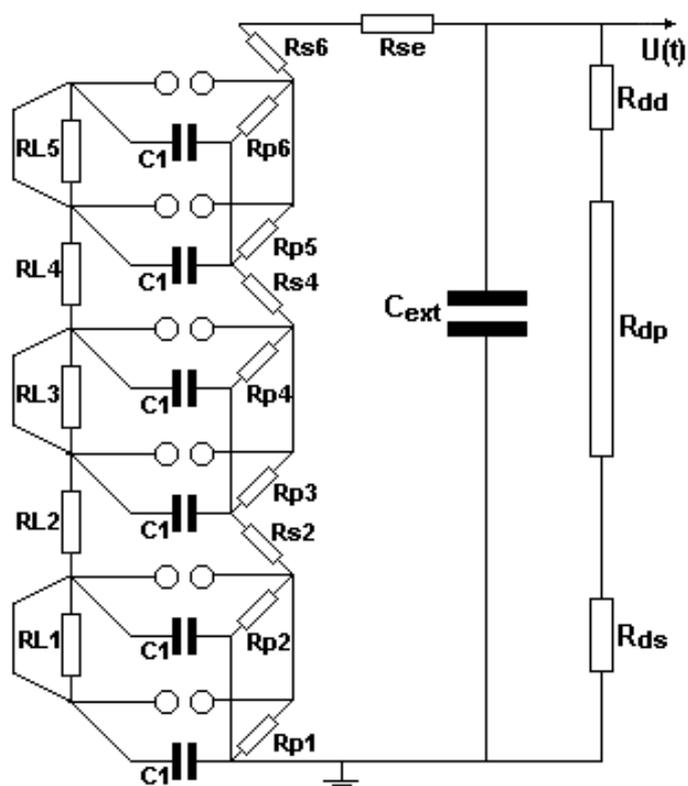


Figura 4.12 – Conexão 3s-2p

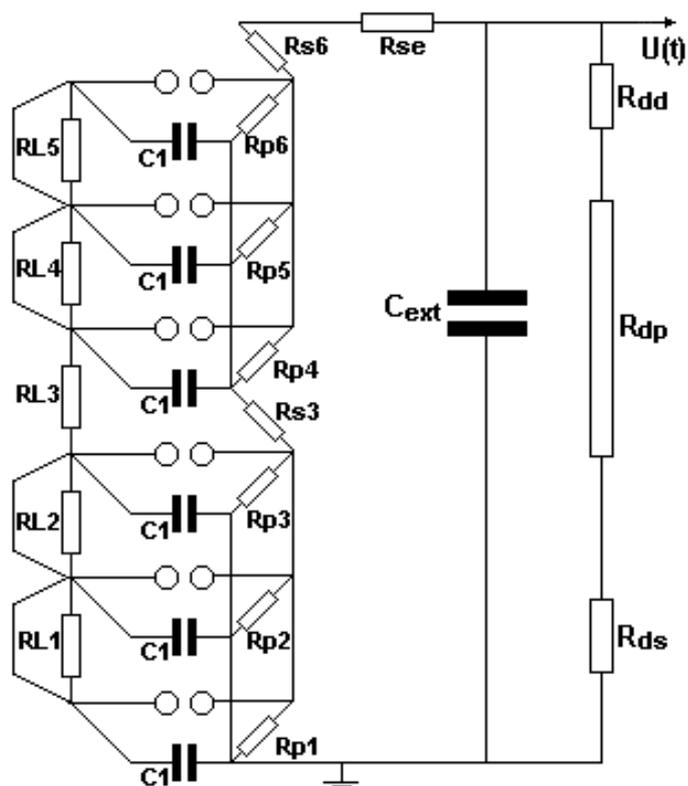


Figura 4.13 - Conexão 2s-3p

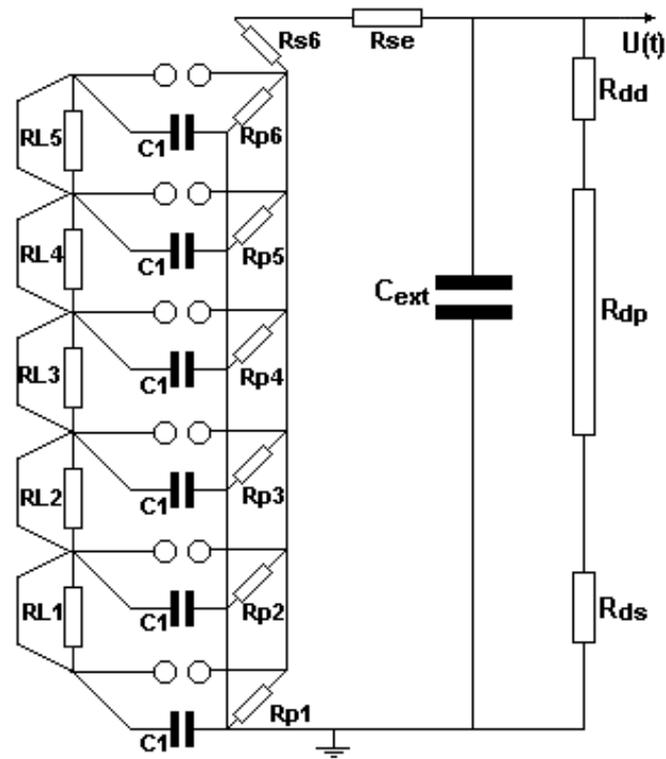


Figura 4.14 – Conexão 1s-6p



Figura 4.15 – Gerador de Impulsos HAEFELY 450kV, 1.2kJ da Universidade Federal de Itajubá - comando



Figura 4.16 – Gerador de Impulsos HAEFELY 450kV, 1.2kJ da Universidade Federal de Itajubá – conexão 3S-2P

4.3 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 4

1. NBR 6936/1992. – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão.
2. Técnicas de Alta Tensão, C.J.G.Junqueira, R.D. Fuchs – 1970.
3. Métodos Estatísticos Aplicados aos Ensaio de Tensão Disruptiva do Sistema Spacer de 15 kV Frente a Impulsos Atmosféricos, *LAT-EFEI* – A C. M. Vieira.
4. HAEFELY – Impulse Generator – Instituto Eletrotécnico de Itajubá/Bresil – Catálogo WO3134.

5. MÉTODOS DE ENSAIO & ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os ensaios de tensão disruptiva em materiais e sistemas de isolamento demonstram que as falhas dielétricas, para um mesmo nível de tensão prospectiva, apresentam natureza aleatória. Por este motivo, os resultados dos ensaios apresentam variações significativas, o que torna necessário a utilização de considerações e métodos estatísticos na coleta de dados. Nos últimos anos vêm sendo utilizados métodos estatísticos avançados em projetos e ensaios de equipamentos elétricos em média e alta tensão, visando melhorar a confiabilidade e a análise dos resultados obtidos. Esses métodos são aplicados aos ensaios de impulsos atmosféricos e de manobra, com o objetivo de determinar os limites de suportabilidade dielétrica dos equipamentos e dos sistemas de isolamento, no caso específico de média tensão, isoladores, chaves fusíveis, centelhadores, entre outros.

5.1 MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos comumente utilizados na realização dos ensaios de suportabilidade frente a impulsos são classificados em 3 Classes, dotadas de metodologia específica.

No desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o **Método dos Acréscimos e Decréscimos** – *The Up and Down Test Method*.

Este método de ensaio consiste em aplicar ao objeto sob ensaio séries de impulsos com 1 impulso por nível de tensão respeitando a seguinte regra: Para cada série suportada (*Suportabilidade* – **W**), o próximo nível de tensão é **U+ΔU**; para cada série não suportada (*Descarga* – **D**), o próximo nível de tensão é **U-ΔU**. Este procedimento tem por objetivo buscar um intervalo de confiança – Limites superior e inferior – bem como um valor para a *Tensão Disruptiva Crítica* – **U_{50%}**, ou seja, a tensão que corresponde a 50% de probabilidade de descarga. Recomenda-se submeter o objeto de ensaio a um número de séries de aplicações – **m**≥20, com **ΔU**=0.01~0.03 vezes o valor presumido da tensão disruptiva crítica – **U_{50%}**. O intervalo **Δt** entre dois impulsos sucessivos deve ser suficientemente longo para garantir a independência dos resultados [1,2].

O procedimento de ensaios segundo o *Método dos Acréscimos e Decréscimos* tem sua validade amparada pela **NBR6936** – *Técnicas de Ensaio de Alta Tensão da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT*, onde estão ainda relacionados os outros dois métodos de ensaio utilizados para o levantamento da suportabilidade dielétrica de equipamentos e sistemas de isolamento, ou seja, o *Método dos Acréscimos e Decréscimos Estendido* e o *Método dos Níveis Múltiplos*.

O **Método dos Acréscimos e Decréscimos Estendido** implica no aumento do número de

impulsos aplicados por série. Deste modo, quando se busca pelo valor *do Nível Básico de Isolamento* – NBI – $U_{10\%}$, deve-se aplicar ao objeto ensaiado sete impulsos por série. Neste caso se o objeto suportar todos os sete impulsos, o próximo nível de tensão deve ser $U+\Delta U$. Se somente uma ruptura ocorrer, o próximo nível de tensão deve ser $U-\Delta U$ [1,2];

Já o **Método dos Níveis Múltiplos** consiste em determinar faixas, onde a probabilidade de descarga e de suportabilidade sejam próximas de 100%. Este intervalo é dividido em n níveis de tensão, sendo a diferença de tensão entre eles de ΔU . Para cada nível de tensão é aplicado um número total de k impulsos. Deste modo, o número total de impulsos por nível de tensão (k) é igual à soma dos impulsos que não resultaram em falha dielétrica (W) e dos que resultaram em falha dielétrica (D). Na aplicação deste procedimento são recomendados os seguintes valores para os parâmetros de ensaio: $n=5$, $k=10$, $\Delta=0.03\sim 0.06$ vezes o valor presumido da tensão disruptiva crítica – $U_{50\%}$.

Nesses ensaios é essencial que não haja falhas durante a execução, na forma de aumentos ou reduções erradas no nível de tensão. No *Método dos Níveis Múltiplos*, uma falha durante o ensaio resulta num alargamento da faixa de confiança [1,2].

É possível a obtenção de $U_{10\%}$ a partir de $U_{50\%}$ bem como limites de confiança com a utilização da Equação 5.1:

$$U_{10\%} = U_{50\%} - 1,29\sigma \quad (5.1)$$

5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O tratamento estatístico dos dados coletados durante qualquer dos *Ensaio de Acréscimos e Decréscimos* é realizado pelo software desenvolvido no *LAT-EFEI* intitulado “*Métodos de Ensaio e Análise Estatística – MEAE*” [3], que trata e organiza as informações coletadas aplicando o *Método da Máxima Verossimilhança*, e *Distribuição de Weibull de 4º grau – Simétrica*. Deste modo, são extraídos dos ensaios os valores de *Tensão Disruptiva Crítica* – $U_{50\%}$ bem como seu respectivo *Desvio Padrão* e limites de confiança. O *MEAE* já incorpora automaticamente as correções de temperatura e pressão atmosférica e gera gráficos que permitem avaliar o comportamento das variáveis $U_{50\%}$ e *Desvio Padrão* em função do número de impulsos por série.

Os métodos aplicados resultam em n impulsos distribuídos em m níveis de tensão U_i , sendo que cada nível contém k_i séries de impulsos. Dentro deste contexto, o valor esperado U_p é estimado do valor médio dos níveis de tensão U_i em que pelo menos duas séries foram aplicadas ($k_i \geq 2$), conforme mostra a Equação 5.2:

$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^m k_i \cdot U_i}{\sum_{i=1}^m k_i} \quad (5.2)$$

A probabilidade associada com o resultado de D – Descargas (e W – Suportabilidades) ao se aplicar N impulsos de valor U_i é obtida com o auxílio da Equação 5.3.

$$L_i = p(U_i)^{D_i} \cdot q(U_i)^{W_i} = L_i(U_i; A_1, A_2, \dots, A_k) \quad (5.3)$$

Logo, a probabilidade de se obter um conjunto de n descargas para m níveis de tensão pode ser obtida com a Equação 5.4.

$$L = \prod_{i=1}^n L_i(U_i, A_1, A_2, \dots, A_k) \quad (5.4)$$

Os valores de A que maximizam a Equação 5.4 são a melhor estimativa dos parâmetros escolhidos, no caso, U_p , σ . A região de A , dada pela Equação 5.5 define a zona que contém em $C\%$ dos casos o valor real dos parâmetros A_i . $C\%$ é o intervalo de confiança escolhido para análise dos resultados do ensaio. Os valores extremos, A_{ia} e A_{ib} , que o parâmetro A assume na região (curva), podem ser considerados como os limites de confiança.

$$L(A_1, A_2, \dots, A_k) = a_{lim} \cdot L_{max} \quad (5.5)$$

5.2.1. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para melhor entendimento da análise descrita, seja a análise dos resultados de um ensaio através do *Método dos Acréscimos e Decréscimos* com impulso de polaridade positiva realizado em isolador *ST175 V5-GO*. Os dados colhidos no ensaio são apresentados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Dados de Ensaio no Isolador *ST175 V5-GO* com o *Método dos Acréscimos e Decréscimos*

NÍVEL	TENSÃO [KV]	RUPTURA [D]	SUPORTABILIDADE [W]	TOTAL [D + N]
1	88,9	0	5	5
2	89,9	5	8	13
3	90,9	7	5	12
4	91,9	5	0	5

Deste modo é possível obter:

$$L = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot L_4$$

onde:

$$L_1 = p_1^{d1} \cdot q_1^{w1}$$

$$L_2 = p_2^{d2} \cdot q_2^{w2}$$

$$L_3 = p_3^{d3} \cdot q_3^{w3}$$

$$L_4 = p_4^{d4} \cdot q_4^{w4}$$

Assumindo que o fenômeno pode ser modelado por uma *Distribuição Simétrica de Weibull*, conforme mostrado a seguir, onde U_i é o nível de tensão do ensaio.

$$p_i = 1 - 0.5 \left(1 - \frac{U_i - U_{50\%}}{n \cdot \sigma} \right)^m$$

Os valores de tensão – U , nesse caso $U_{50\%}$, e desvio padrão – σ que maximizam a *Função de Verossimilhança* – Equação 5.4, que devem ser obtidos através de programa de otimização [2] são:

$$U_{50\%} = 90.464 \text{ [kV]}$$

$$\sigma = 1.024 \text{ [kV]}$$

que corresponde a um valor de L igual a:

$$L_{max} = -1,119159$$

Assumido o valor de 0.2 para o fator a_{lim} , tem-se então:

$$L = L_{min} = a_{lim} L_{max} = -0,2238318$$

De posse deste valor pode-se obter, através do mesmo processo de otimização utilizado para maximizar a *Função de Verossimilhança*, a região e os limites de confiança dos resultados do ensaio. Neste exemplo:

$$U_{50a} = 89,833 \text{ [kV]}$$

$$U_{50b} = 91,090 \text{ [kV]}$$

$$\sigma_a = 0,567 \text{ [kV]}$$

$$\sigma_b = 2,800 \text{ [kV]}$$

A região é mostrada na Figura 5.1. Nas Figuras 5.2 e 5.3 apresenta-se a Função de Similhança.

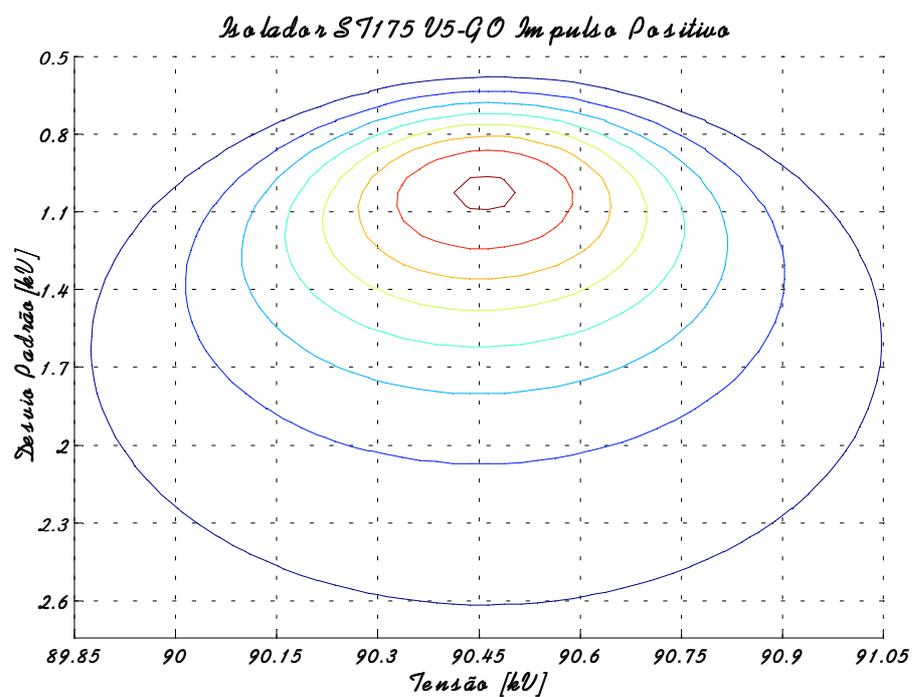


Figura 5.1 – Região de confiança obtida através da Teoria da Verossimilhança

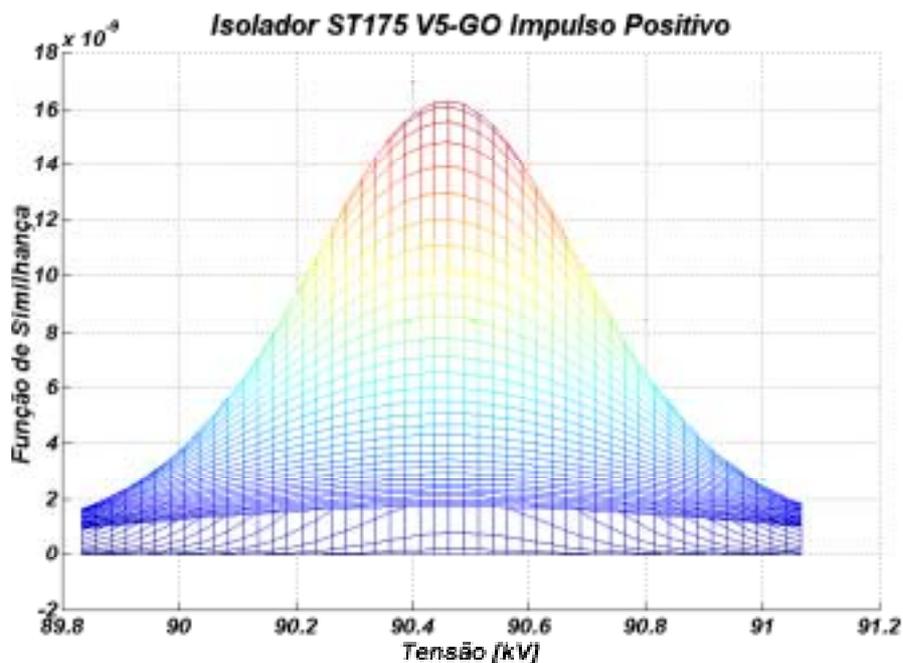


Figura 5.2 – Função de Similhança x Tensão

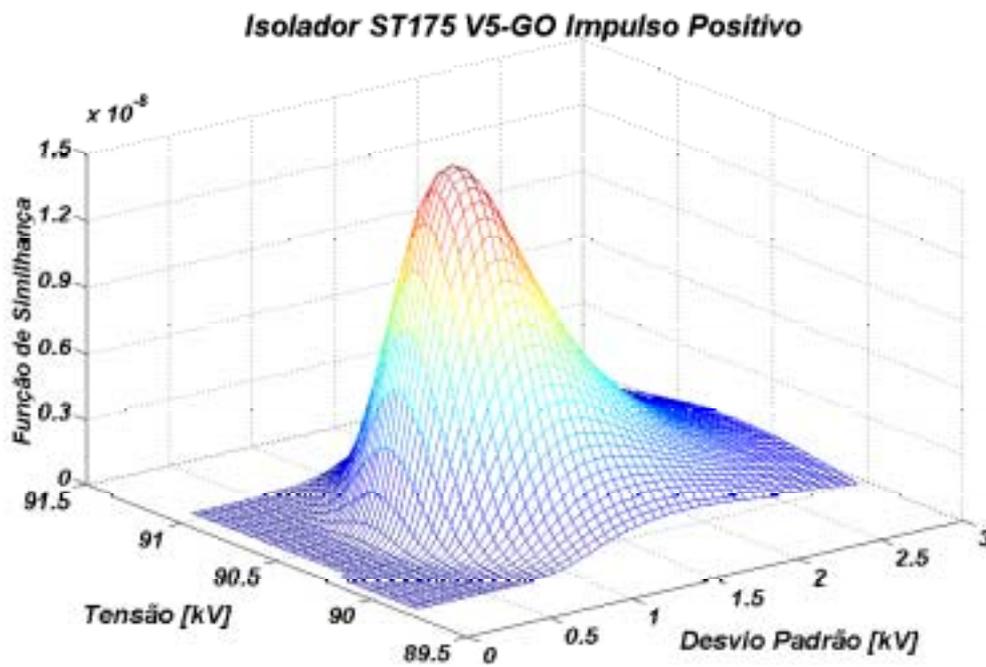


Figura 5.3 – Função de Similhança x Tensão x Desvio Padrão

5.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5

1. NBR 6936/1992. – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão
2. Carrara, G.; Yakov S.: “Statistical Evaluation of Dielectrics Methods”, Revista “L’Energia Elettrica”, fascículo 1, volume LX, 1983.
3. Pavinatto. E. F., Martinez. M. et alli; “Métodos de Ensaio e Análise Estatística em Ensaio de Tensão Disruptiva de Impulsos Atmosféricos”; VI SEMEL – Seminário Nacional de Materiais no Setor Elétrico; COPEL – LAC – UFPR; Novembro 1998, Curitiba.

6. MÉTODO PROPOSTO – ENSAIOS E DESENVOLVIMENTO

A correção de umidade para os resultados de ensaios de impulso atmosférico é feita de acordo com procedimentos estabelecidos em norma. No entanto, como pode ser observado, a aplicação destes procedimentos não é satisfatória para pequenas distâncias em ar, típicas de equipamentos de média tensão. Neste capítulo são comentados os procedimentos recomendados em *Norma* e o *Método Proposto* desenvolvido neste trabalho.

6.1 CORREÇÃO DE UMIDADE SEGUNDO IEEE STD. 4 – 1995 E IEC 60.1 – 1989 [1]

Conforme mencionado no *Capítulo 2*, de acordo com a norma da *IEEE Std. 4 – 1995* e *IEC 60.1 – 1989* a Tensão Disruptiva Crítica deve ser corrigida para condições atmosféricas no local de ensaio por um fator, denominado Fator de Correção para as Condições Atmosféricas – k_t , que é definido pela Equação 6.1:

$$K_t = k_1.k_2 \quad (6.1)$$

onde:

k_1 : é o fator de correção da densidade do ar;

k_2 : é o fator de correção da umidade.

De acordo com a Equação 6.2, a correção para as condições padrão de umidade, e temperatura é obtida pela divisão da *Tensão Disruptiva Crítica* – $U_{50\%}$ - resultante do ensaio, pelo fator de correção K_t . Deste modo obtém-se o valor de *Tensão Disruptiva Crítica Padrão* – U_0 correspondente ao valor de tensão, caso o ensaio fosse realizado nas condições atmosféricas padrão:

$$U_0 = \frac{U_{50\%}}{K_t} \quad (6.2)$$

O *Fator de Correção da Densidade do Ar* – k_1 é calculado pela Equação 6.3:

$$k_1 = \delta^m \quad (6.3)$$

onde

$$\delta = \left(\frac{b}{b_0} \right)^{\left(\frac{273 + t_0}{273 + t} \right)} \quad (6.4)$$

As condições atmosféricas de referência são:

Temperatura $t_0 = 20^\circ\text{C}$;

Pressão $b_0 = 101,3 \text{ kPa}$ (760 mmHg);

Umidade absoluta $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$.

A pressão atmosférica de $101,3 \text{ kPa}$ corresponde à altura barométrica de 760 mm de mercúrio a 0°C . Deste modo, caso a altura barométrica seja fornecida em **mmHg** – *mm de mercúrio* e a temperatura t em $^\circ\text{C}$, a pressão atmosférica em kPa é obtida através da Equação 6.5:

$$b = \frac{101,3\text{mmHg}}{760} (1 - 0,00018t) \quad (6.5)$$

Como a correção para a temperatura pode ser considerada desprezável em relação à altura da coluna de mercúrio, tem-se a Equação 6.6:

$$b = 0,1333\text{mmHg} \quad (6.6)$$

Já o fator de *Correção da Umidade* – k_2 é dado pela Equação 6.7.

$$k_2 = k^w \quad (6.7)$$

onde:

k é um parâmetro que depende da forma da tensão de ensaio. Para formas impulsivas, k é definido pela Equação 6.8:

$$k = 1 + 0,010 \times (h/\delta - 11) \quad (6.8)$$

A Figura 6.1 mostra os valores dos expoentes m e w que são obtidos considerando o parâmetro g definido pela Equação 6.9.

$$g = \frac{U}{500.L.k.\delta} \quad (6.9)$$

onde:

L – Menor distância de arco [m];

U – Tensão Disruptiva Crítica – $U_{50\%}$ nas condições reais [kV];

δ e k – Obtidos segundo as Equações 6.4 e 6.8, respectivamente.

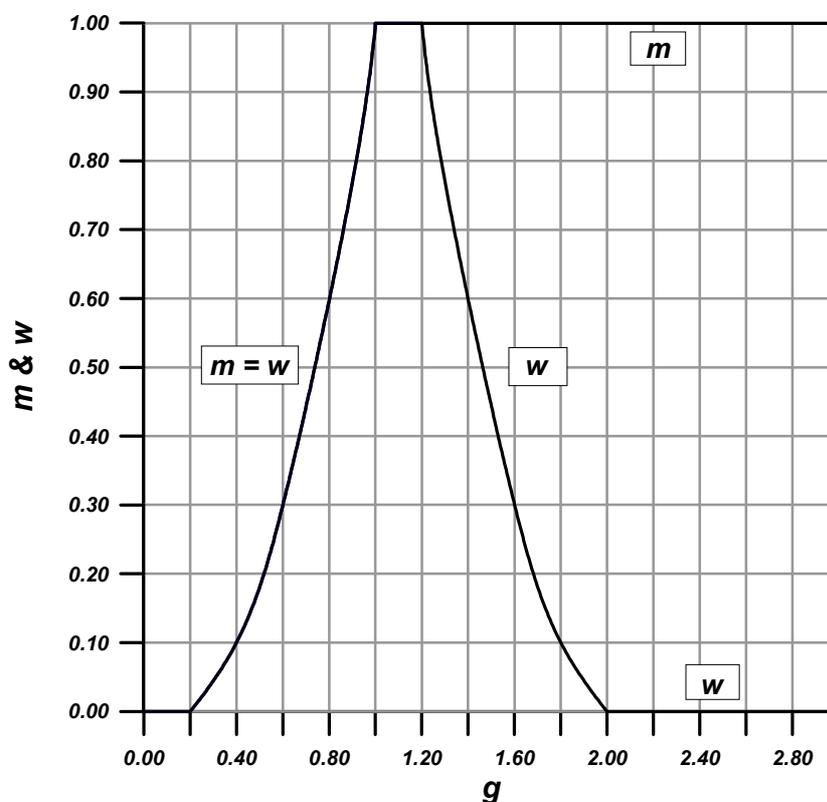


Figura 6.1 – Valores de m e w para a correção da densidade e umidade em função do parâmetro g

6.2. O MÉTODO PROPOSTO

Este trabalho traz a proposta, em desenvolvimento, de um novo *Fator de Correção de Umidade* para aplicação em média tensão. Este novo procedimento de correção é baseado nos resultados de ensaios em eletrodos básicos: *Esfera-esfera* e *Haste-haste*. Todos os dados presentes foram obtidos no *Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá* utilizando um *Gerador de Impulso de 450kV - 1.25kJ*.

6.2.1. OS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados com o Gerador de Impulsos na *Conexão 3s-2p*, que apresenta a maior eficiência na faixa entre 30 e 180 [kV] [2]. Com esta conexão, é possível ensaiar praticamente todos os sistemas de isolamento utilizados nas *Classes de Tensão 15 e 25 kV*. A conexão de ensaio foi mantida para evitar variações na frente do impulso. Nessas condições de ensaio, obteve-se a forma de impulso de 1,2/50 μ s. O Método de ensaio utilizado foi o *Método dos Acréscimos e Decréscimos* [1], com a aplicação de 75 séries ($m=75$) em cada polaridade. O arranjo é mostrado nas Figuras 6.2 a 6.4.

Os espaçamentos para os eletrodos Esfera–esfera foram de 15mm a 60mm, acrescidos em passos de 5mm [2-7]. Já para os eletrodos Haste–haste, os espaçamentos foram de 25mm a 60mm, também acrescidos em passos de 5mm. Os espaçamentos iniciais foram determinados a partir da mínima tensão capaz de habilitar o sistema de disparo do Gerador de Impulsos. Durante cada ensaio, o intervalo de tempo Δt , entre um impulso e outro foi mantido suficientemente longo para que os capacitores pudessem se descarregar completamente e se recarregar sem sofrer influências do impulso anterior. Para isto, foi praticado um intervalo mínimo de 10 segundos entre as aplicações.



Figura 6.2 – Gerador de impulsos e instrumentação

Os ensaios foram realizados com os eletrodos instalados no interior da *Câmara Climática* do *Laboratório de Alta Tensão*, onde foi possível estabelecer condições de umidade absoluta do ar diferentes das ambientes [3-7]. Para várias seqüências de ensaio foram aproveitadas as condições ambientes do próprio laboratório.

Com os valores de temperatura e umidade relativa do ar, encontra-se o valor da umidade absoluta através da leitura da carta psicrométrica fornecida pelo *Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá*, conforme mostra a Figura 6.5.

O resultado de cada ensaio é submetido a uma análise estatística com o auxílio do software *Métodos de Ensaio e Análise Estatística – MEAE*.



Figura 6.3 - Foto do Gerador de impulsos vista de trás com a conexão - capacitores



Figura 6.4 - Foto dos eletrodos Esfera – esfera dentro da Câmara de Nevoa Salina

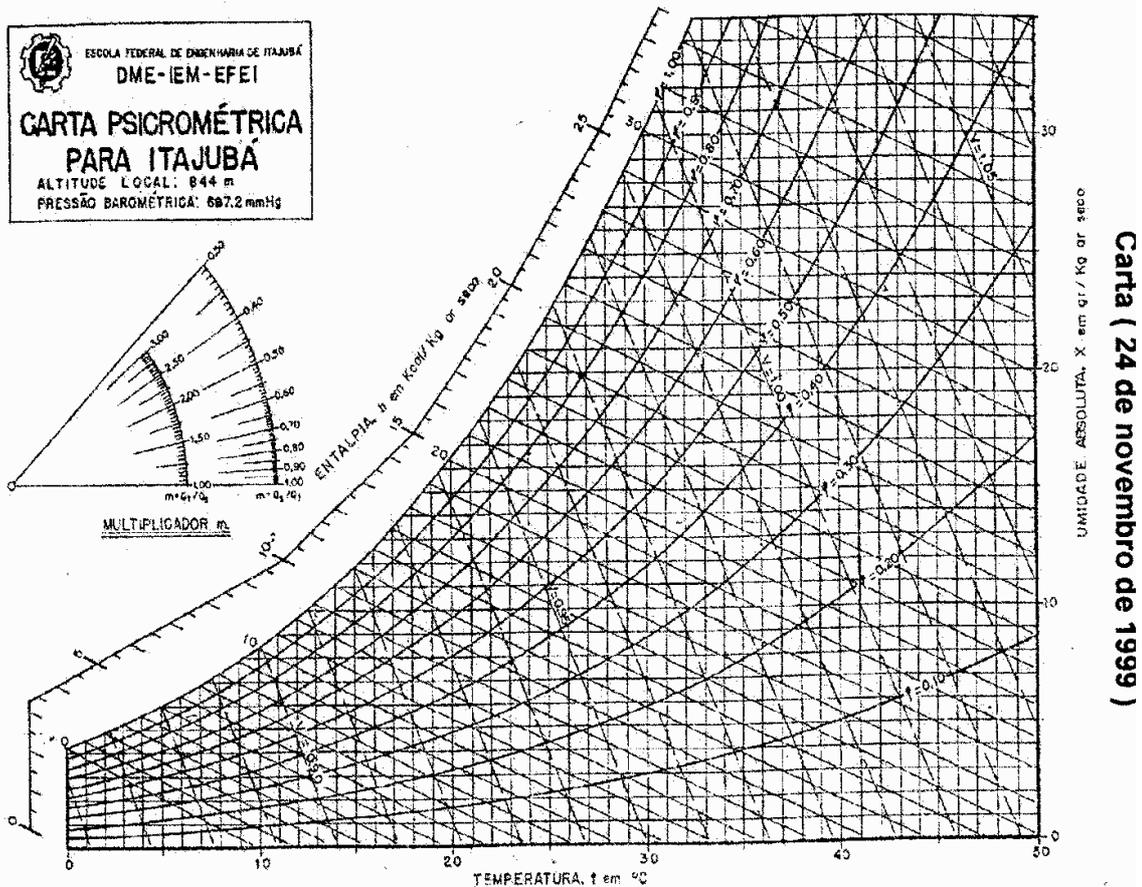


Figura 6.5 – Carta Psicrométrica

6.2.2. CURVAS DE TENDÊNCIA

No contexto deste trabalho, um arranjo para ensaios é definido pela forma dos eletrodos e pela distância, por exemplo: *Esfera-esfera 20mm*. Cada conjunto completo de resultados é composto pelos ensaios realizados, em ambas polaridades, para varias condições de umidade absoluta. A partir de seus resultados são traçadas curvas de tendências com base em uma *Regressão Polinomial de Terceiro Grau*. Para cada curva encontrada, é retirado o valor de tensão para a condição de *Umidade Absoluta de 11 g/m³*, que é utilizada como referência para a normalização de todos os outros valores deste conjunto. Para cada conjunto de ensaios foi implementada uma rotina desenvolvida em ambiente *MATLAB* através da qual é obtida a regressão polinomial, determinado o valor da *Tensão Disruptiva Crítica* para 11 g/m³, e a normalização dos valores encontrados. Como exemplo de ilustração, segue a rotina feita para um conjunto qualquer.

```
%
% Regressão Polinomial para a Característica Tensão Disruptiva x Umidade Absoluta
%
% Dados de Entrada
%
%- D      ( Distancia entre os Eletrodos [mm] )
%- N      ( Grau do Polinomio )
%- Vetor H ( Umidade Absoluta [g/m^3] )
```

```

%- Vetor U50 ( Tensão Disruptiva Critica mais Provavel [kV] )
%
% Distancia entre os Eletrodos
%
D=60;
%
% Umidade Absoluta [g/m^3]
%
T=[ 24.0 18.0 17.6 17.4 25.0 24.0 25.0 25.8 ];
P=[ 694.0 702.0 703.5 701.4 693.4 700.0 700.0 697.2];
DELTA=298*P/((273+T)*760);
HC=[ 14.2 10.6 9.0 7.0 15.2 12.6 20.0 13.6 ];
H=HC/DELTA;
%
% Tensão Disruptiva Critica
%
U50=[172.124 168.932 165.125 163.353 174.017 172.477 176.702 173.746];
%
% Grau do Polinomio
%
N=3;
%
% Determinação do Polinomio
%
p=polyfit(H,U50,N);
%
% Plotar Resultados
%
figure

% Definicao do Espaco de Plotagem H-, H+ e Npontos
Hi=linspace(6.5,20.4,100);

% Determinacao do Valor Calculado de U50%
U50c=polyval(p,Hi);
plot(H,U50,'k+',Hi,U50c,'b-'); % Plotagem
xlabel('Umidade Absoluta [g/m^3]'); % Titulo do Eixo "x"
ylabel('Tensao Disruptiva Critica[kV]'); % Titulo do Eixo "y"
%
% Calculo do Valor da Tensao Disruptiva Critica para Umidade de 11 g/m^3
%
U50H11=polyval(p,11) % Determinacao do Valor Calculado de U50%
%
coefc=p/U50H11 % Coeficientes do Polinomio Resultante
%
UC=U50/U50H11 % Normalização das Tensões Críticas
%
%
% FIM DA REGRESSÃO POLINOMIAL DE TERCEIRO GRAU
%

```

A resposta para esta rotina é a seguinte:

```

U50H11 = 168.1599
coefc = -0.0000 -0.0003 0.0143 0.8771
UC =
Columns 1 through 7
    1.0236    1.0046    0.9820    0.9714    1.0348    1.0257    1.0508
Column 8
    1.0332

```

Para o Arranjo Esfera-esfera – 20mm e polaridade positiva, por exemplo, os dados resultantes dos ensaios são os expostos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores de ensaios no conjunto Esfera-esfera 20mm polaridade positiva

ENSAIO	TEMPERATURA [°C]	PRESSÃO [mmHg]	UMIDADE ABSOLUTA [g/m ³]	TENSÃO DO ENSAIO U _{50%} [kV]
1	23,0	698,5	12,0	59,480
2	24,0	698,0	13,0	62,410
3	22,0	696,4	9,0	60,258
4	15,0	695,0	15,0	63,256
5	25,5	700,0	20,0	63,960
6	25,0	700,0	18,0	60,867
7	19,6	703,0	8,4	60,912
8	18,6	698,0	11,0	64,310
9	19,0	699,0	7,4	60,531
10	19,6	700,0	12,5	64,585
11	23,2	700,3	11,9	64,169
12	21,7	703,0	11,9	63,786
13	23,5	701,0	11,9	66,833
14	24,2	699,0	11,5	64,201
15	22,8	701,3	11,3	63,840
16	23,8	701,5	11,2	63,332
17	24,0	699,3	10,7	63,844
18	25,0	699,0	11,2	63,356
19	22,5	701,0	10,7	63,576
20	24,3	700,3	11,5	63,661
21	26,7	698,5	15,6	61,725
22	25,5	699,0	14,8	61,258
23	26,8	696,7	15,1	61,878
24	26,5	695,8	14,2	65,014
25	25,1	698,9	12,2	63,368
26	25,2	699,0	13,0	62,218
27	20,0	699,7	8,0	61,447

Feitas todas as considerações necessárias obtém-se a curva mostrada pela Figura 6.6 [2,7], onde o valor de *Tensão Disruptiva Crítica* para a *Umidade Absoluta* de 11 g/m³ de água, identificado por **x**, é 63.349 [kV]. Tendo isso em mãos, os valores de tensão obtidos em ensaio, que correspondem à quinta coluna da Tabela 6.1 são normalizados em relação ao valor para a umidade absoluta padrão encontrado, ou seja, 63.349 kV. Assim, os valores de tensão normalizados são os mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores normalizados em relação ao valor para 11 g/m^3 de água; Esfera-esfera 20mm polaridade positiva

ENSAIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TENSÃO	0,9398	0,9861	0,9521	0,9994	1,0106	0,9617	0,9624	1,0161	0,9564
ENSAIO	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TENSÃO	1,0204	1,0139	1,0078	1,0559	1,0144	1,0087	1,0006	1,0087	1,0010
ENSAIO	19	20	21	22	23	24	25	26	27
TENSÃO	1,0045	1,0058	0,9752	0,9679	0,9777	1,0272	1,0012	0,9830	0,9709

A Figura 6.6 mostra a curva levantada para o arranjo Esfera-esfera 20mm polaridade positiva:

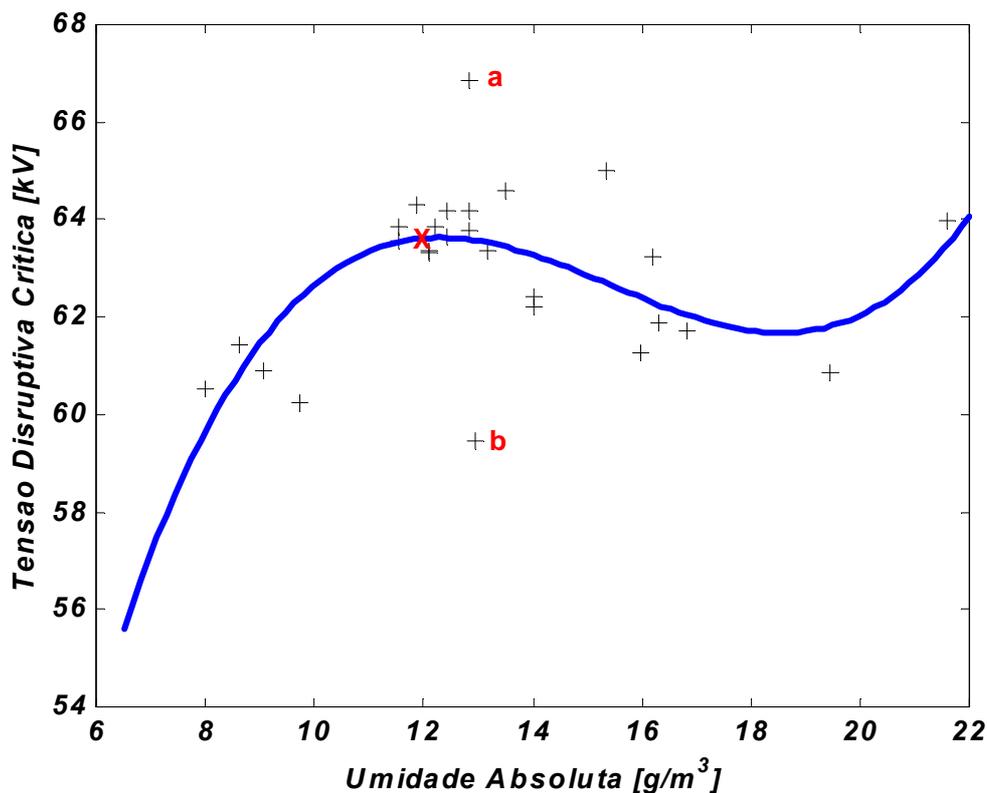


Figura 6.6 – Resultados de ensaios de eletrodos Esfera-Esfera 20mm – Impulso Positivo

Os pontos identificados como **a** e **b** representam dois valores com grande discrepância entre si, apesar de terem sido encontrados sob as mesmas condições atmosféricas. Após uma aferição do equipamento de ensaio foram realizados outros 5 ensaios sob as mesmas condições, que apesar de similares entre si ficaram bem distantes dos pontos **a** e **b**. Deste modo, conclui-se que os pontos **a** e **b** possuem um erro que pode ser atribuído à alguma anormalidade do equipamento ou de operação durante a execução do ensaio. Retirando-se os pontos **a** e **b** obtém-se a Figura 6.7 [2,7]. Nesta, o valor da *Tensão Disruptiva Crítica* para 11 g/m^3 é 63.390 [kV] . Casos similares a este são observados em outros conjuntos de ensaios, o que evidencia a importância de um elevado número de ensaios para a confirmação ou exclusão de pontos com grande afastamento da curva de tendência.

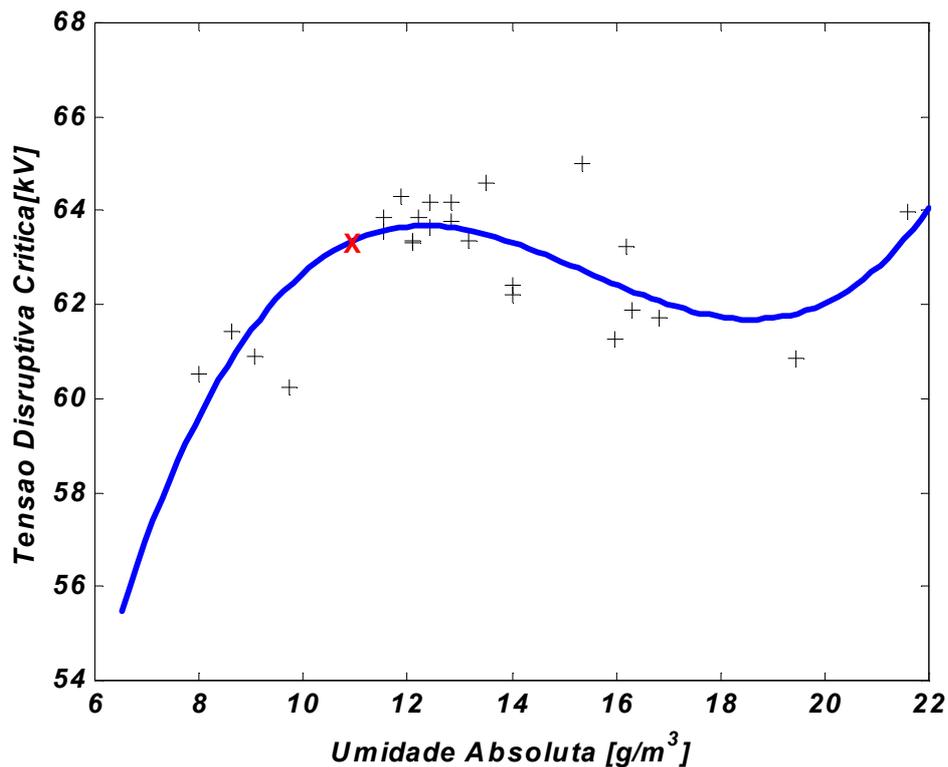


Figura 6.7 – Resultados de ensaios de eletrodos Esfera-Esfera 20mm – Impulso Positivo sem discrepância

A utilização de *Equações de Terceiro Grau* tem por objetivo refletir as inflexões observadas nos resultados de ensaio [2]. No entanto, como os resultados de ensaio apresentam um elevado grau de dispersão, isto pode introduzir uma forte dependência entre o modelo e os dados de entrada. Esta escolha permite obter uma curva de tendências aplicável ao modelo de *Tensão Disruptiva Crítica versus Umidade*. Até o momento, todos os dados obtidos totalizam algo em torno de 370 resultados de ensaio para cada polaridade.

A partir da massa de dados obtida com impulsos positivos e negativos, são traçadas as curvas de correção de umidade conforme mostra a Equação 6.10.

$$U_{50\%} = f(H) \quad (6.10)$$

Considerando um padrão de referência de:

$$H = 11 \text{g/m}^3$$

obtem-se a Equação 6.11

$$U_{50\%}(U=11 \text{g/m}^3) = f(11) \quad (6.11)$$

Deste modo é possível escrever a Equação 6.12:

$$\frac{U_{50\% \text{Ensaio}}}{U_{50\% (H=11g/m^3)}} = \frac{f(H)}{f(11)} \quad (6.12)$$

Logo:

$$U_{50\% (H=11g/m^3)} = U_{50\% \text{ensaio}} \frac{f(11)}{f(H)} \quad (6.13)$$

onde:

$$\frac{f(11)}{f(H)} = f_{CH} \quad (6.14)$$

o que resulta finalmente na Equação 6.15:

$$U_{50\% (H=11g/m^3)} = U_{50\% \text{ensaio}} \times f_{CH} \quad (6.15)$$

Deste modo, as curvas de tendências para todas as formas e distâncias entre eletrodos ensaiadas assumem o comportamento representado nas Figuras 6.8 e 6.9 [2-7]:

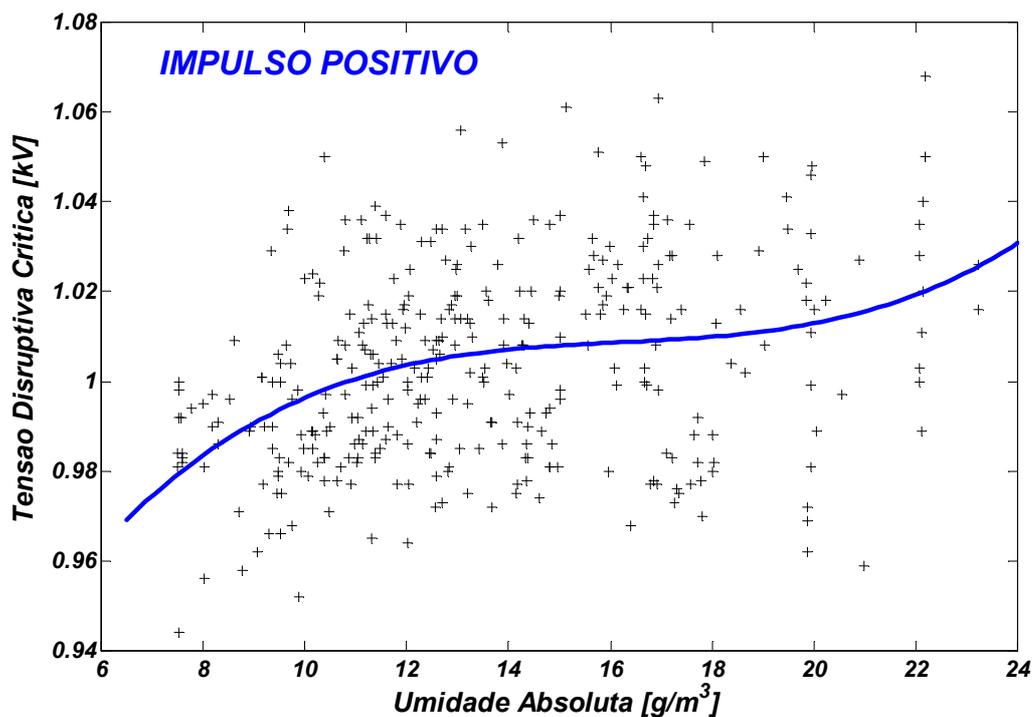


Figura 6.8 – Resultados de ensaios de Impulso Positivo

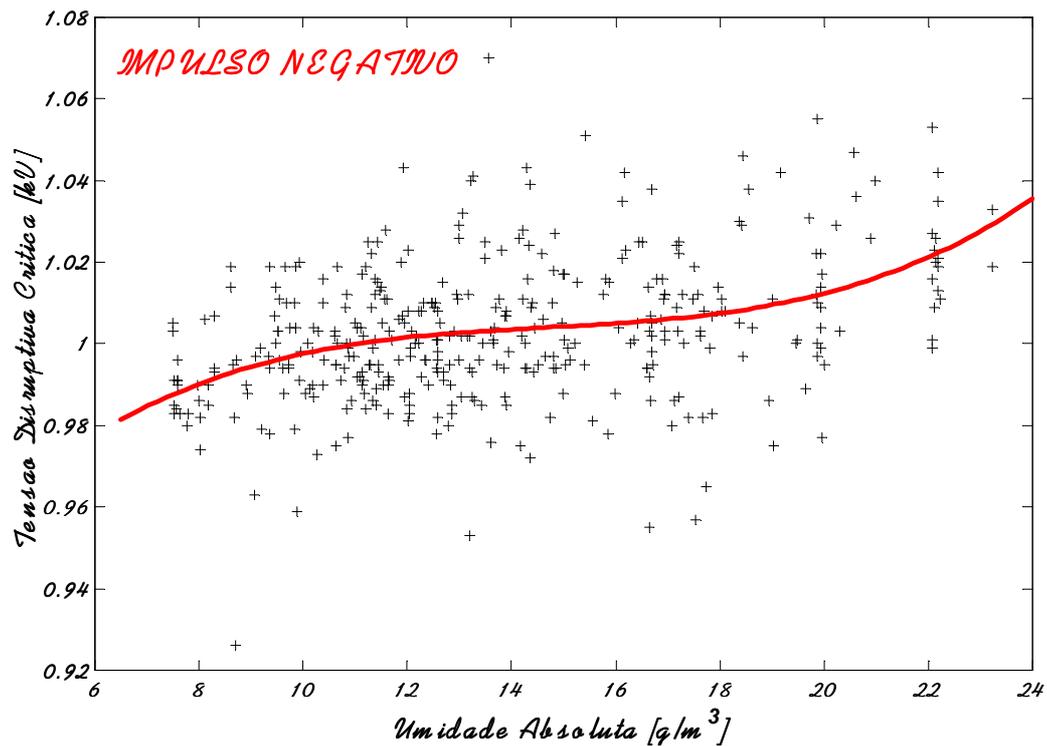


Figura 6.9 – Resultados de Ensaio de Impulso Negativo

Aplicando a Equação 6.15 obtém-se os *Fatores de Correção de Umidade Positivo e Negativo* conforme mostrado nas Figuras 6.10 a 6.12 [2-7].

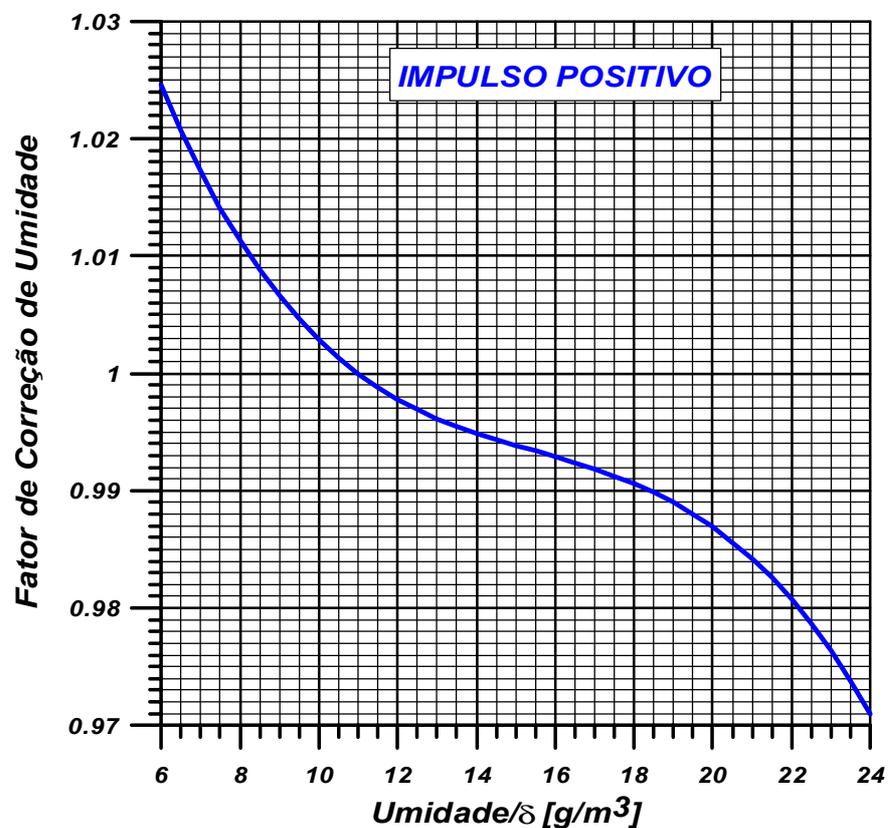


Figura 6.10 – Fator de Correção de Umidade Positivo

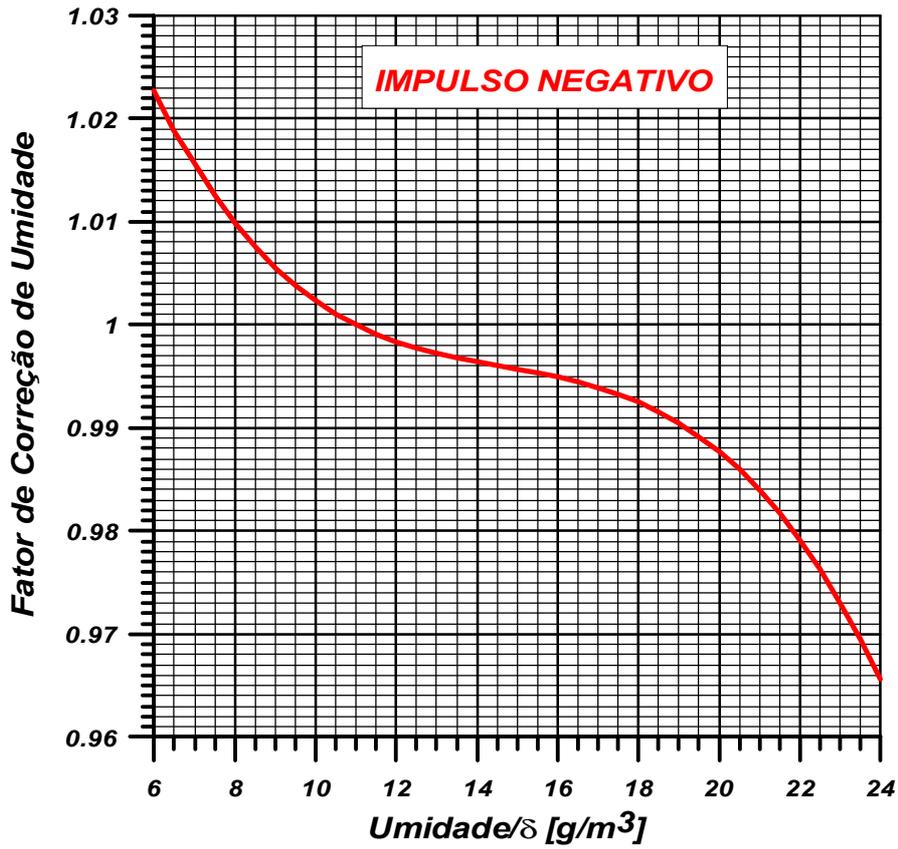


Figura 6.10 – Fator de Correção de Umidade Negativo

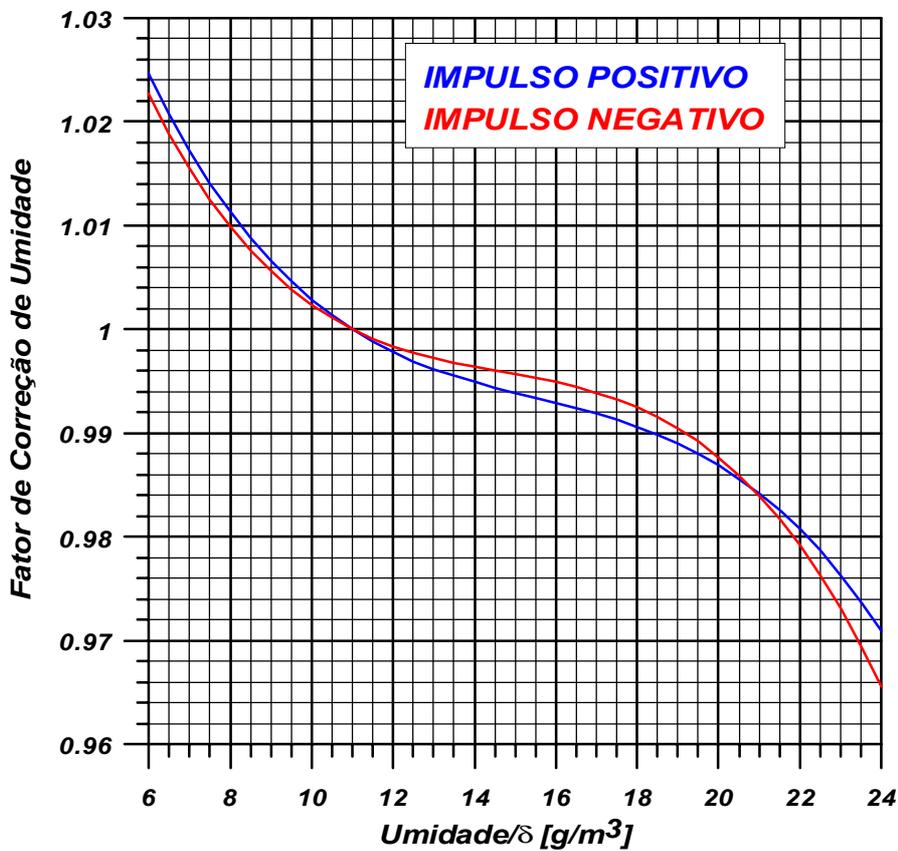


Figura 6.11 – Fatores de Correção de Umidade Positivo & Negativo

Foi observada uma pequena diferença de comportamento entre as duas polaridades, o que não é citado pelas Normas Internacionais. Do ponto de vista do pesquisador, seria conveniente o uso de um fator de correção para cada polaridade. Por outro lado, do ponto de vista do usuário, é conveniente utilizar um único fator de correção para ambas polaridades. Como os dois fatores foram levantados separadamente sua unificação consta da simples unificação dos dados.

6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6

1. NBR 6936/1992. – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão.
2. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests Applied to Small Air Gaps”; presented at VII SIPDA - 2003; Curitiba-PR Brazil
3. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at VI SIPDA - 2001; Santos-SP Brazil;
4. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at The IEEE - Pulsed Power Symposium 2001; London – United Kingdom;
5. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece.
6. C.de Salles and M.L.B.Martinez; “Improvements on a New Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” – ISH 2003, Delft – Holanda;
7. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations”, Powertech-2003 – Bologna-Itália;

7. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas a aplicação e a comparação do Método de Correção de Umidade Proposto e o Padrão Normalizado. Para tal são considerados alguns conjuntos de ensaios em configurações comerciais, como isoladores, espaçadores e chaves seccionadoras, bem como os próprios eletrodos básicos. O grau de eficiência de cada método é verificado através da comparação do desvio padrão do conjunto de resultados dos ensaios, sem qualquer correção, aplicando-se a correção proposta e a normalizada.

7.1 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NOS ELETRODOS ESFERA-ESFERA

A Tabela 7.1 mostra os resultados médios dos ensaios realizados nos eletrodos Esfera-esfera para distâncias entre eletrodos variando de 15 a 60 mm. O número mínimo de ensaios considerados foi de 18 ensaios para a distância 50mm. Para as demais distâncias o número de ensaios foi superior a 20, sendo que para as distâncias de 25mm e 40mm foram considerados 30 ensaios. Os resultados dos ensaios foram corrigidos em relação aos efeitos da umidade pelo método proposto pela IEC; e pelo desenvolvido neste trabalho, sendo que neste último foi considerado também o efeito da polaridade do impulso aplicado. Observando as colunas dos resultados obtidos e corrigidos pelo método proposto pela IEC, pode-se notar que o Fator de Correção conforme a IEC é unitário. Por outro lado, o método proposto neste trabalho corrigiu todos os resultados de ensaio e na maioria das vezes resultou em uma redução do desvio padrão. No entanto, em alguns casos como, por exemplo: 20mm negativa, 25mm positiva, 40mm positiva e negativa, houve um acréscimo do desvio padrão, o que aponta para um resultado negativo. É possível, ainda através dos valores mais reduzidos de desvio padrão, e das respectivas reduções percentuais, observar que o método proposto apresenta resultados mais consistentes para distâncias mais elevadas.

7.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NOS ELETRODOS HASTE-HASTE

De maneira similar à Tabela 7.1 para os eletrodos *Esfera-esfera*, a Tabela 7.2 mostra os resultados obtidos para os eletrodos *Haste-haste*. É possível observar, novamente, neste caso, uma alternância de melhores resultados entre o Método Proposto e a Correção da IEC que não corrigiu nenhum resultado de ensaio. A diferença entre valores de desvio padrão para um mesmo conjunto de ensaios algumas vezes se manifesta na segunda casa decimal podendo ser desprezada. A distância entre os eletrodos parece não influenciar de forma alguma os resultados das correções aplicadas, lembrando, é claro, que a IEC considera o valor do espaçamento em ar, e o Método Proposto é único para todas as distâncias.

Tabela 7.1 – Tensão Disruptiva Crítica dos eletrodos Esfera-esfera corrigida em função dos efeitos da umidade

DISTÂNCIA [mm]	VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
		ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
15	Valor Médio [kV]	49,83	49,83	49,57	46,99	46,99	46,40
	Desvio Padrão [kV]	2,00	2,00	1,96	2,64	2,64	2,43
	Desvio Padrão [%]	4,00	4,00	3,96	5,62	5,62	5,25
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	2,00		0,00	7,95
20	Valor Médio [kV]	62,90	62,90	62,66	60,59	60,59	59,95
	Desvio Padrão [kV]	1,68	1,68	1,57	1,95	1,95	2,06
	Desvio Padrão [%]	2,66	2,66	2,50	3,22	3,22	3,44
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	6,55		0,00	-5,64
25	Valor Médio [kV]	75,64	75,64	75,45	73,06	73,06	72,56
	Desvio Padrão [kV]	1,92	1,92	1,93	2,06	2,06	1,89
	Desvio Padrão [%]	2,54	2,54	2,56	2,81	2,81	2,60
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	0,00		0,00	8,25
30	Valor Médio [kV]	87,77	87,77	87,43	85,88	85,88	84,98
	Desvio Padrão [kV]	2,79	2,79	2,67	2,18	2,18	2,19
	Desvio Padrão [%]	3,18	3,18	3,06	2,54	2,54	2,57
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	4,30		0,00	0,00
35	Valor Médio [kV]	101,78	101,78	101,16	99,58	99,58	98,19
	Desvio Padrão [kV]	2,62	2,62	2,37	2,71	2,71	2,37
	Desvio Padrão [%]	2,57	2,57	2,34	2,73	2,73	2,41
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	9,54		0,00	12,5
40	Valor Médio [kV]	114,57	114,57	114,17	112,21	112,21	111,19
	Desvio Padrão [kV]	1,79	1,79	1,95	2,32	2,32	2,48
	Desvio Padrão [%]	1,56	1,56	1,71	2,07	2,07	2,23
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	-8,94		0,00	-6,89
45	Valor Médio [kV]	126,81	126,81	126,18	124,10	124,10	122,69
	Desvio Padrão [kV]	2,74	2,74	2,63	4,33	4,33	4,01
	Desvio Padrão [%]	2,16	2,16	2,08	3,49	3,49	3,26
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	4,01		0,00	7,39
50	Valor Médio [kV]	126,81	126,81	126,18	124,10	124,10	122,69
	Desvio Padrão [kV]	2,74	2,74	2,63	4,33	4,33	4,01
	Desvio Padrão [%]	2,16	2,16	2,08	3,49	3,49	3,26
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	4,01		0,00	7,39
55	Valor Médio [kV]	152,53	152,53	152,58	148,47	148,47	147,95
	Desvio Padrão [kV]	3,76	3,76	3,04	4,70	4,70	3,91
	Desvio Padrão [%]	2,47	2,47	2,00	3,17	3,17	2,64
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	19,15		0,00	16,78
60	Valor Médio [kV]	165,61	165,61	165,51	157,97	157,97	157,28
	Desvio Padrão [kV]	4,63	4,63	3,95	5,50	5,50	4,84
	Desvio Padrão [%]	2,80	2,80	2,38	3,48	3,48	3,08
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	14,68		0,00	12,00

A aplicação dos Métodos de Correção nos Eletrodos Básicos teve uma função apenas ilustrativa, uma vez que o interesse deste estudo reside na aplicação à resultados de ensaios em eletrodos e configurações reais e/ou comerciais utilizadas em média tensão.

As Tabelas 7.3 a 7.9 mostram a aplicação dos métodos de correção de umidade em eletrodos reais, entre eles o Sistema Spacer, no qual foi considerada ainda a presença de eletrodos flutuantes próximos ao conjunto submetido a ensaio.

Tabela 7.2 – Tensão Disruptiva Crítica dos eletrodos Haste-haste corrigida em função dos efeitos da umidade

DISTÂNCIA [mm]	VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
		ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
25	Valor Médio [kV]	41,63	41,63	41,43	39,04	39,04	38,84
	Desvio Padrão [kV]	1,49	1,49	1,54	0,73	0,73	0,68
	Desvio Padrão [%]	3,58	3,58	3,73	1,87	1,87	1,75
	Redução % do Desvio Padrão						
30	Valor Médio [kV]	48,47	48,47	48,28	44,61	44,61	44,43
	Desvio Padrão [kV]	1,21	1,21	1,17	1,37	1,37	1,31
	Desvio Padrão [%]	2,51	2,51	2,42	3,07	3,07	2,95
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	3,30		0,00	4,38
35	Valor Médio [kV]	54,52	54,52	54,21	48,95	48,95	48,67
	Desvio Padrão [kV]	1,26	1,26	1,18	1,93	1,93	1,98
	Desvio Padrão [%]	2,31	2,31	2,17	3,94	3,94	4,06
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	6,35		0,00	-2,59
40	Valor Médio [kV]	60,04	60,04	59,71	53,00	53,00	52,69
	Desvio Padrão [kV]	0,96	0,96	1,02	1,89	1,89	1,89
	Desvio Padrão [%]	1,60	1,60	1,71	3,58	3,58	3,59
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	-6,25		0,00	0,00
45	Valor Médio [kV]	64,27	64,27	64,01	56,76	56,76	56,48
	Desvio Padrão [kV]	1,66	1,66	1,64	1,67	1,67	1,84
	Desvio Padrão [%]	2,58	2,58	2,56	2,95	2,95	3,25
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	1,20		0,00	-10,18
50	Valor Médio [kV]	68,10	68,10	67,72	59,47	59,47	59,11
	Desvio Padrão [kV]	1,97	1,97	1,98	1,68	1,68	1,52
	Desvio Padrão [%]	2,89	2,89	2,93	2,82	2,82	2,58
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	-0,51		0,00	9,52
55	Valor Médio [kV]	71,94	71,94	71,55	62,75	62,75	62,39
	Desvio Padrão [kV]	2,64	2,64	2,23	1,95	1,95	1,78
	Desvio Padrão [%]	3,67	3,67	3,12	3,11	3,11	2,86
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	15,53		0,00	8,72
60	Valor Médio [kV]	75,12	75,12	74,87	65,52	65,52	65,22
	Desvio Padrão [kV]	2,14	2,14	1,88	1,97	1,97	1,93
	Desvio Padrão [%]	2,85	2,85	2,51	3,00	3,00	2,95
	Redução % do Desvio Padrão		0,00	12,15		0,00	2,03

7.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS AO SISTEMA SPACER

A Figura 7.1 mostra o Spacer, um sistema compacto de 4 condutores (*Fases A, B, C e Mensageiro*) construído em polietileno de alta densidade [1-7].

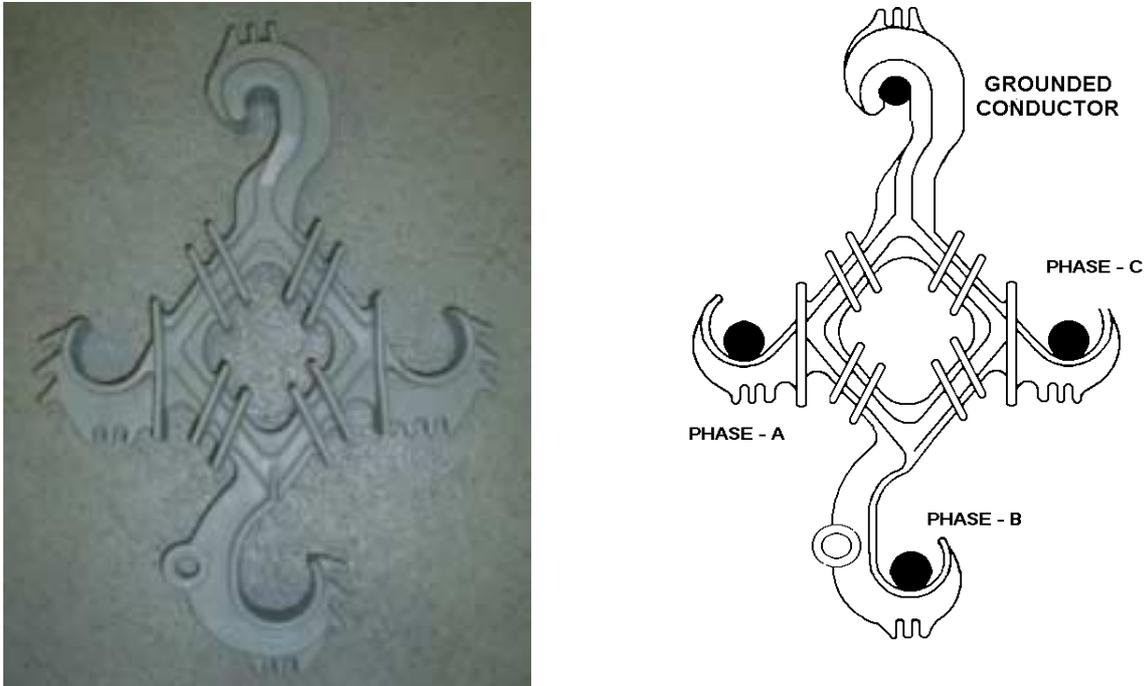


Figura 7.1 – Sistema Spacer

Nesta etapa foram consideradas duas modalidades de ensaios: *Com Eletrodos Flutuantes e Sem Eletrodos Flutuantes*; tais ensaios foram retirados de um estudo realizado no *Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá* visando observar a influência dos eletrodos flutuantes nos resultados dos ensaios de impulso atmosférico [1-3].

Define-se Eletrodos Flutuantes como sendo qualquer material condutor não aterrado próximo à área de formação de campo elétrico no exato momento da descarga. Eles podem ser os suportes de metal aos quais o sistema é fixo ou ainda, partes metálicas de equipamentos que usualmente não são aterrados. No caso do Sistema Spacer, foi dada ênfase a condutores paralelos. Como se observa, estes eletrodos modificam principalmente o desvio padrão usualmente recomendado para o resultado de tensão disruptiva crítica [1-7].

Os ensaios considerados sem eletrodos flutuantes implicam na energização das Fases A, B e C através do Gerador de Impulsos e do aterramento do Cabo Mensageiro. Já nos ensaios com eletrodos flutuantes o condutor da Fase A não se encontra energizado e/ou aterrado.

De acordo com a Tabela 7.3, que mostra os valores médios referentes aos resultados de 18 ensaios realizados em um Sistema Spacer Sem Eletrodos Flutuantes para a polaridade positiva, o valor médio obtido em ensaio foi 142,64 [kV], o desvio padrão do mesmo foi de 3,02 [kV], o

que representa 2,12% do valor médio. Corrigindo cada ensaio de acordo com a IEC o valor médio torna-se 142,12 [kV] com desvio padrão de 2,52 [kV] que representa 1,77% do valor médio; ou seja, houve uma redução de 16,55% no valor do desvio padrão. Aplicando a correção de umidade desenvolvida neste trabalho, o valor médio deste conjunto de ensaios fica em 142,24 [kV], com desvio padrão de 2,36 [kV], que representa 1,66% do valor médio; ou seja, o desvio padrão inicial de 3,02 [kV] ao assumir o valor de 2,36 [kV] sofreu uma redução de 21,85%.

Tabela 7.3 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para Sistema Spacer sem eletrodos flutuantes

SISTEMA SPACER SEM ELETRODOS FLUTUANTES						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	142,64	142,12	142,24	153,27	152,62	152,17
Desvio Padrão [kV]	3,02	2,52	2,36	2,06	1,53	1,19
Desvio Padrão [%]	2,12	1,77	1,66	1,35	1,00	0,78
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		16,55	21,85	- / -	25,73	42,23

Ao contrário do ocorrido com os *Eletrodos Básicos*, a *Correção Padrão pela IEC* foi aplicada a todos os resultados de ensaios, tanto para polaridade positiva quanto negativa, reduzindo, deste modo, o desvio padrão do conjunto de resultados. Nota-se ainda que o *Método Proposto* também foi aplicado a todos os resultados de ensaios, apresentando, no entanto, um desvio padrão ainda menor que o obtido pela IEC.

Considerando o *Sistema Spacer com Eletrodos Flutuantes*, conforme Tabela 7.4, a *Correção Padrão da IEC* também foi aplicada a todos os resultados de ensaios, reduzindo o valor do desvio padrão. Mais uma vez a redução do desvio padrão foi mais significativa aplicando-se o Método em estudo.

Tabela 7.4 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para o Sistema Spacer com eletrodos flutuantes

SISTEMA SPACER COM ELETRODOS FLUTUANTES						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	141,08	140,60	140,76	153,46	152,82	152,37
Desvio Padrão [kV]	2,80	2,30	2,02	2,07	1,58	1,31
Desvio Padrão [%]	1,98	1,63	1,43	1,35	1,03	0,86
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		17,86	27,86	- / -	23,67	36,71

7.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR DE PINO

A Figura 7.2 mostra uma fotografia do isolador de pino em porcelana Tipo PI33255, utilizado nos ensaios apresentados neste trabalho.



Figura 7.2 – Isolador de Pino PI33255

A Tabela 7.5 mostra os valores médios dos resultados de ensaio de impulso atmosférico a um Isolador de Pino Tipo – PI33255. As correções propostas pela IEC e pelo LAT foram aplicadas a todos os resultados de ensaios, apresentando uma certa redução no desvio padrão absoluto. No entanto, o desvio padrão percentual de ambas ficou idêntico para a polaridade positiva e praticamente idêntico para a negativa.

Tabela 7.5 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para o Isolador de Pino PI33255

ISOLADOR DE PINO PI33255						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	139,16	137,74	137,62	165,87	164,05	162,35
Desvio Padrão [kV]	3,95	3,81	3,82	2,89	2,78	2,73
Desvio Padrão [%]	2,84	2,77	2,77	1,74	1,69	1,68
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		3,54	3,29	- / -	3,80	5,5

7.5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NA CHAVE SECCIONADORA

A Figura 7.3 mostra uma fotografia da chave seccionadora utilizada nos ensaios apresentados neste trabalho.



Figura 7.3 – Chave Seccionadora

A aplicação das correções na Chave Seccionadora resultou, como pode ser observado na Tabela 7.6, em melhores resultados quando se aplica o Método Proposto pela IEC para a polaridade positiva ao mesmo tempo em que não foi aplicável para a polaridade negativa. No entanto, o Método Proposto pelo LAT apresentou melhores resultados para a polaridade negativa, reduzindo o valor do desvio padrão do conjunto de ensaios.

Tabela 7.6 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para Chave Seccionadora

CHAVE SECCIONADORA						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	97,61	96,75	96,62	155,11	155,11	152,13
Desvio Padrão [kV]	2,36	2,14	2,20	3,34	3,34	2,87
Desvio Padrão [%]	2,42	2,21	2,28	2,16	2,16	1,89
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		9,32	6,78	- / -	0,00	14,07

7.6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR DE SUSPENSÃO

A Figura 7.4 mostra o Isolador de Suspensão utilizado neste trabalho. O Isolador de Suspensão foi o único caso em que ambas correções consideradas apresentaram valores menos convenientes que os resultados dos ensaios quando isentos da aplicação de qualquer

correção relativa aos efeitos da umidade.



Figura 7.4 – Isolador de Suspensão

De maneira similar ao isolador de suspensão, outras configurações não ensaiadas no contexto deste trabalho podem ter seus resultados melhor representados quando não são levadas em consideração as correções para os efeitos da umidade. Este fato revela que não se pode afirmar que o *Fator de Correção de Umidade para os Ensaios de Impulso Atmosférico* em estudo é uma alternativa melhor que o *Método Recomendado pelas Normas Nacionais e Internacionais*, uma vez que, dentro do próprio ambiente de trabalho e desenvolvimento, já foi encontrado um caso de aplicação em que se torna aconselhável não corrigir os efeitos da umidade.

Tabela 7.7 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para um Isolador de Suspensão

ISOLADOR DE SUSPENSÃO						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	129,21	128,12	129,06	142,30	140,94	141,80
Desvio Padrão [kV]	1,06	3,57	1,70	2,79	4,37	3,35
Desvio Padrão [%]	0,82	2,79	1,31	1,96	3,10	2,36
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		-236,79	60,38	-/-	-56,63	-20,07

7.7 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR POLIMÉRICO

A Figura 7.5 mostra uma fotografia do isolador polimérico utilizado nos ensaios apresentados neste trabalho.



Figura 7.5 – Isolador Polimérico

A Tabela 7.8 mostra a aplicação das Correções de Umidade aos resultados de ensaios em um isolador polimérico. Nota-se que para a polaridade positiva a Correção Proposta pela IEC é a mais adequada. Em contrapartida para a polaridade negativa observa-se que o Método Proposto pelo LAT é o mais adequado.

Tabela 7.8 – Tensão Disruptiva Crítica Corrigida em Função dos Efeitos da Umidade para Isolador Polimérico

ISOLADOR POLIMÉRICO						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	ENSAIO	IEC	LAT	ENSAIO	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	179,05	177,33	177,15	201,11	198,94	196,91
Desvio Padrão [kV]	2,50	2,25	2,33	4,97	4,64	4,48
Desvio Padrão [%]	1,39	1,27	1,32	2,47	2,33	2,27
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		10,00	6,80	- / -	6,64	9,86

7.8 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM ISOLADOR PILAR

A Figura 7.6 mostra uma fotografia do isolador Pilar utilizado nos ensaios apresentados neste trabalho.



Figura 7.6 – Isolador Pilar

Para a polaridade positiva, a Tabela 7.9 aponta uma redução do desvio padrão para um valor praticamente idêntico para os dois métodos de correção aqui tratados. Por outro lado, observando-se a polaridade negativa é possível notar que o Método Proposto pela IEC não foi aplicável a nenhum resultado.

Tabela 7.9 – Tensão Disruptiva Crítica corrigida em função dos efeitos da umidade para Isolador Pilar

ISOLADOR PILAR						
VALORES	POLARIDADE POSITIVA			POLARIDADE NEGATIVA		
	Ensaio	IEC	LAT	Ensaio	IEC	LAT
Valor Médio [kV]	129,72	129,07	128,87	179,39	179,39	177,41
Desvio Padrão [kV]	4,66	4,25	4,23	3,75	3,75	2,71
Desvio Padrão [%]	3,59	3,29	3,28	2,09	2,09	1,53
Red. Perc. Desvio Padrão [%]		8,79	9,22	-/-	0,00	27,73

7.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 7

1. André Moroz, Credson de Salles, Elimar F. Gonçalves, Luís G. T. Faraco, Flávio E. Spressola, Manuel L.B. Martinez, “Influência dos Condutores – Eletrodos Flutuantes nos Resultados de Ensaios de Impulso Atmosférico”, III ENEAT – 2000 – Campina Grande;
2. Luiz G. Torteli Faraco, Elimar F. Gonçalves, André Moroz, Credson de Salles, Flávio E. Spressola, Manuel Luís Barreira Martinez; “The Existence of Floating Electrodes and the Results of Impulse Tests”; VIII DMMA – International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications – Setembro 2000 – Edimburgo, Escócia;
3. Luiz G. Torteli Faraco, Elimar F. Gonçalves, Credson de Salles, Manuel Luís Barreira Martinez; “The Correction of Humidity in Dielectric Strength Lightning Impulse Testing – Comments”; ISH-2001 – 12TH International Symposium on High Voltage Engineering – Agosto 2001 – Bangalore, Índia;
4. Faraco, L. G.; de Salles C.; et alli; “Application of a Method of Correction of Humidity Developed at EFEI-LAT to a Commercial Dielectric Configurations”; presented at ISH 2001; Bangalore – Índia;
5. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Application of a Method of Correction of Humidity, Developed at EFEI-LAT, to Commercial Dielectrics Configurations” presented at V Induscon – 2002 – Salvador – Brazil;
6. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece;
7. J.P.Pennacchi, C.de Salles, M.L.B.Martinez, “Correlation Between the New Developed Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” - ISH 2003, Delft – Holanda;

8. ANÁLISE DAS FORMAS DE CORRENTE DOS IMPULSOS

Quando dois eletrodos isolados em ar sofrem uma solitação elétrica, a presença de partículas carregadas no espaçamento entre eles proporciona o estabelecimento de um fluxo de corrente que pode ou não provocar ruptura do meio. Tendo em vista a aleatoriedade das ocorrências de ‘rupturas’ e ‘suportabilidades’ frente a impulsos atmosféricos, a observação do comportamento deste fluxo de corrente quando da aplicação de cada impulso pode vir a explicar os fatores que determinam o colapso do meio isolante.

8.1 FORMAS DE CORRENTE PARA OS ELETRODOS ESFERA-ESFERA

As Figuras 8.1 e 8.2 mostram os oscilogramas de corrente associados a dois impulsos positivos aplicados a Eletrodos Esfera-esfera resultantes em suportabilidade. Nestes casos é possível observar a existência de uma componente contínua na corrente de impulso que cruza a linha de zero em 2,0 [μs].

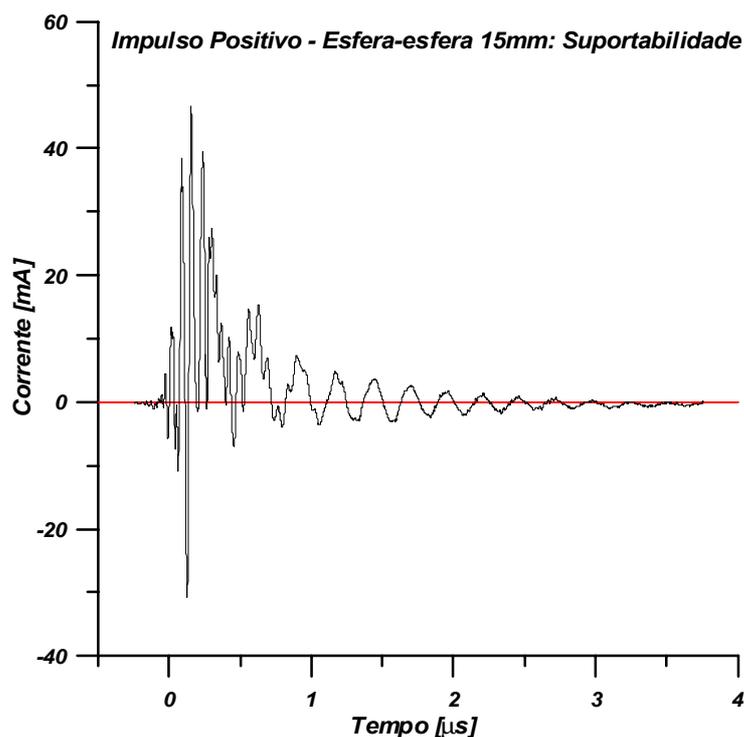


Figura 8.1 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm

A principal diferença para as distâncias é que no caso do espaçamento de 15mm, o amortecimento da componente contínua é mais pronunciado. Isto, porém não é uma regra geral, uma vez que durante os ensaios, para um afastamento de 15mm, foram observados amortecimentos similares aos verificados para a distância de 60mm. No entanto, não se observou reciprocidade, o que pode, para pequenas distâncias, retratar influência de cargas espaciais, irregularidades superficiais, depósitos de poluentes.

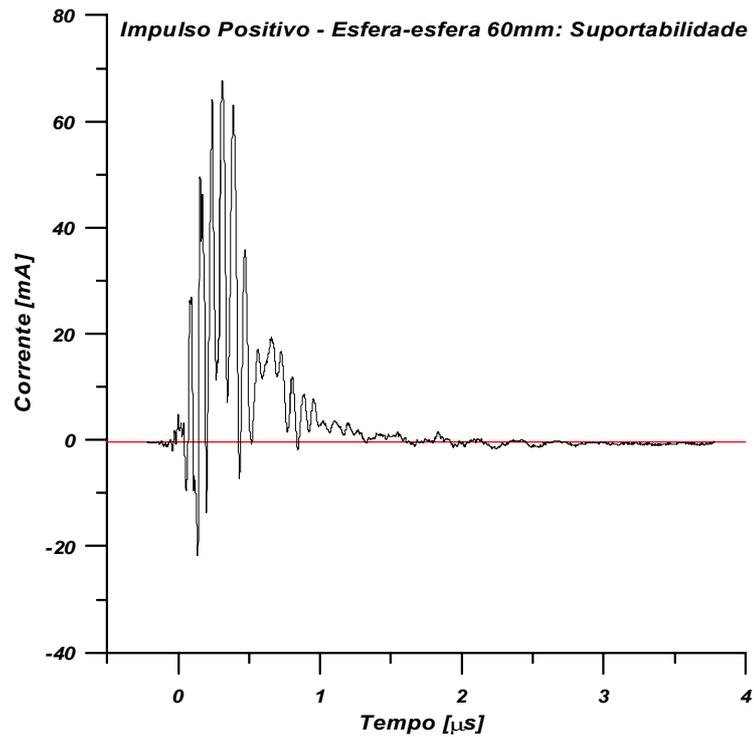


Figura 8.2 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm

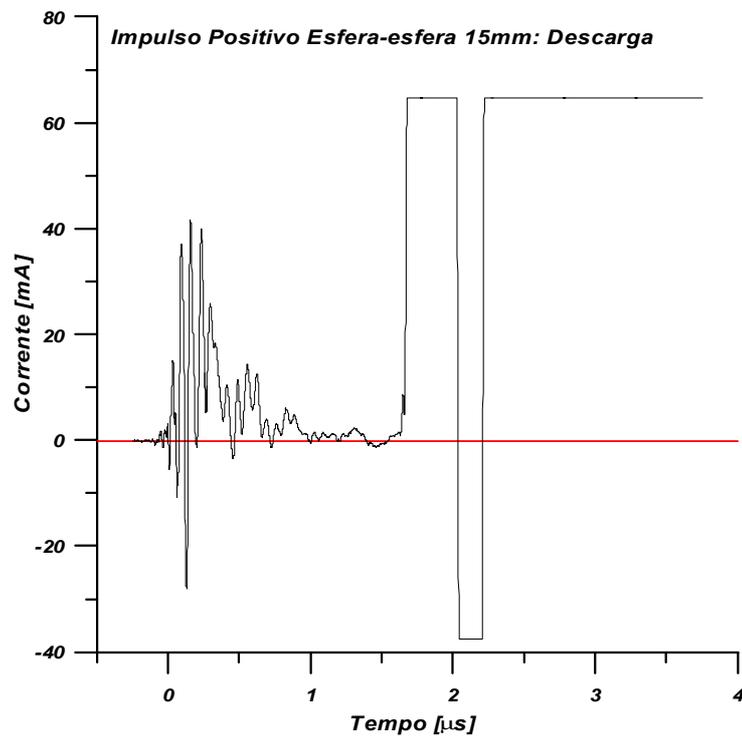


Figura 8.3 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm

As Figuras 8.3 e 8.4 mostram duas descargas positivas para os eletrodos Esfera-esfera com um espaçamento de 15mm.

Em ambos os casos é possível observar que a componente contínua da corrente se manteve

acima do zero até algo em torno de 1,7 $[\mu\text{s}]$. No caso do oscilograma da Figura 8.3, o isolamento em ar entrou em colapso na presença da componente contínua da corrente. Já no oscilograma da Figura 8.4, a ruptura ocorreu um pouco mais tarde, em torno de 3,3 $[\mu\text{s}]$, quando a polaridade da corrente já havia se invertido, porém esta inversão aconteceu após 1,7 $[\mu\text{s}]$.

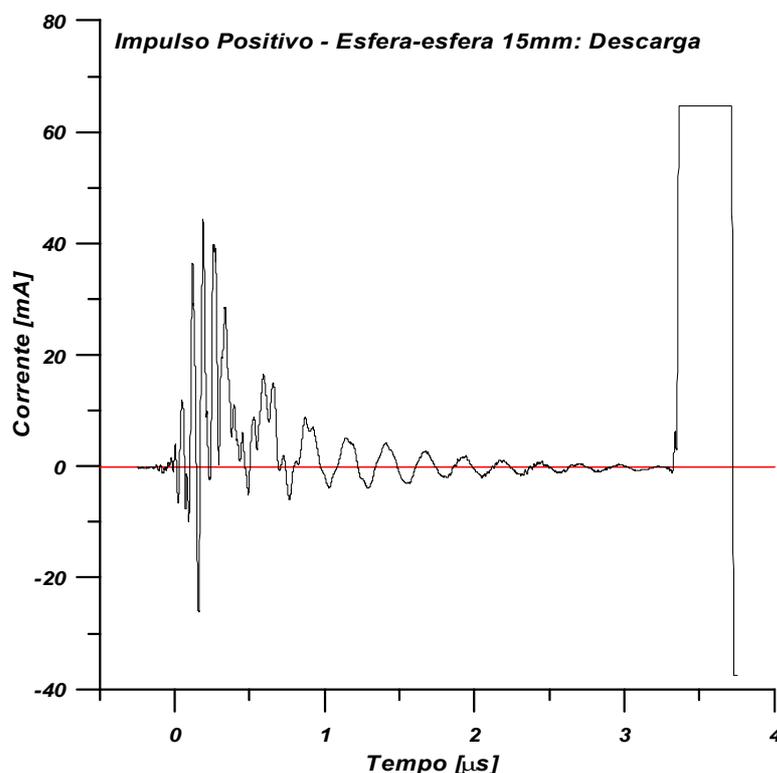


Figura 8.4 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm

As Figuras 8.5 e 8.6 mostram duas descargas positivas para os eletrodos Esfera-esfera com 60mm de espaçamento. De forma similar aos oscilogramas para o espaçamento de 15mm, estes mostram uma componente contínua que permanece acima do zero de corrente até 1,7 $[\mu\text{s}]$. O oscilograma da Figura 8.5 apresenta colapso do isolamento em ar pouco após 1,7 $[\mu\text{s}]$. Quanto ao oscilograma da Figura 8.6, a corrente tangencia a linha do zero em aproximadamente 1,7 $[\mu\text{s}]$ sem, no entanto inverter a polaridade, e a descarga que ocorre em torno de 2,5 $[\mu\text{s}]$.

De acordo com os oscilogramas até aqui ilustrados, a corrente associada ao impulso possui uma componente contínua cujo comportamento define a suportabilidade ou descarga frente ao impulso aplicado. Conforme sugerido, se a componente contínua da corrente não inverter sua polaridade em um período da ordem de 1,7 $[\mu\text{s}]$, o impulso resulta em descarga. No que diz respeito ao espaçamento entre eletrodos, a única diferença está na ultrapassagem da linha do zero de maneira mais contundente, antes de 1,0 $[\mu\text{s}]$ para distâncias mais reduzidas.

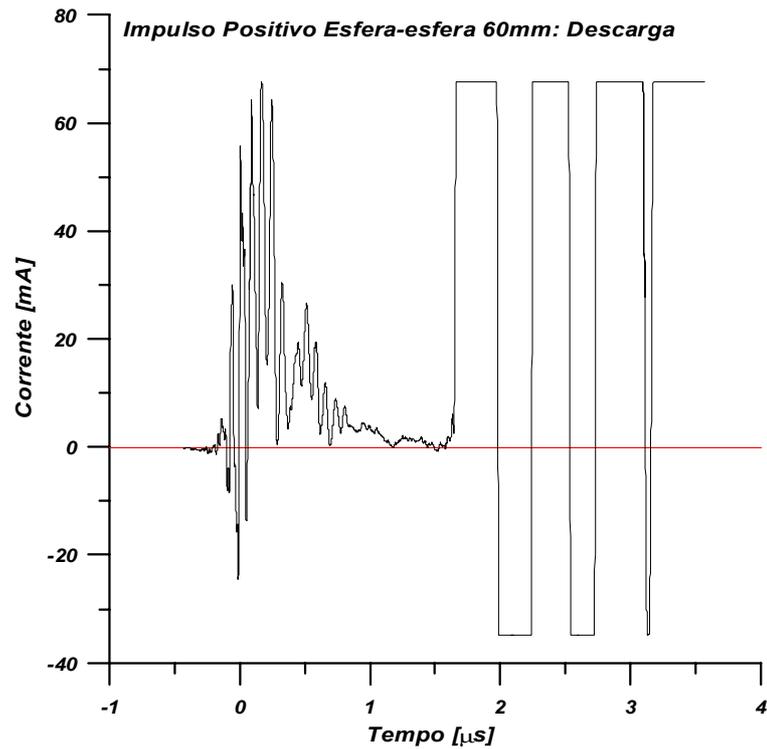


Figura 8.5 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm

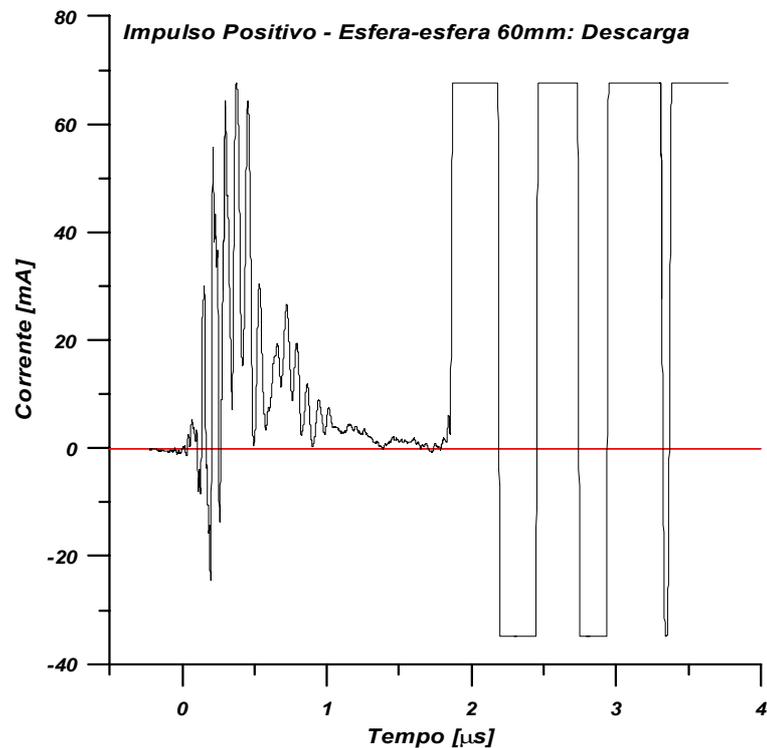


Figura 8.6 – Descarga Positiva em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm

As Figuras 8.7 e 8.8 mostram dois impulsos negativos aplicados aos eletrodos Esfera-esfera que resultaram em suportabilidade. Nestes dois oscilogramas é possível notar que a inversão de polaridade da componente contínua corrente ocorre em torno de 1,7 μs .

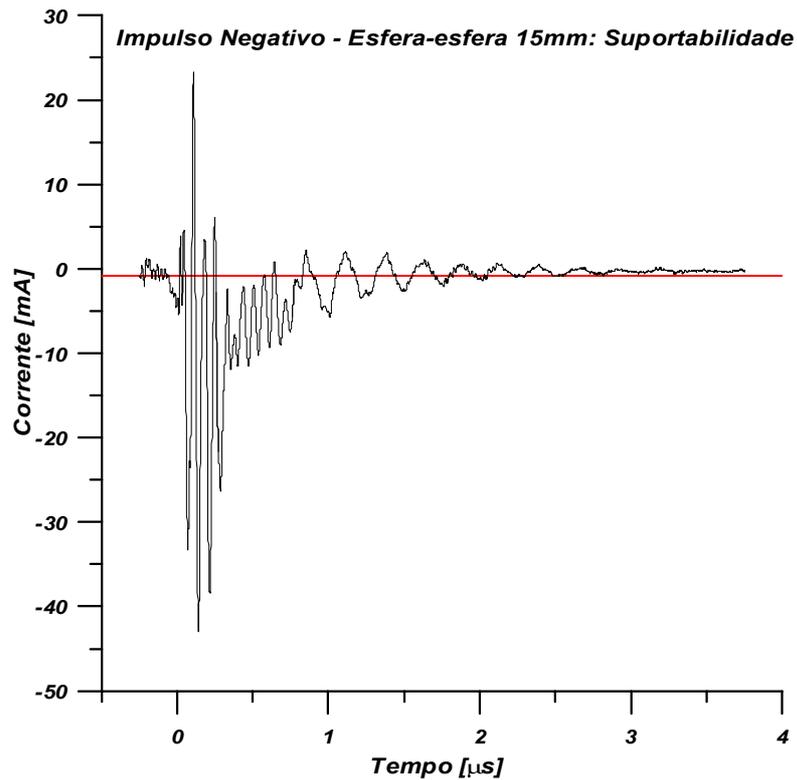


Figura 8.7 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm

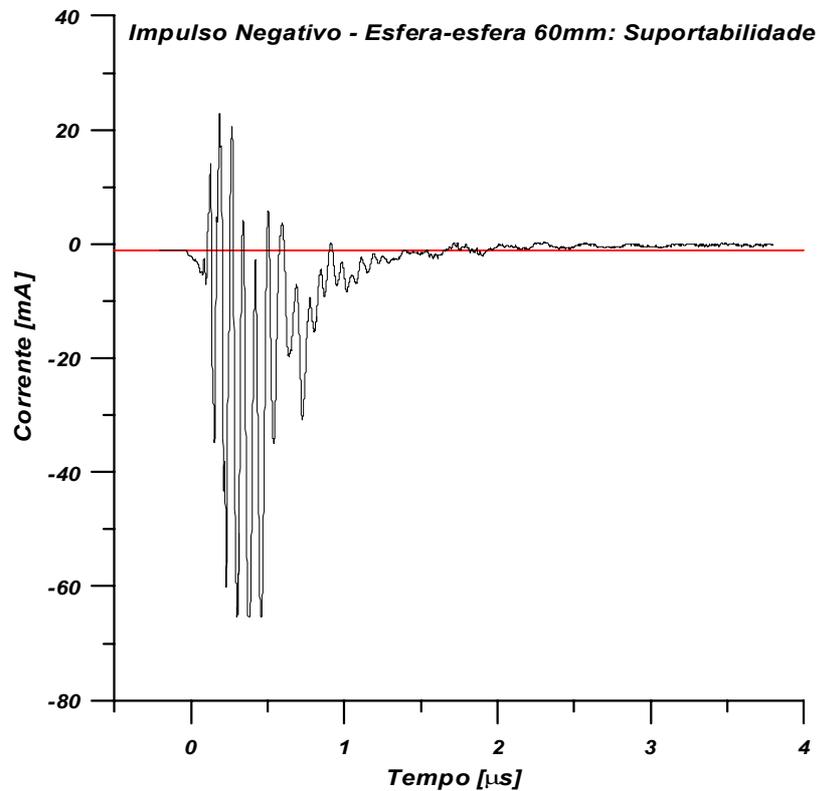


Figura 8.8 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm

Como na polaridade positiva, a curva para o espaçamento de 15mm apresentou amortecimento mais pronunciado que a curva do espaçamento de 60mm.

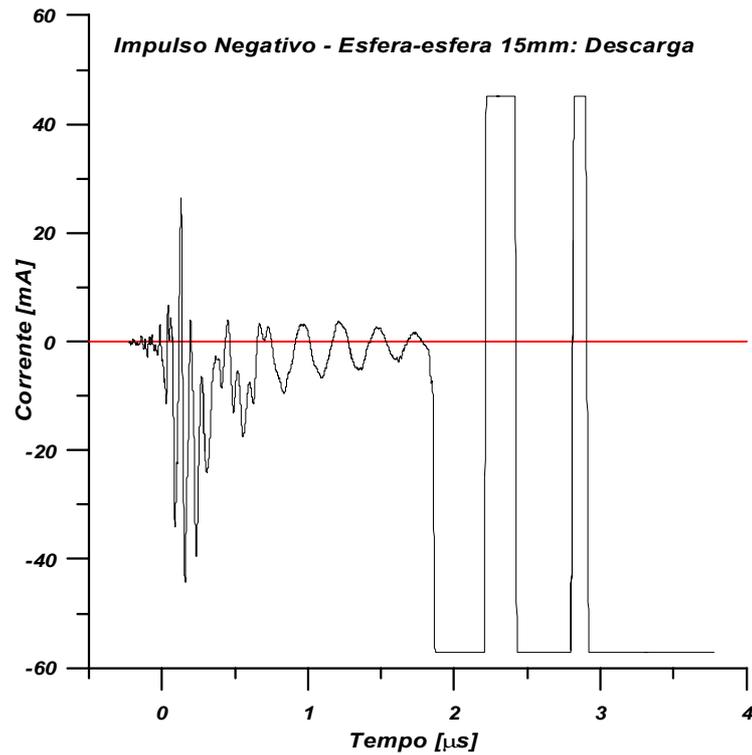


Figura 8.9 – Descarga Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 15mm

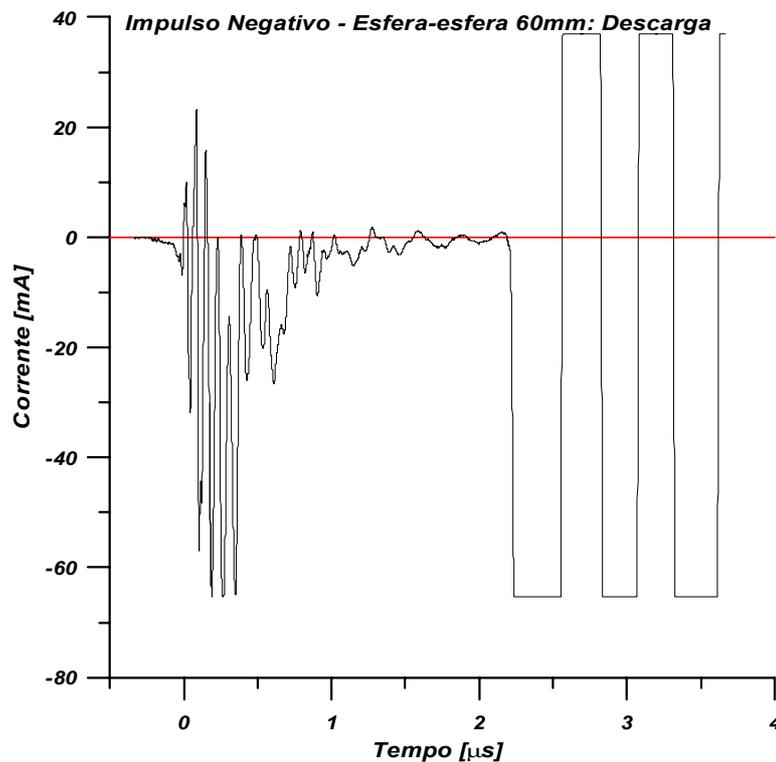


Figura 8.10 – Descarga Negativa em Eletrodos Esfera-esfera – 60mm

As Figuras 8.9 e 8.10 ilustram dois impulsos negativos aplicados ao conjunto Esfera-esfera resultantes em descarga. De forma semelhante aos impulsos positivos, a componente contínua da corrente esteve presente até próximo de 1,5 [μ s] e houve ruptura do isolamento em ar.

8.2 FORMAS DE CORRENTE PARA OS ELETRODOS HASTE-HASTE

As Figuras 8.11 e 8.12 mostram dois impulsos positivos aplicados ao conjunto Haste-haste com 25mm e 55mm de espaçamento, ambos resultantes em suportabilidade.

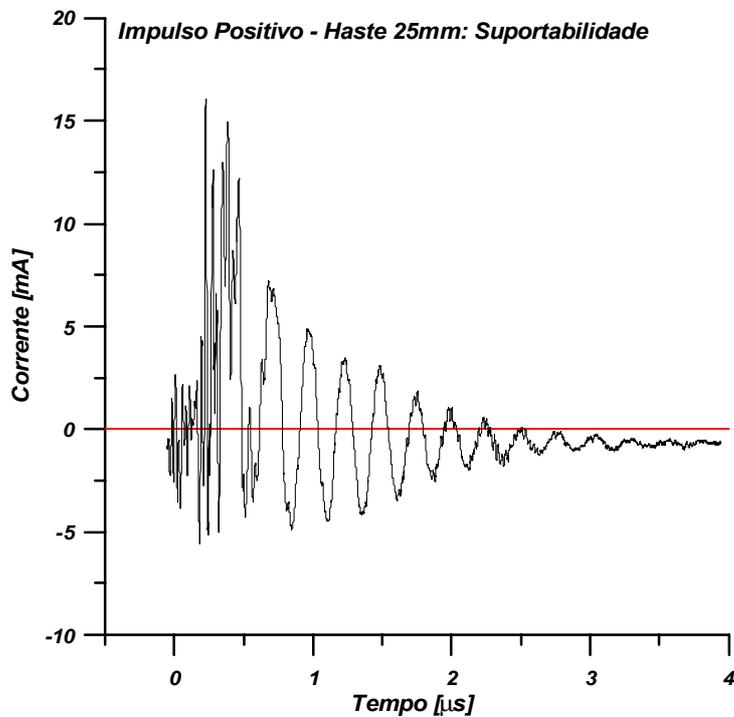


Figura 8.11 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Haste-haste – 25mm

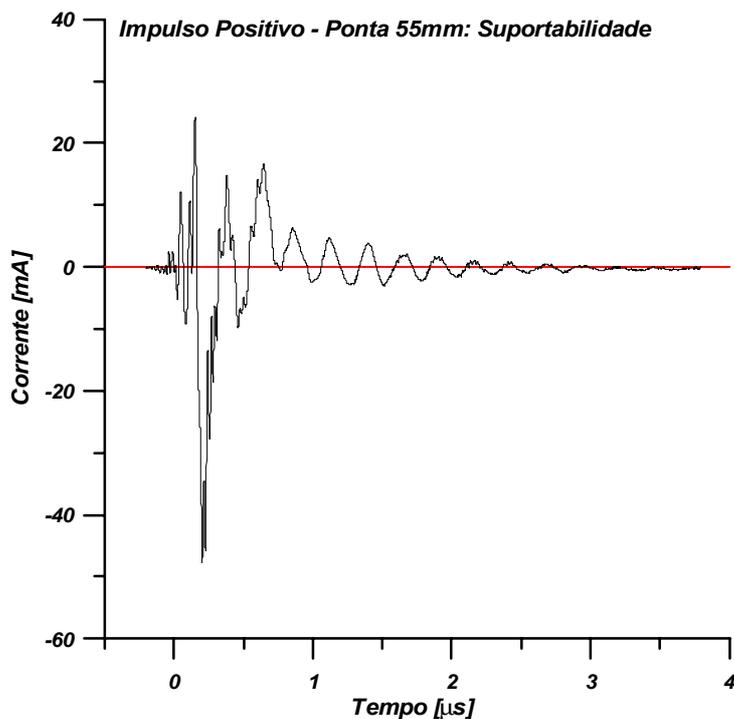


Figura 8.12 – Suportabilidade Positiva em Eletrodos Haste-haste – 55mm

A Figura 8.11 mostra a existência de uma componente contínua da corrente de impulso que parece inverter a polaridade em torno de 1,5 μs , ou seja, em um espaço de tempo mais curto que no caso dos Eletrodos Esfera-esfera. A Figura 8.12 também apresenta uma componente contínua, com inversão de polaridade em torno de 1,5 μs . A diferença entre estes dois espaçamentos reside apenas no amortecimento do processo oscilatório mais pronunciado do impulso aplicado ao espaçamento de 55mm entre os eletrodos.

As Figuras 8.13, 8.14 e 8.15 mostram impulsos positivos aplicados aos eletrodos Haste-haste com espaçamentos de 25mm, 60mm e 55mm respectivamente.

A Figura 8.13 mostra que a componente contínua tangencia a linha do zero de corrente em torno de 1,7 μs , sem, no entanto inverter a polaridade. Com aproximadamente 1,0 μs , quando aparentava estar entrando em amortecimento, repentinamente, o fluxo de corrente sofre um salto, como se, neste momento, fosse acontecer uma ruptura do ar, e torna a baixar seu valor até que, em torno de 2,0 μs o fluxo de corrente novamente tem o seu valor rapidamente aumentado, e acontece a descarga. Este comportamento não é um pré-requisito para que aconteça uma descarga nos eletrodos Haste-haste, no entanto toda vez que ocorre resulta em descarga.

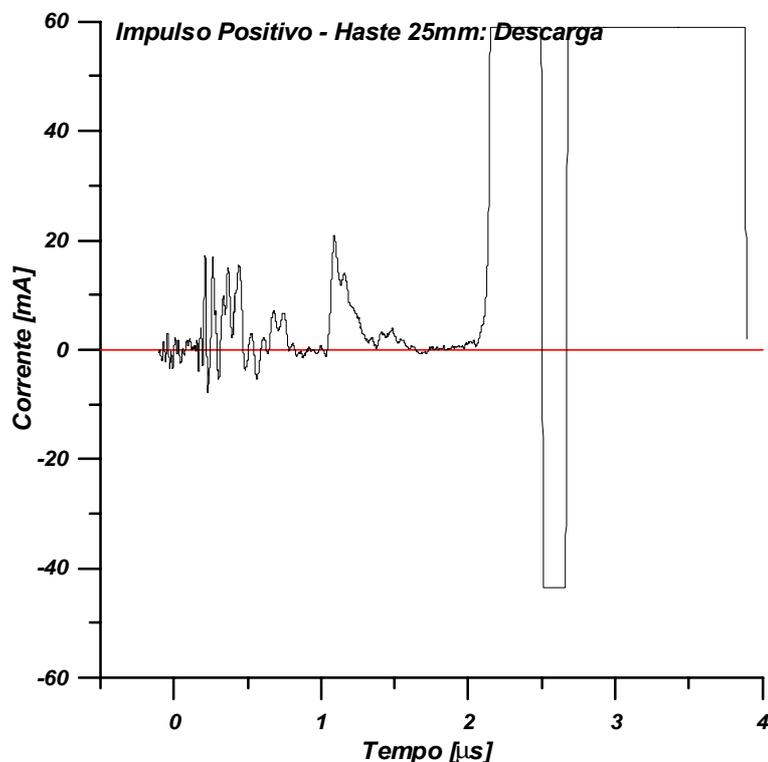


Figura 8.13 – Descarga Positiva em Eletrodos Haste-haste – 25mm

O oscilograma da Figura 8.14 mostra um comportamento análogo ao observado para os Eletrodos Esfera-esfera, onde a componente contínua da corrente de descarga não passa pelo

zero e, diferente do espaçamento de 25mm, quando o valor do fluxo de corrente aumentou repentinamente, resultou em falha do isolamento em ar.

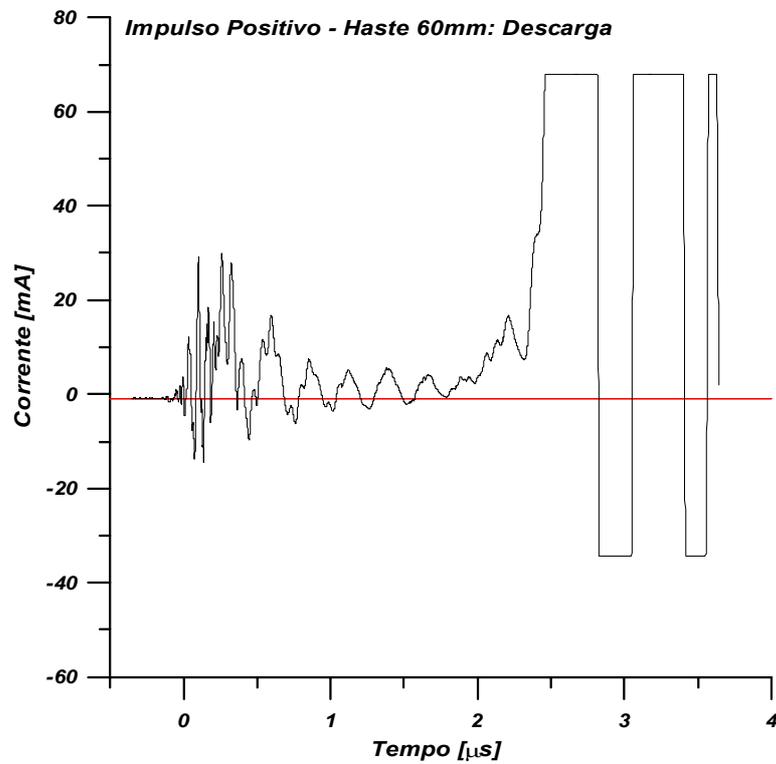


Figura 8.14 – Descarga Positiva em Eletrodos Haste-haste – 60mm

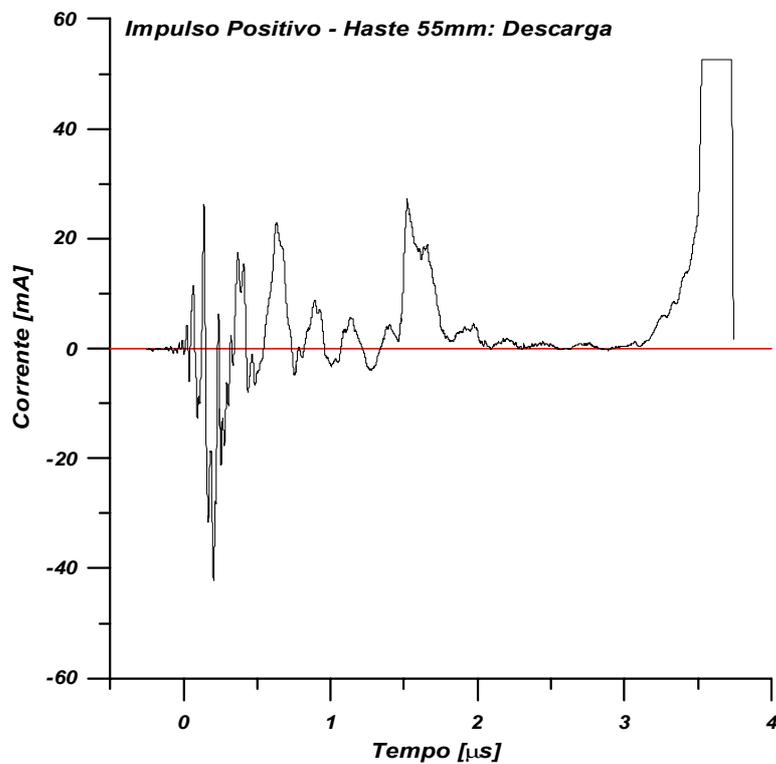


Figura 8.15 – Descarga Positiva em Eletrodos Haste-haste – 55mm

Na Figura 8.15, quando a componente contínua da corrente aparentava estar sendo extinto em torno de 1,5 μs , também sofreu um repentino aumento em seu valor voltando a se aproximar da linha do zero sendo que a ruptura aconteceu em torno de 3,5 μs .

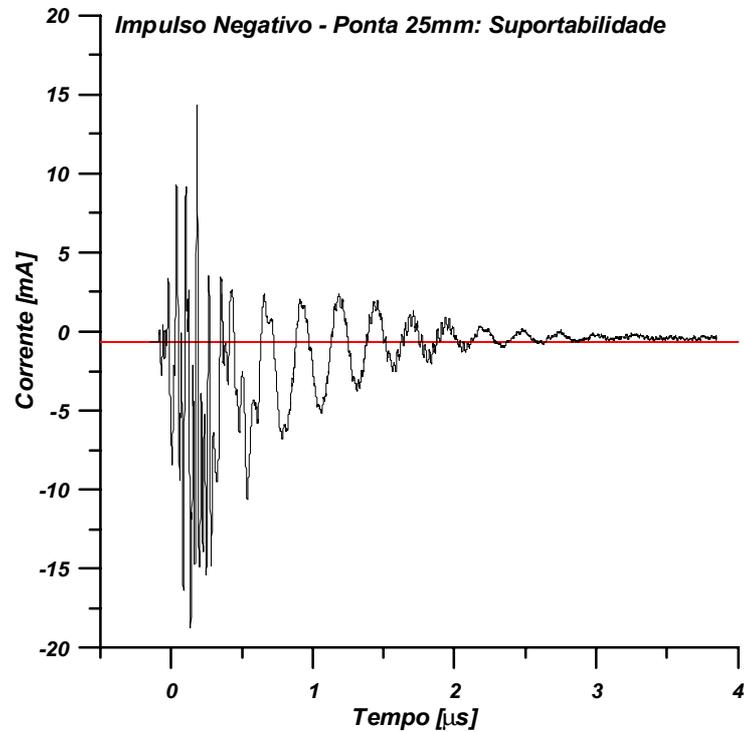


Figura 8.16 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Haste-haste – 25mm

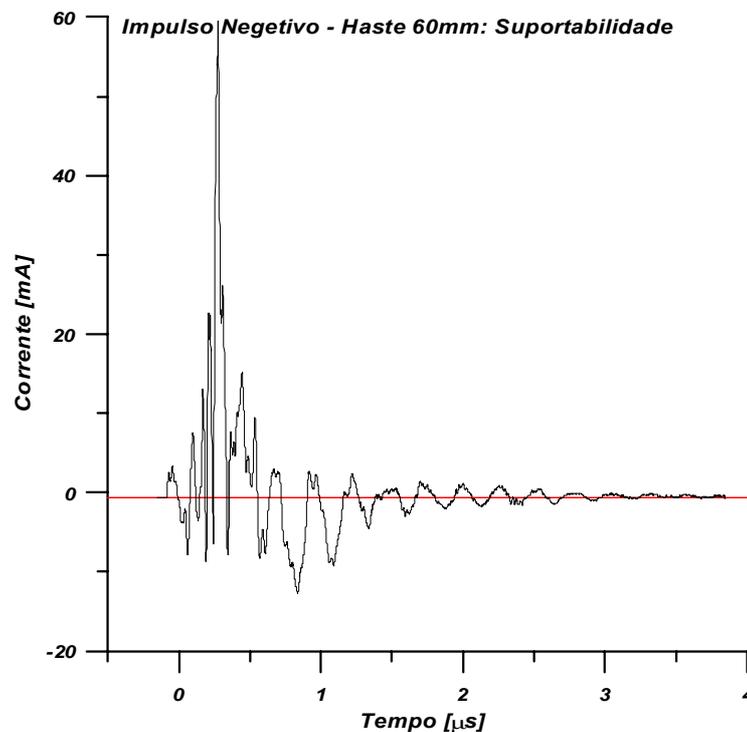


Figura 8.17 – Suportabilidade Negativa em Eletrodos Haste-haste – 60mm

As Figuras 8.16 e 8.17 mostram dois impulsos negativos, resultantes em suportabilidade, aplicados aos eletrodos Haste-haste com espaçamentos de 25mm e 60mm respectivamente. Apesar do amortecimento mais pronunciado no oscilograma da Figura 8.16, a inversão de polaridade, para estes dois casos, ocorreu em torno de 2,0 μs .

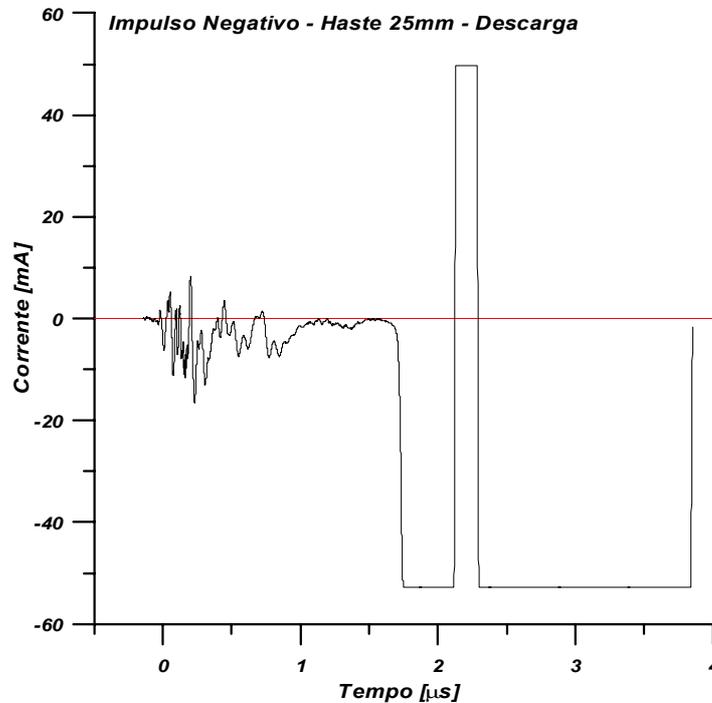


Figura 8.18 – Descarga Negativa em Eletrodos Haste-haste – 25mm

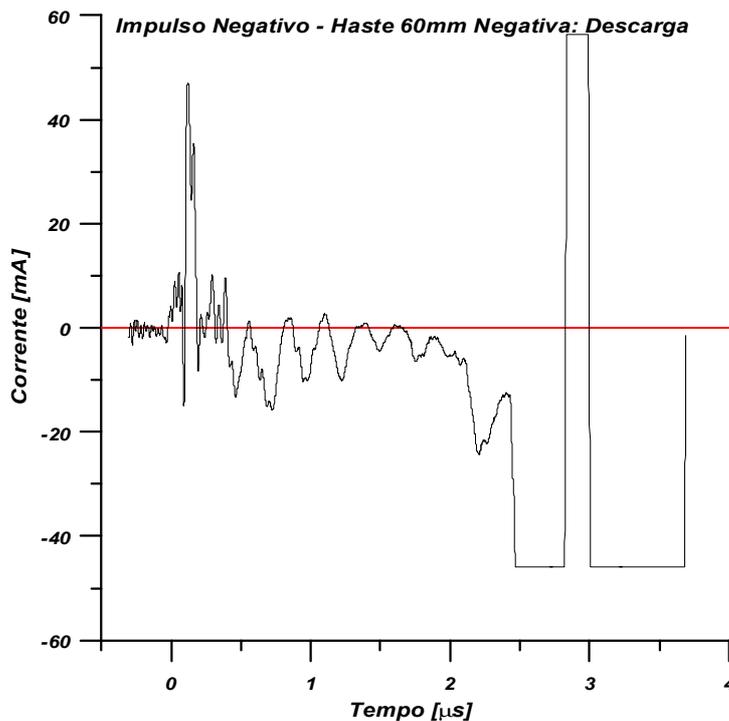


Figura 8.19 – Descarga Negativa em Eletrodos Haste-haste – 60mm

As Figuras 8.18 e 8.19 mostram dois impulsos negativos aplicados aos eletrodos Haste-haste, resultantes em descarga.

No oscilograma da Figura 8.19 a componente da corrente de impulso não inverteu a polaridade antes de 2,0 μs e houve descarga. Por outro lado, Na Figura 8.18 a ruptura do isolamento em ar aconteceu em um intervalo de tempo inferior a este valor. A explicação deste fato está na forma como a corrente de impulso se comportou, ou seja, não passou pela linha do zero de maneira contundente, apenas a tangenciou. De qualquer forma, a componente contínua não chegou nem mesmo a esboçar uma inversão de polaridade.

8.3 FORMAS DE CORRENTE PARA UM SISTEMA SPACER

A Figura 8.20 mostra o oscilograma de um impulso positivo aplicado ao Sistema Spacer resultante em suportabilidade. De forma similar aos eletrodos básicos, existe uma componente contínua da corrente de impulso que, em algum instante, inverte sua polaridade. Esta inversão parece ocorrer em torno de 2,5 μs .

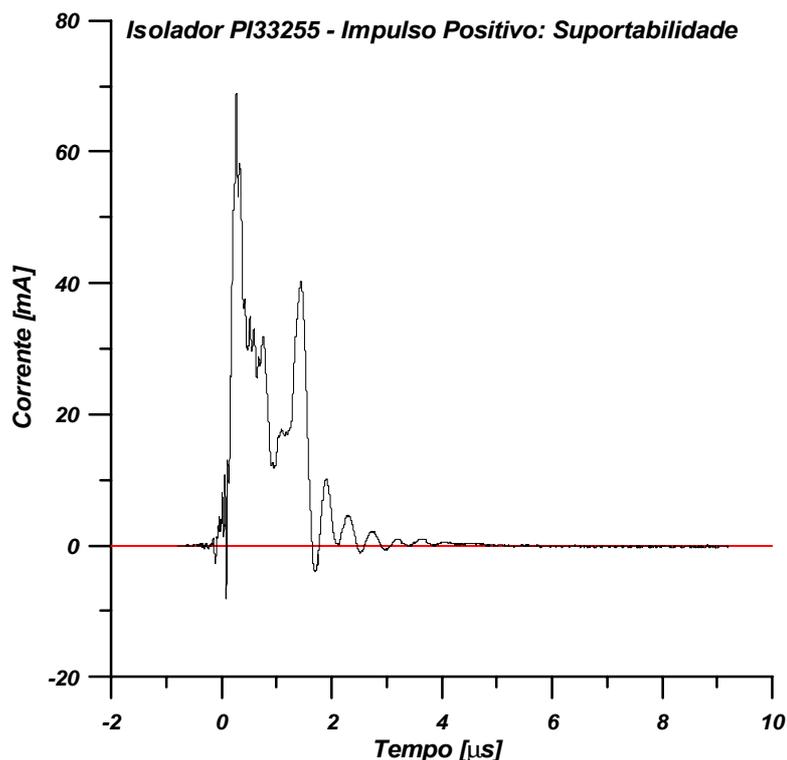


Figura 8.20 – Suportabilidade Positiva no Sistema Spacer

A Figura 8.21 mostra o oscilograma de uma ruptura do isolamento em ar sob a aplicação de um impulso positivo ao Sistema Spacer. Em momento algum a corrente do impulso tangencia a linha do zero de corrente. O maior tempo para a ocorrência de ruptura se deve à maior distância entre os eletrodos separados pelo Spacer, o que pode refletir a influência da

presença de cargas espaciais, onde o processo de ionização esteve sempre maior que o de recombinação, tornando o ar, gradativamente mais condutor.

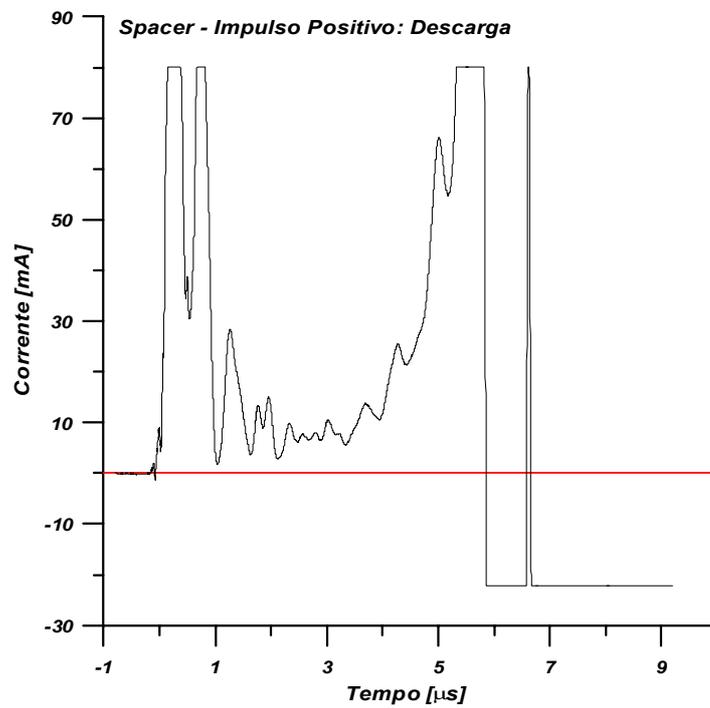


Figura 8.21 – Descarga Positiva no Sistema Spacer

As Figuras 8.22 e 8.23 mostram os oscilogramas de dois impulsos negativos aplicados ao Sistema Spacer.

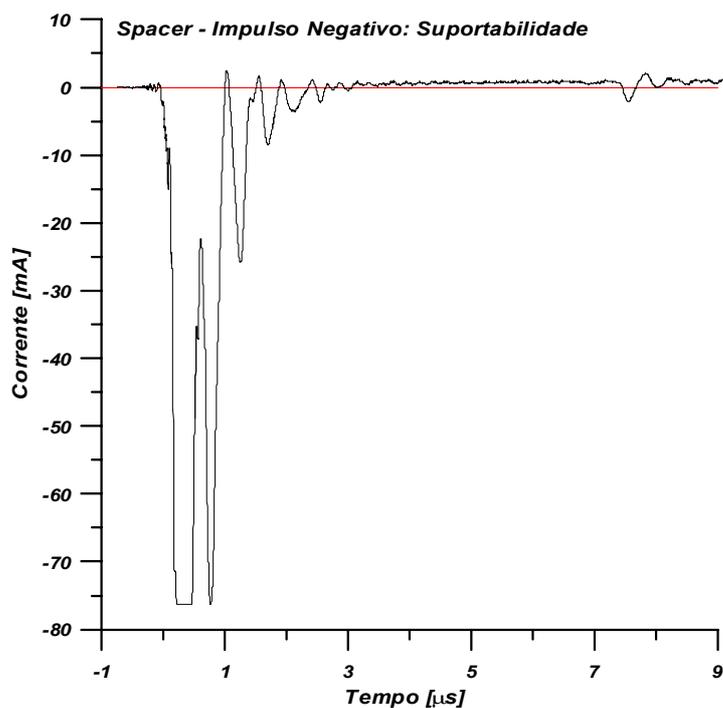


Figura 8.22 – Suportabilidade Negativa no Sistema Spacer

Comparando os oscilogramas de suportabilidades positiva e negativa, Figuras 8.20 e 8.22, é possível notar uma similaridade quanto ao tempo para inversão de polaridade da componente contínua da corrente de impulso, em torno de 2,0 [μs].

A Figura 8.23 mostra o oscilograma de um impulso negativo aplicado ao Sistema Spacer resultante em descarga. É possível observar uma certa similaridade como o correspondente positivo. A única diferença é que não foi observado em nenhum caso da polaridade negativa, o não-tangenciamento da corrente de impulso na linha do valor zero. Por outro lado, seguindo o típico de um impulso resultante em descarga, a componente contínua da corrente não inverteu sua polaridade.

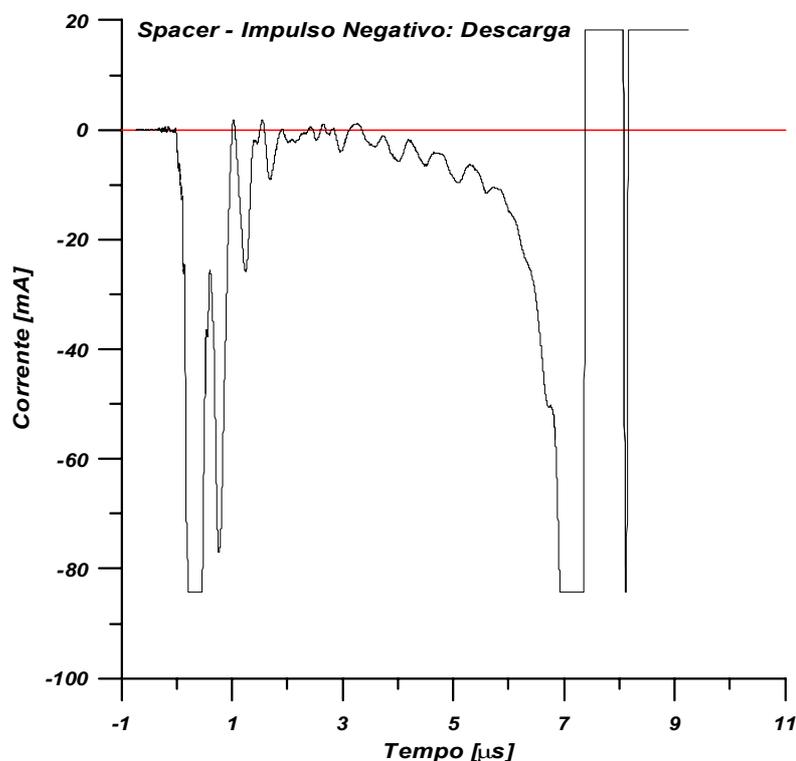


Figura 8.23 – Descarga Negativa no Sistema Spacer

8.3 FORMAS DE CORRENTE PARA O ISOLADOR DE PINO PI33255

A Figura 8.24 mostra o oscilograma de um impulso positivo, aplicado ao Isolador de Pino PI33255. A componente contínua da corrente do impulso inverte sua polaridade por volta de 5,0 [μs], e o resultado é a suportabilidade do isolamento em ar. Durante o mesmo intervalo no oscilograma da Figura 8.25, a componente contínua da corrente de impulso nem ao menos esboça uma inversão de polaridade e começa a ter o seu valor aumentado em torno de 4,0 [μs], até o ponto em que, devido ao elevado grau de ionização estabelecido, o ar se torna altamente condutor e ocorre a ruptura.

A Figura 8.26 mostra o oscilograma de um impulso negativo aplicado ao Isolador PI33255

resultante em suportabilidade. Observa-se que a componente contínua tem um tempo de amortecimento similar ao correspondente positivo. O oscilograma da Figura 8.27 mostra a descarga resultante da aplicação de um impulso negativo ao isolador PI33255.

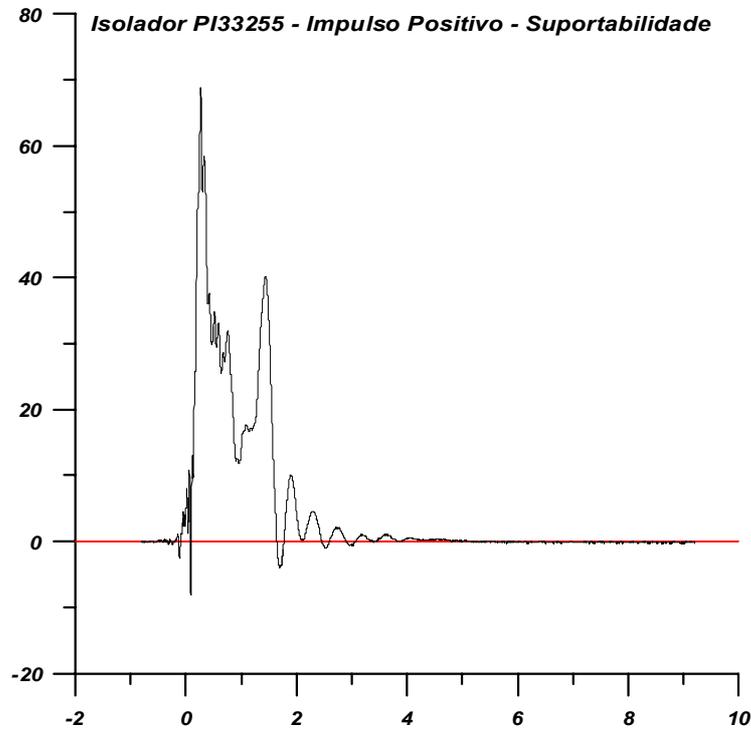


Figura 8.24 – Suportabilidade Positiva no Isolador de Pino PI33255

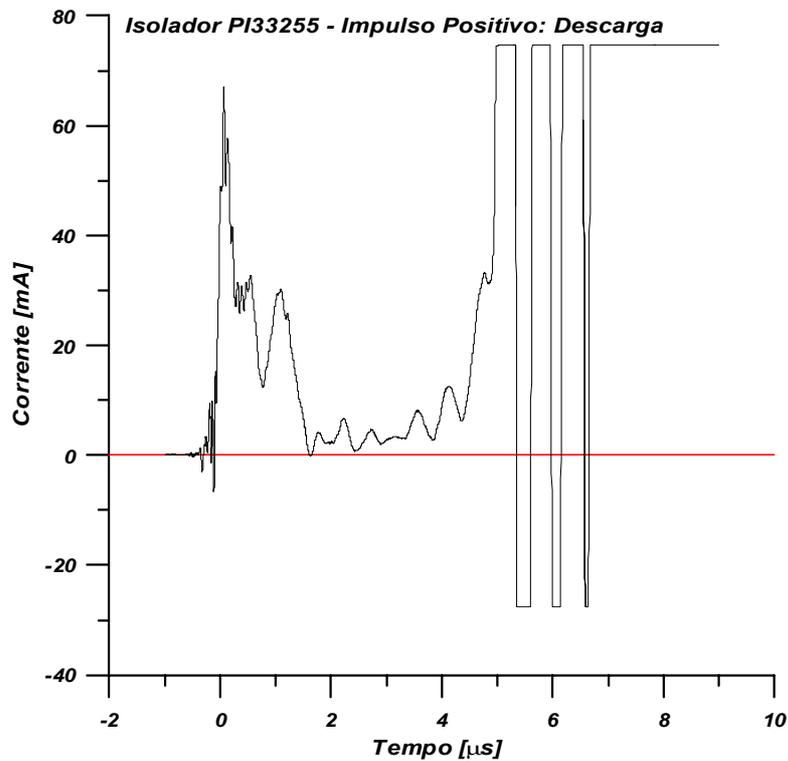


Figura 8.25 – Descarga Positiva no Isolador de Pino PI33255

Neste caso, a descarga aconteceu pouco antes do prazo observado para que a componente contínua se invertesse. No entanto, é possível observar que até 1,5 μs o impulso não havia sofrido praticamente nenhum amortecimento.

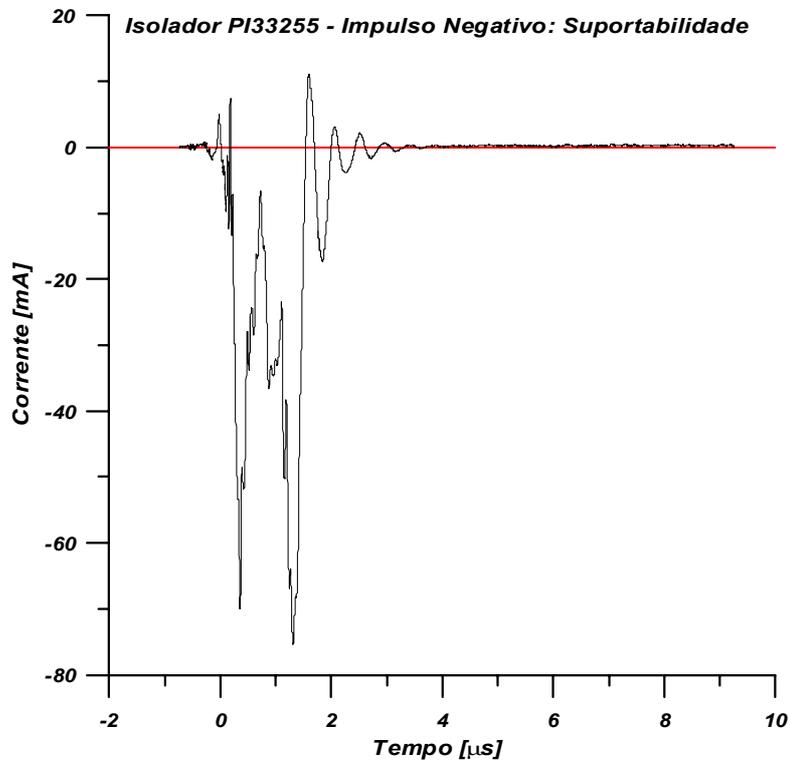


Figura 8.26 – Suportabilidade Negativa no Isolador de Pino PI33255

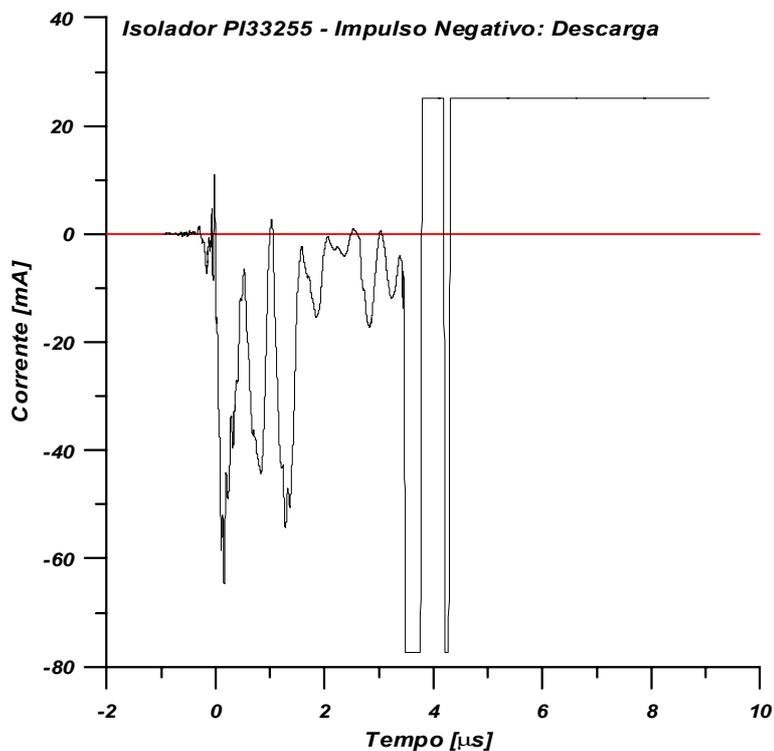


Figura 8.27 – Descarga Negativa no Isolador de Pino PI33255

8.4 FORMAS DE CORRENTE PARA UMA CHAVE SECCIONADORA

As Figuras 8.28 e 8.29 mostram os oscilogramas de dois impulsos positivos aplicados na Chave Seccionadora, o primeiro resultante em suportabilidade e o segundo em descarga.

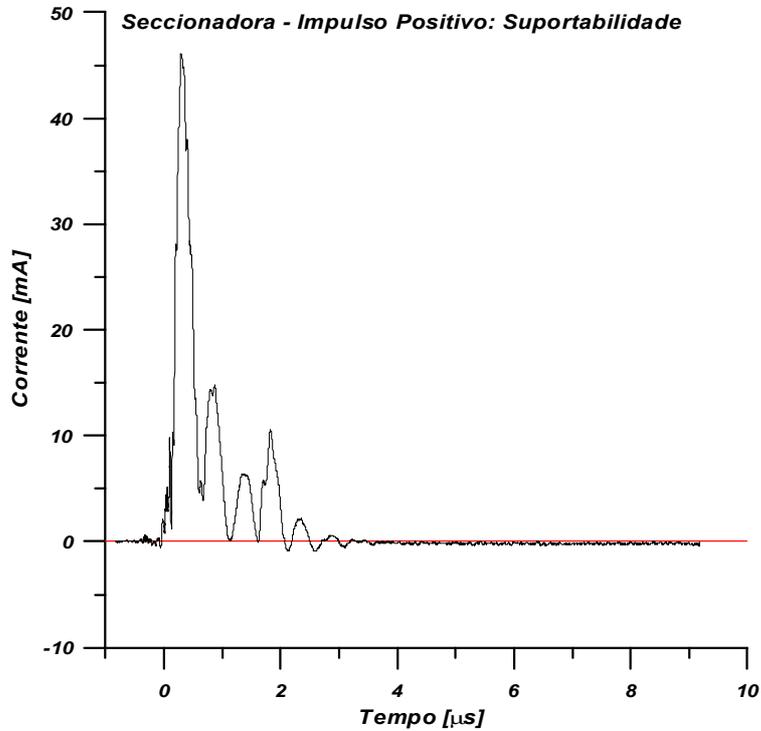


Figura 8.28 – Suportabilidade Positiva na Chave Seccionadora

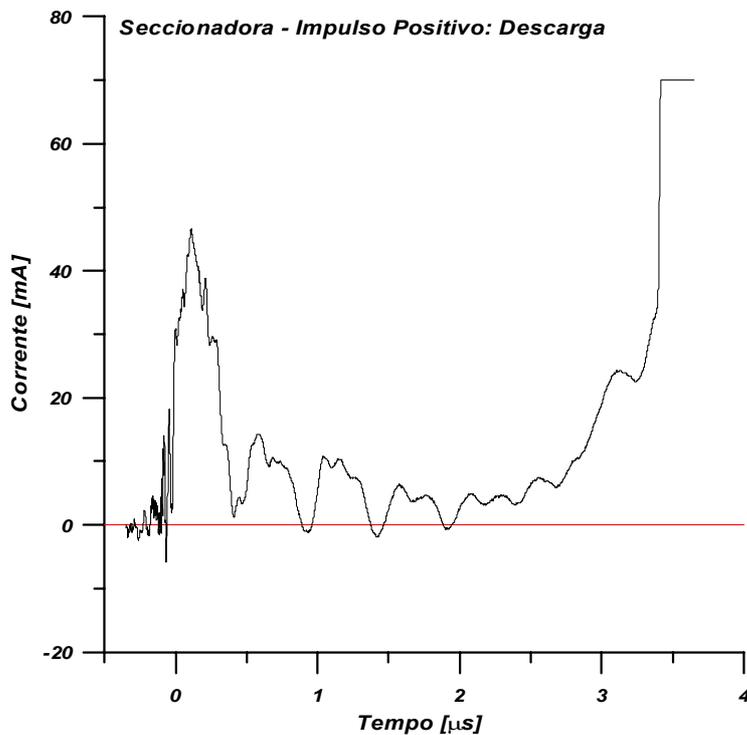


Figura 8.29 – Descarga Positiva na Chave Seccionadora

De maneira similar a todos os casos anteriormente observados, o impulso resultante em suportabilidade, além de um amortecimento mais pronunciado, apresentou uma componente contínua da corrente que inverte sua polaridade em torno de 3,0 [μs].

As Figuras 8.30 e 8.31 mostram os oscilogramas de dois impulsos negativos aplicados à Chave Seccionadora. No primeiro, resultante em suportabilidade é possível observar uma nítida analogia como o seu correspondente positivo.

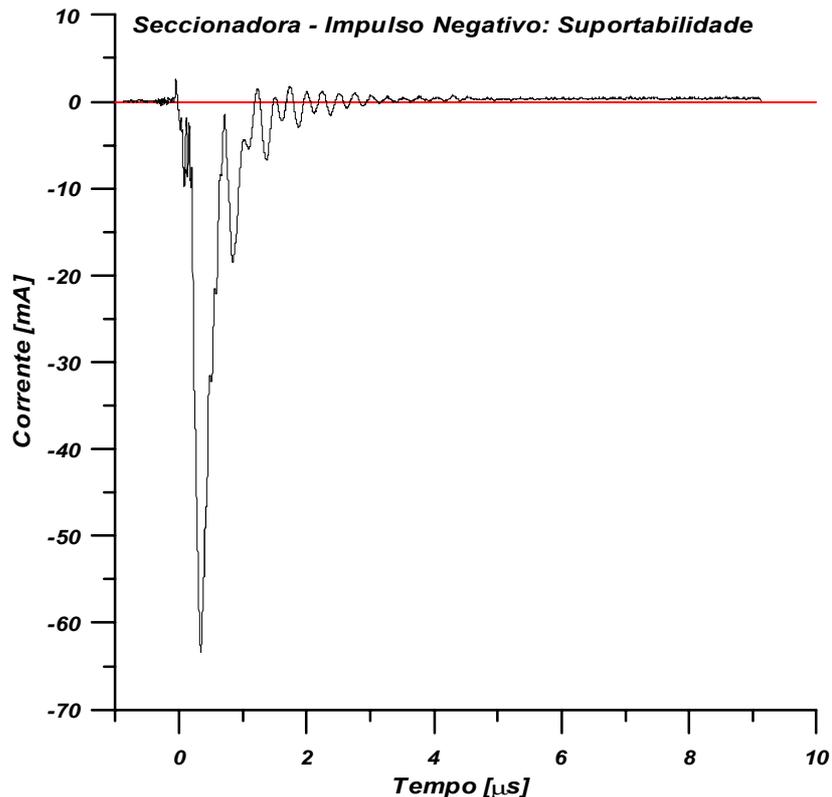


Figura 8.30 – Suportabilidade Negativa na Chave Seccionadora

O amortecimento é grandemente acentuado, e a inversão de polaridade acontece em um intervalo de tempo semelhante. A diferença na amplitude do pico da corrente, como em todos os outros casos, é devido ao maior valor da tensão disruptiva crítica da polaridade negativa em relação à positiva, o que resulta em maior valor de corrente.

No segundo, resultante em descarga, também é possível notar uma similaridade com o correspondente positivo, mesmo tendo a descarga acontecido mais cedo; fato este que pode ser explicado pelo menor amortecimento do impulso, que apresentou oscilações mais rápidas. Neste caso também, a amplitude do pico de corrente foi maior que o positivo pelo mesmo motivo já citado nas suportabilidades. Devido ao fraco amortecimento desta corrente, não houve nem mesmo um esboço de que a componente contínua pudesse inverter sua polaridade, e a descarga acabou surgindo antes do tempo previsto para a inversão de polaridade da corrente.

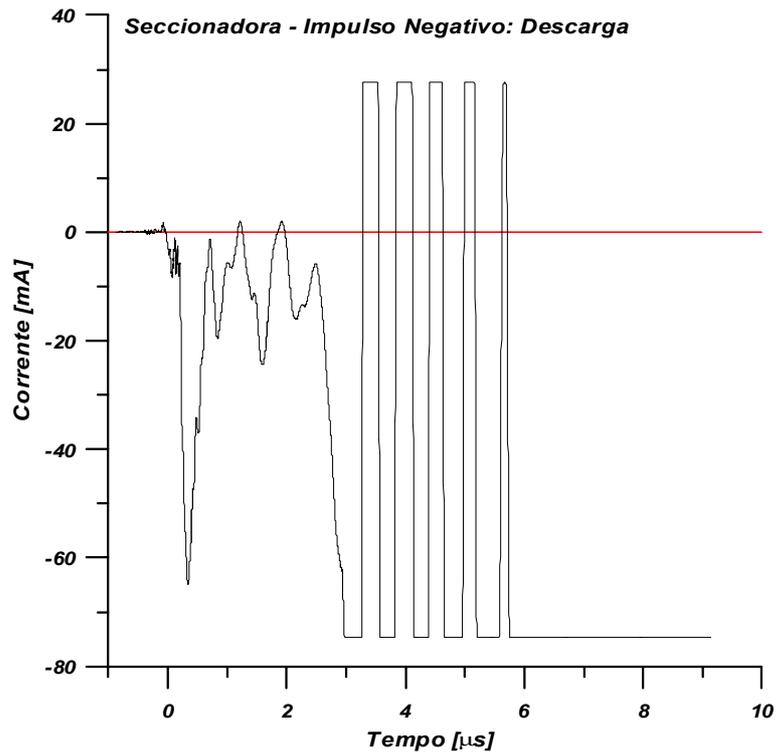


Figura 8.31 – Descarga Negativa na Chave Seccionadora

8.5 FORMAS DE CORRENTE PARA UM ISOLADOR DE SUSPENSÃO

As Figuras 8.32 e 8.33 mostram dois impulsos positivos aplicados ao Isolador de Suspensão.

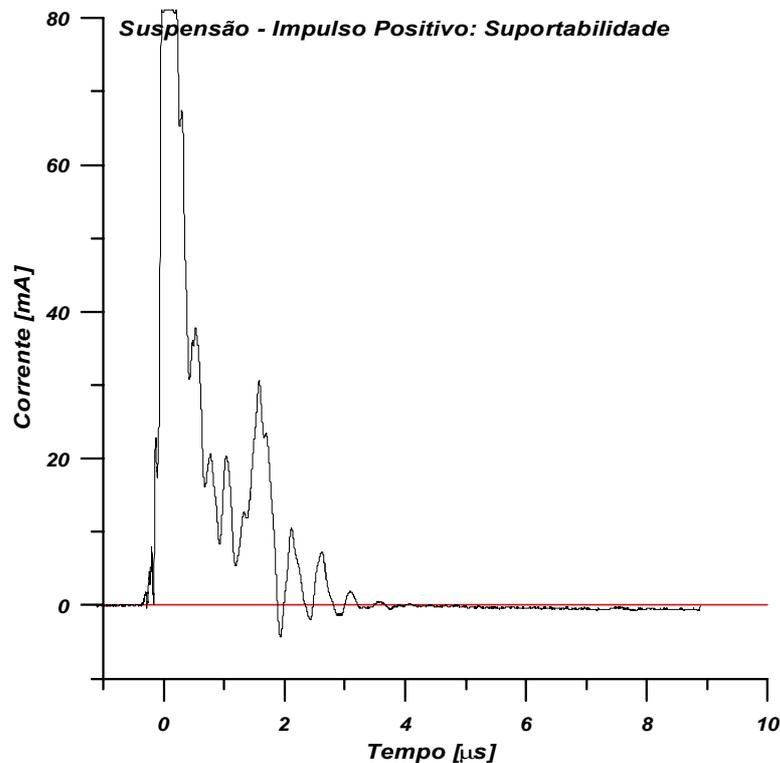


Figura 8.32 – Suportabilidade Positiva no Isolador de Suspensão

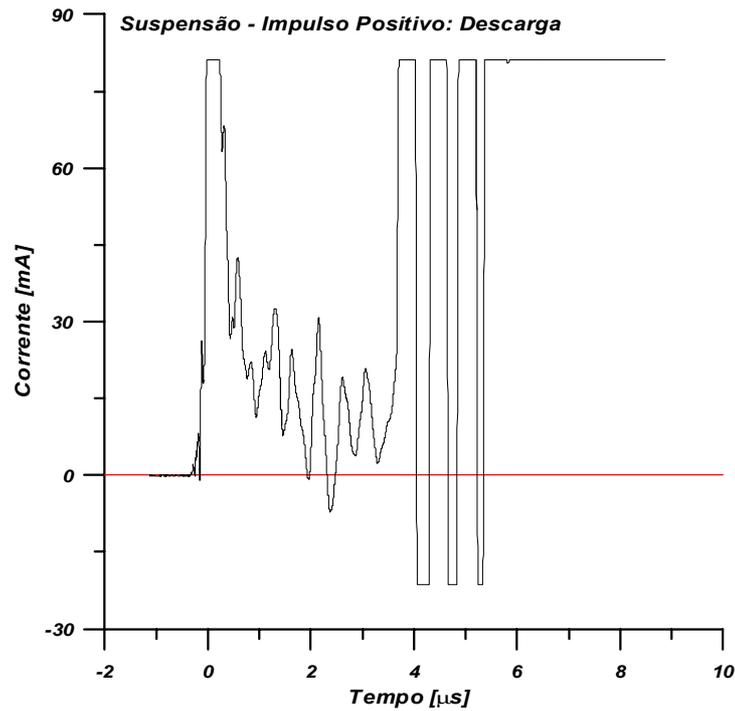


Figura 8.33 – Descarga Positiva no Isolador de Suspensão

O primeiro resultante em suportabilidade apresentou um amortecimento mais pronunciado e em torno de 3,5 [μs], a componente contínua da corrente acomodou-se em um valor próximo a zero. No segundo, resultante em descarga, com amortecimento de menor intensidade, a componente oscilatória chegou a cruzar a linha do zero de corrente em menos de 3,0 [μs], mas logo após o isolamento ar entrou em ruptura.

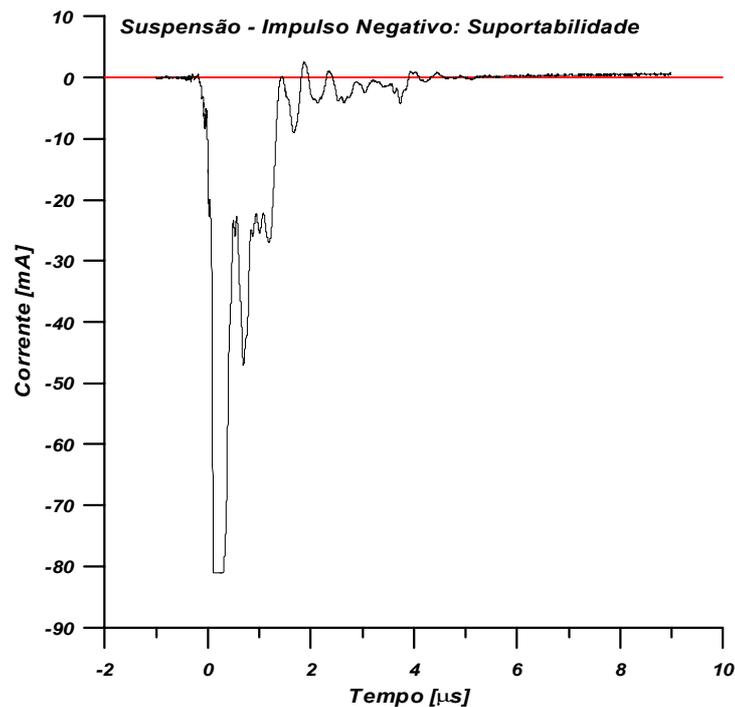


Figura 8.34 – Suportabilidade Negativa no Isolador de Suspensão

As Figuras 8.34 e 8.35 mostram dois impulsos negativos aplicados ao isolador de suspensão. É possível observar nestes dois gráficos um amortecimento praticamente semelhante, até o intervalo de 4,0 μs , onde o sentido de evolução tomado pelo valor da corrente do impulso fica diferenciado: No caso da suportabilidade, a corrente cruza a linha do valor zero e marca a inversão de polaridade; no caso da descarga, depois de passar quase 2,0 μs tangenciando a linha do zero, a corrente sofre um súbito incremento, volta a tocar a linha do zero, e ao retomar o crescimento acontece a ruptura do ar.

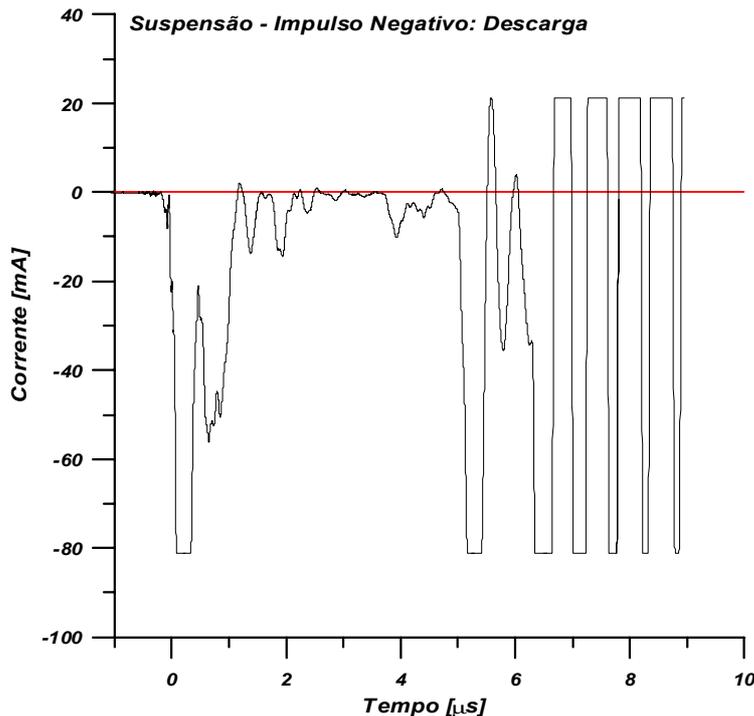


Figura 8.35 – Descarga Negativa no Isolador de Suspensão

8.6 FORMAS DE CORRENTE PARA UM ISOLADOR POLIMÉRICO

O Isolador Polimérico é o eletrodo real que apresenta a maior dificuldade de análise das formas corrente. As Figuras 8.36 e 8.37 mostram dois oscilogramas de impulsos positivos aplicados a um Isolador Polimérico, onde o primeiro resulta em suportabilidade e o segundo em descarga. Até os 3,0 μs o comportamento da componente contínua da corrente de ambos é aparentemente idêntico. A partir deste ponto a diferença é que no primeiro caso a corrente se acomoda em torno do valor zero e o isolamento em ar suporta o impulso; no segundo caso, a corrente começa a elevar exponencialmente o seu valor até acontecer a ruptura.

A identidade de comportamento entre os impulsos suportado e não-suportado até o ponto em que cada um verte para seu resultado, talvez possa ser atribuído à distribuição de cargas espaciais localizadas em trechos diferentes da distância de arco deste isolador. À semelhança dos isoladores em porcelana ou vidro, em um isolador polimérico, o arco percorre três

segmentos diferentes entre os eletrodos. O fato é que no caso deste isolador polimérico, estes três segmentos possuem extensões praticamente iguais, ao passo que nos demais isoladores estes segmentos apresentam comprimentos distintos.

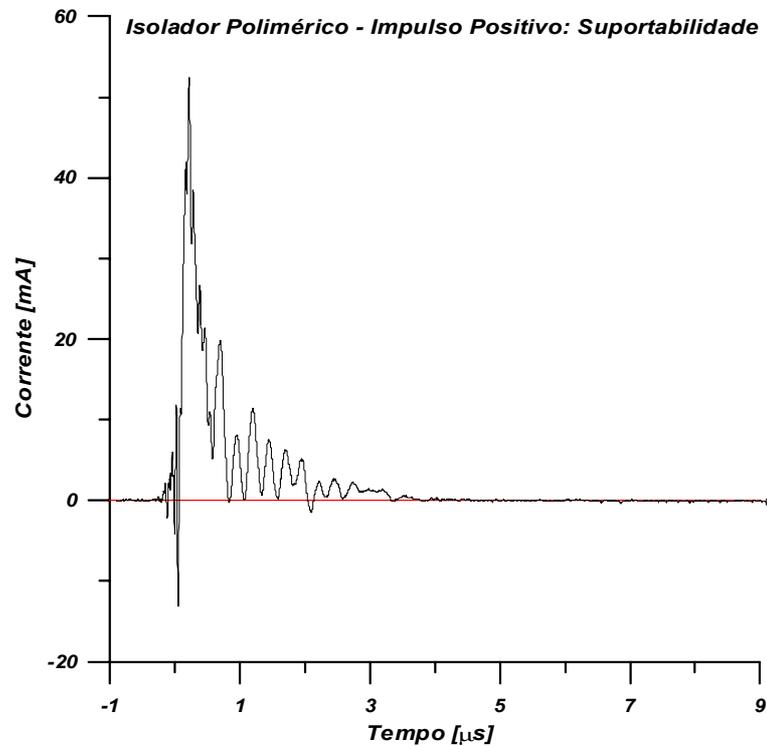


Figura 8.36 – Suportabilidade Positiva no Isolador Polimérico

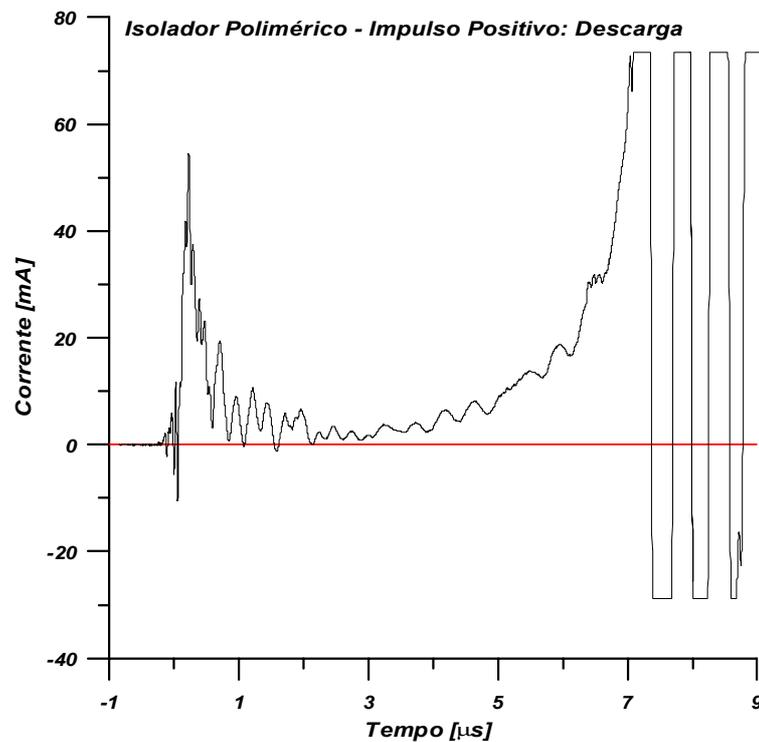


Figura 8.37 – Descarga Positiva no Isolador Polimérico

Neste caso, ainda que o canal condutor esteja sendo formado em ar, as avalanches auxiliares têm um espaçamento consideravelmente longo, se comparado ao de outros isoladores.

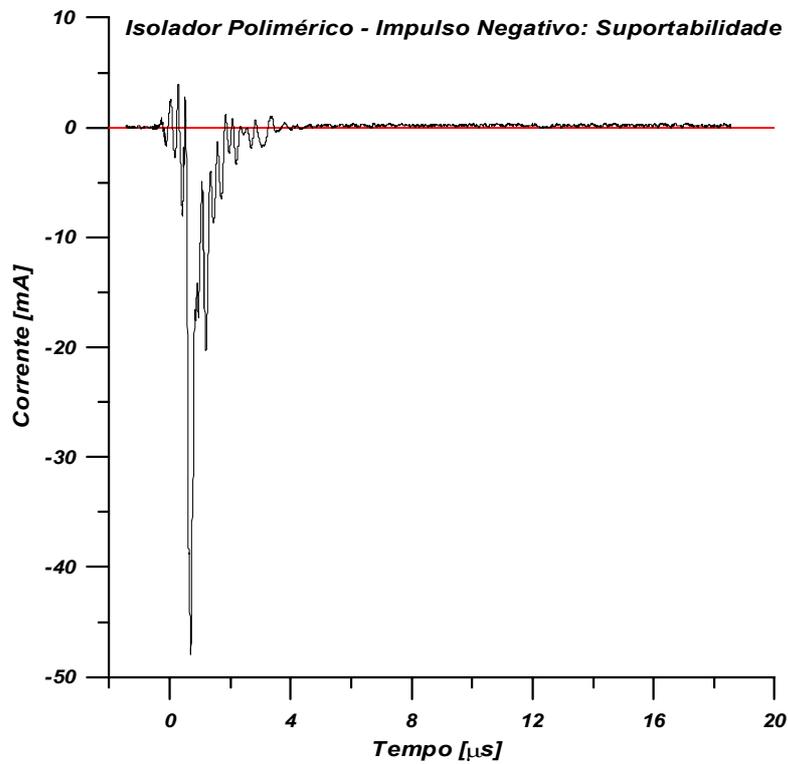


Figura 8.38 – Suportabilidade Negativa no Isolador Polimérico

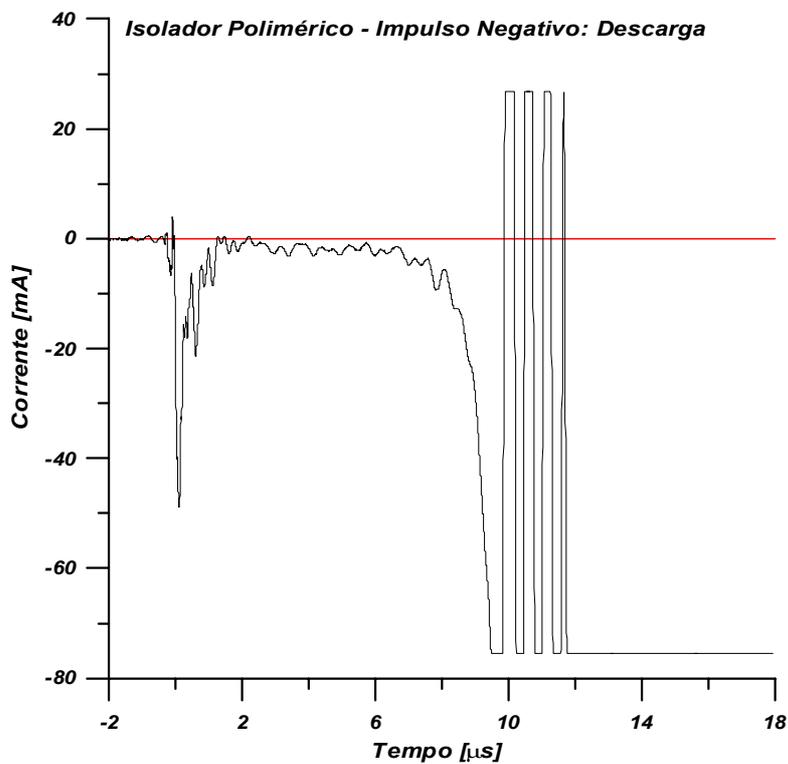


Figura 8.39 – Descarga Negativa no Isolador Polimérico

Como pode ser observado nas Figuras 8.38 e 8.39, fato similar ocorre na polaridade negativa. Até o instante em que o fluxo de corrente tende a zero ou tende a elevar seu valor, o comportamento é praticamente o mesmo para suportabilidade e/ou descarga.

8.7 FORMAS DE CORRENTE PARA UM ISOLADOR PILAR

As Figuras 8.40 e 8.41 mostram os oscilogramas de dois impulsos positivos aplicados a um Isolador Pilar.

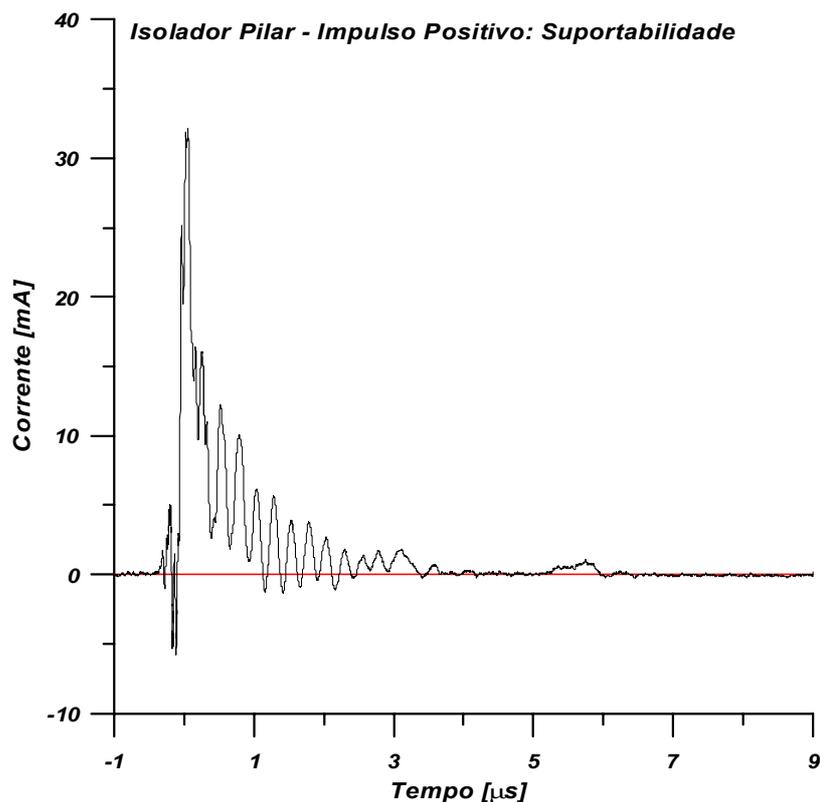


Figura 8.40 – Suportabilidade Positiva no Isolador Pilar

O primeiro, resultante em suportabilidade, possui uma componente contínua que, apesar de ter sido extinta por volta de 6,0 μs , já exibe uma tendência a se anular em um instante próximo a 1,5 μs . Neste mesmo intervalo inicial, o oscilograma da Figura 8.41, resultante em descarga, mostra que o valor da corrente de impulso está em crescimento.

O que sugerem estes dois oscilogramas é que o resultado da aplicação de um impulso positivo ao Isolador Pilar é definido pela tendência da corrente nos 1,5 μs da solicitação elétrica. Se a tendência for ao valor zero de corrente, mesmo que a inversão ou extinção da corrente contínua aconteça alguns micro-segundos mais tarde, o resultado é uma suportabilidade; por outro lado se a tendência for o aumento do valor da corrente de impulso, o resultado é a ruptura do isolamento em ar.

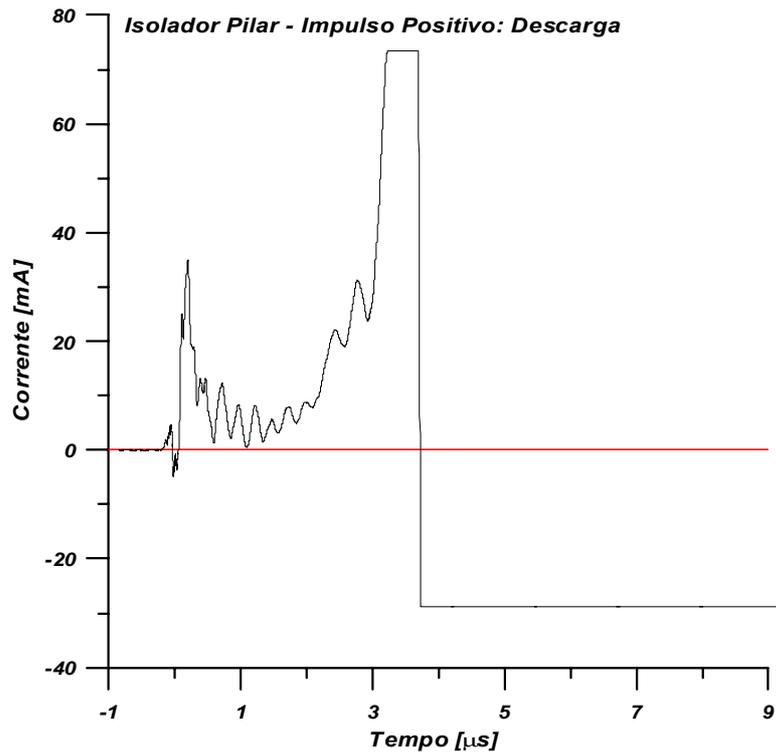


Figura 8.41 – Descarga Positiva no Isolador Pilar

As Figuras 8.42 e 8.43 mostram os oscilogramas de dois impulsos negativos aplicados ao Isolador Pilar.

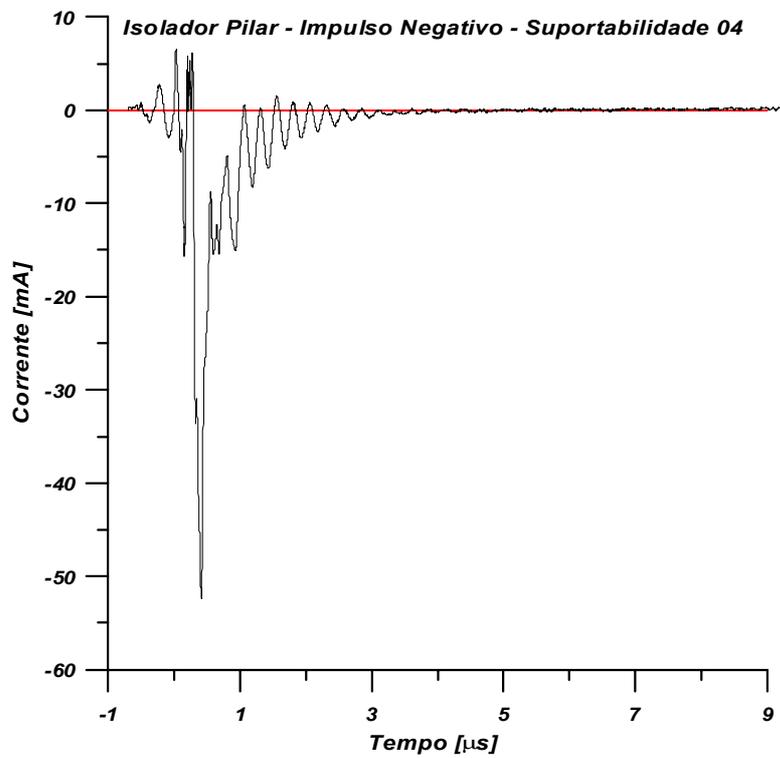


Figura 8.42 – Suportabilidade Negativa no Isolador Pilar

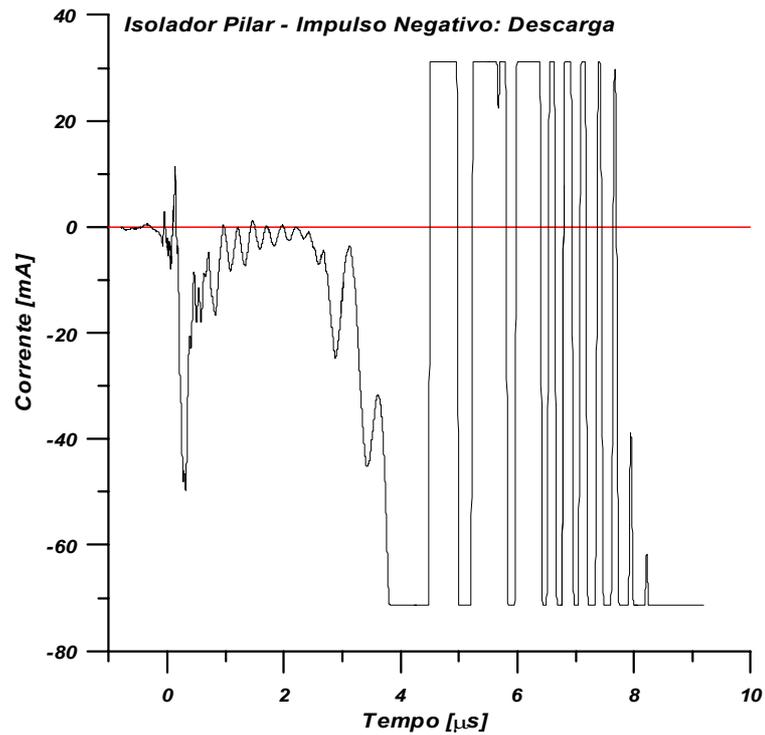


Figura 8.43 – Descarga Negativa no Isolador Pilar

A corrente nestes dois impulsos apresenta o mesmo comportamento observado para a polaridade positiva, com uma pequena diferença no intervalo inicial que, na polaridade negativa, é estendido para 2,5 [μs].

Com exceção da pequena diferença no intervalo de tempo inicial, um pouco mais longo, o comportamento dos impulsos negativos aplicados ao Isolador Pilar é análogo ao impulso positivo.

9. COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES

Para os eletrodos básicos, o procedimento para correção de umidade, como estabelecido pela IEEE Std. 4 [1] e IEC 60.1 [2], apresentou um fator de correção de umidade unitário, ou seja, o procedimento não considera a necessidade de correção [3-7]. O mesmo é observado para alguns casos de eletrodos comerciais e/ou reais, como para a chave seccionadora e o isolador pilar.

Considerando que a tensão disruptiva crítica dos objetos ensaiados apresenta uma leve dependência estatística considera-se que é possível obter um melhor fator geral de correção para os efeitos da umidade [3-7]. Este foi objetivo deste estudo e a aplicação do procedimento desenvolvido apresentou, em geral, resultados mais adequados, como mostrado nas Tabelas do Capítulo 7. Como pode ser verificado, o desvio padrão das tensões corrigidas – para o padrão 11 g/m³ – utilizando o procedimento desenvolvido no LAT-EFEI, é menor que o desvio padrão resultante da aplicação dos métodos recomendados pelas Normas. Entretanto isto não significa que o método proposto seja uma alternativa melhor que as padronizadas. Pode-se afirmar apenas que “Este procedimento aparenta estar mais adequado às nossas condições locais” [3-5].

A eficácia de ambas correções está relacionada à distância entre eletrodos, ou seja, à tensão disruptiva crítica. Isto sugere que um procedimento mais adequado pode ser obtido a partir dos processos de formação de descarga. Entretanto, qualquer evolução neste sentido implica no aumento, não desejado, da complexidade do procedimento em estudo.

É também necessário considerar que o presente procedimento foi desenvolvido para impulsos de tensão a partir de ensaios realizados para distâncias e equipamentos utilizados nos sistemas de distribuição. Portanto, os resultados finais são aplicáveis, de forma confiável, somente em ensaios nestas classes de tensão, observando-se impulsos com forma 1.2 x 50µs.

A eficiência do método de correção proposto é verificada pelo desvio padrão das tensões de U_{50%} corrigidas. Em alguns casos a melhora foi satisfatória, ao passo em que em outros casos tal melhora não foi observada. Fatos como este podem levantar outras discussões a respeito da viabilidade ou não do desenvolvimento de um método geral para a correção dos efeitos da umidade nos ensaios de impulso. No entanto, considerando que na maioria dos casos discutidos para a faixa de tensão de distribuição foi alcançada alguma evolução, considera-se que esta tarefa deva ser continuada.

Há também a necessidade de considerar no procedimento proposto alguns resultados relativos aos eletrodos Ponta-plano [6]. O fator de correção desenvolvido neste trabalho não considera a dependência da forma dos eletrodos ou mesmo a distância entre eles. Entretanto estas idéias têm apresentado algumas dificuldades.

É conveniente lembrar que o procedimento da IEC considera uma faixa de baixa umidade, onde o máximo é de 15 g/m^3 , e os dados presentes pretendem estender esta faixa de correção para valores em torno de 20 g/m^3 que representam condições típicas de regiões tropicais [4-6].

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram as curvas levantadas a partir dos ensaios realizados. Pode ser observado que em toda a faixa de umidade os dados são bem espalhados. Em alguns casos específicos que o desvio em relação à curva média é maior que 10%, o que parece ser inaceitável, refletindo, no entanto, condições de ensaio. É possível firmar que 90% dos resultados estão dentro de uma faixa entre $\pm 4.1\%$ e $\pm 4.4\%$, do valor médio, para ambas polaridades, positiva e negativa. Para um intervalo de confiança de 95% a incerteza em relação ao valor médio das curvas de correção está entre $\pm 0.41\%$ e $\pm 0.44\%$, para ambas polaridades. A incerteza dos resultados com a prática padrão é de 3% para tensões impulsivas.

A análise das formas de corrente dos impulsos mostra que para os eletrodos básicos a descarga ou inversão de polaridade da corrente acontece mais próximo à crista da onda, e nos eletrodos reais a massa isolante atua no sentido de prolongar o tempo de acomodação ou de ruptura. Isto se deve ao fato de que o material de que é feito o isolador utiliza uma parcela de energia do campo elétrico para se polarizar e tal polarização distorce o campo elétrico externo em ar.

O ponto chave ao qual não se teve um total controle é com relação às incertezas que são muitas a serem consideradas nesta pesquisa. Algumas são bem definidas e controladas como, por exemplo, o sistema de carga e disparo do gerador de impulsos; já outras como a massa de água presente no ar, podem ser muito difíceis de controlar.

O processo de disparo do gerador, por exemplo, cumpre um papel muito importante nos resultados dos ensaios, principalmente no cálculo da tensão disruptiva crítica. De acordo com a documentação técnica existente, e o levantamento de uma série de aferições realizadas no gerador de impulsos do LAT-EFEI, a faixa máxima de incerteza fica em torno de 0,5%.

Esta faixa foi verificada por uma simples comparação entre os valores de pico calculados e lidos [8]. Neste caso, a máxima variação para os picos de impulso para o gerador de impulsos na conexão utilizada durante o desenvolvimento desta pesquisa foi menor que 0,25%. O processo [8] aplicado, desenvolvido nos anos 90 não é um processo padrão. No entanto, os resultados apresentaram uma identidade satisfatória para todas as conexões padrão do gerador de impulsos do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. Desde então, esta vem sendo a maneira utilizada na verificação da precisão do sistema de disparo do gerador de impulsos. Este procedimento permitiu muitas vezes detectar falhas no gerador de impulsos, principalmente nos resistores de carga e de cauda.

Em relação à umidade há um pequeno problema. Primeiro, a umidade varia durante o ensaio

mesmo no interior da câmara climática e em todos os casos foi considerada a massa de água média durante o ensaio. Isto é obtido considerando a média de três leituras: no início, no meio e no fim do ensaio. Esta não é a melhor solução. Entretanto, associado à análise da forma da superfície de probabilidade, que deve apresentar uma simetria axial, isto tem se demonstrado um procedimento de verificação adequado. Um ensaio completo consiste de 75 aplicações de impulso em cada polaridade; esta prática visa compensar as incertezas através de um alto número de descargas. Se uma assimetria axial é detectada é possível assumir que o resultado do ensaio como um todo tenha sido influenciado por uma variação de umidade. A massa de água é obtida com um termômetro de bulbo seco e bulbo úmido e uma carga psicrométrica local [3].

Levando em conta a dispersão dos dados não corrigidos, é necessário reconhecer que é possível desenvolver novos processos de otimização, que resultem em aperfeiçoamentos no método de correção sob estudo, principalmente, para alguns casos específicos de aplicação da correção proposta que podem, é claro, ser questionados. Isto é fato e, portanto deve ser reconhecido. No entanto, é também necessário observar que o desvio padrão do valor médio corrigido foi reduzido, alcançando para as curvas propostas, para o método de correção desenvolvido nesta pesquisa, uma melhora em torno de 16% [3].

9.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 9

1. IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing; IEEE Std 4 (1995).
2. High Voltage Test Techniques Part – I: General Definitions and Test Requirements; IEC Publication 60-1 (1989).
3. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests Applied to Small Air Gaps”; presented at VII SIPDA - 2003; Curitiba-PR Brazil;
4. C.de Salles and M.L.B.Martinez; “Improvements on a New Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” – ISH 2003, Delft – Holanda;
5. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations”, Powertech-2003 – Bologna-Itália;
6. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece.
7. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at VI SIPDA - 2001; Santos-SP Brazil;
8. André Moroz, Credson de Salles, Elimar F. Gonçalves, Luís G. T. Faraco, Flávio E. Spressola, Manuel L.B. Martinez, “Influência dos Condutores – Eletrodos Flutuantes nos Resultados de Ensaios de Impulso Atmosférico”, III ENEAT – 2000 – Campina Grande;

10 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS COMPLEMENTARES

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a observação de algumas questões cujos estudos mais detalhados poderiam ser interessantes. Dentro deste contexto cita-se:

1. O comportamento de $U_{50\%}$ e do desvio padrão em função do número de aplicações de séries de impulso no Método dos Acréscimos e Decréscimos;
2. Desvios admissíveis da curva padrão de verossimilhança mantendo-se a qualidade do ensaio;
3. A viabilidade de se considerar um fator de correção para cada polaridade, visto que para alguns eletrodos reais o fator positivo se mostrou mais adequado, mas o negativo deixou a desejar e vice-versa;
4. Melhor caracterizar os aspectos *Tensão Disruptiva X Corrente de Descarga*;
5. A influência da umidade na corrente pré-descarga;
6. A influência da distância entre eletrodos na correção de umidade para pequenos espaçamentos em ar;
7. Realização dos estudos anteriormente mencionados para os eletrodos Ponta-plano.

11 – BIBLIOGRAFIA GERAL

11.1 – BIBLIOGRAFIA GERADA POR ESTE TRABALHO

CAPÍTULO 6

2. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests Applied to Small Air Gaps”; presented at VII SIPDA - 2003; Curitiba-PR Brazil
3. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at VI SIPDA - 2001; Santos-SP Brazil;
4. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at The IEEE - Pulsed Power Symposium 2001; London – United Kingdom;
5. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece.
6. C.de Salles and M.L.B.Martinez; “Improvements on a New Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” – ISH 2003, Delft – Holanda;
7. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations”, Powertech-2003 – Bologna-Itália;

CAPÍTULO 7

1. André Moroz, Credson de Salles, Elimar F. Gonçalves, Luís G. T. Faraco, Flávio E. Spressola, Manuel L.B. Martinez, “Influência dos Condutores – Eletrodos Flutuantes nos Resultados de Ensaios de Impulso Atmosférico”, III ENEAT – 2000 – Campina Grande;
2. Luiz G. Torteli Faraco, Elimar F. Gonçalves, André Moroz, Credson de Salles, Flávio E. Spressola, Manuel Luís Barreira Martinez; “The Existence of Floating Electrodes and the Results of Impulse Tests”; VIII DMMA – International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications – Setembro 2000 – Edimburgo, Escócia;
3. Luiz G. Torteli Faraco, Elimar F. Gonçalves, Credson de Salles, Manuel Luís Barreira Martinez; “The Correction of Humidity in Dielectric Strength Lightning Impulse Testing – Comments”; ISH-2001 – 12TH International Symposium on High Voltage Engineering – Agosto 2001 – Bangalore, Índia;
4. Faraco, L. G.; de Salles C.; et alli; “Application of a Method of Correction of Humidity Developed at EFEI-LAT to a Commercial Dielectric Configurations”; presented at ISH 2001; Bangalore – India;
5. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Application of a Method of Correction of Humidity, Developed at EFEI-LAT, to Commercial Dielectrics Configurations” presented at V Induscon – 2002 –

Salvador – Brazil;

6. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece;
7. J.P.Pennacchi, C.de Salles, M.L.B.Martinez, “Correlation Between the New Developed Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” - ISH 2003, Delft – Holanda;

CAPÍTULO 9

3. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests Applied to Small Air Gaps”; presented at VII SIPDA - 2003; Curitiba-PR Brazil;
4. C.de Salles and M.L.B.Martinez; “Improvements on a New Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” – ISH 2003, Delft – Holanda;
5. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations”, Powertech-2003 – Bologna-Itália;
6. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece.
7. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at VI SIPDA - 2001; Santos-SP Brazil;
8. André Moroz, Credson de Salles, Elimar F. Gonçalves, Luís G. T. Faraco, Flávio E. Spressola, Manuel L.B. Martinez, “Influência dos Condutores – Eletrodos Flutuantes nos Resultados de Ensaios de Impulso Atmosférico”, III ENEAT – 2000 – Campina Grande;

11.2 BIBLIOGRAFIA GERAL

CAPÍTULO 2

1. E. Naser, *Fundamental of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, Wiley Interscience, New York, 1971.
2. M.S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi, Índia, 1982.
3. A.A. Al-Arainy, “Laboratory Analysis of Gap Discharge on Power Lines”, Ph.D. thesis, University of Toronto, Canada, 1982.
4. W. Janischewskyj and A.A. Al-Arainy “Corona Characteristics of Simulated Rain”, IEEE Trans. On PAS, Vol. 100, No. 2, pp. 539-551, 1981.

5. A.A. Al-Arainy, " The Effects of Rain on Electromagnetic Characteristics of Corona", M.Sc. thesis, University of Toronto, Canadá 1977.
 6. L.G. Christophorous, *Gaseous Dielectrics*, Vol. II. Pergamon Press, New York, 1980.
 7. L.G. Christophorous, IEE Conf. Publication, No 165, pp. 1-8, 1978.
 8. R.E. Wooten, S.J. Dale and N.J. Zimmerman, Proc. Of the Second Int. Symp. On Gaseous Dielectric, Knoxville, Tennessee, 1980.
 9. L.G. Christophorous and L.A. Pinnaduwege, IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol 25, No 1, pp. 55-74, 1990.
 10. L.G. Christophorous and S.J. Dale, Encyclopedia of Physical Science and Technology, R.A. Meyors (ed.), Vol 4, pp. 246-262, Academic Press, New York, 1987.
- I. Electrical Insulation in Power Systems N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi Marcel Dekker Inc. New York – 1998

CAPÍTULO 3

1. L. Paris, "Influence of Air Gap Characteristics On Line To Ground Switching Surge Strenght", IEEE Trans., Vol. PAS-86, No. 8. pp.936-947, 1967;
2. Y. Aihora, IEEE Trans., Vol. PAS-97, No. 2, pp. 342-347, 1978;
3. Transmission line Reference Book, EPRI, Califórnia, 1982;
4. K. Schneider and N. Weck Electra, "Parameteres Influencing The Gap Factor", No 35, pp-25-48, 1974;
5. CIGRE Task Force, "Guidelines for the Evaluation o f the Dielectric Strength of External Insulation", CIGRE 33.92, (Wg-07) 1 IWD, Paris, France, 1992;
6. G. Gallet, G. Leroy, R. Lacey, and I. Kromer, IEEE Trans., Vol. PAS-94, No. 6, pp. 1989-1993, 1975.
7. E. Lemke, Z.Electr. Inform. Energetechnik, Leipzig, Germany, Vol. 3, No 4, pp. 186-192, 1973.
8. R.T. Waters, "Spark Breakdown in Nonuniform Field", in Electrical Breakdown of Gases, by J.M. Meek and J. D. Craggs (eds), John Wiley & Sons. New York, pp. 510-513, 1978;
9. G.N. Aleksandrov, Zurnal Technicheskoi Fiziki, Vol. 9, pp. 744-756, 1969.
10. A. Pignini, G. Rizzi, R. Barmbilla, and E. Garbagnati, "Switching Impulse Strenght of Very Large Gaps", 3rd ISH Milan, Paper No. 51.15, 1979.
11. F. Rizk, "A Model For Switching Impulse Leader Inception and Breakdown of Long Air Gaps", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 596-606, 1989.
12. I. Kishizimask, Matsumoto and Watanabe, IEEE trans., Vol PAS. 103, No. 6, pp. 1211-1216, 1984.
13. L. Thione, Electra, "Evaluating of the Switching Impulse Strenght of External Insulation", No. 94,

- 1984.
14. M. Dietrich, J. Wolf, E. Lemke and J. Kurcera, "Influence of the Tail Duration on the Positives Switching Impulse Breakdown of Large Air Gaps", Proc. 4th ISH, Athens, Greece, 1983.
 15. IEC-60-1,2,3,4, "High Voltage Testing Techniques", 1989.
 16. "IEEE Standards Techniques for High Voltage Testing", IEEE Std. 4-1978.
 17. A. Albert, "Phase-phase Switching Surge Flashovers: Design Data", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No 7, pp. 3666-3672, 1981.
 18. P. Zacke, "Breakdown Phenomena of Rod-rod Gaps Under Impulse Voltages of Opposite Polarity on Both Electrodes", IEEE Trans., Vol PAS-96, No 2, pp. 701-708, 1977.
 19. M.I. Qureshi, A. Al Arainy and N.H. Malik, "Performance of Rod-rod Gaps in the Presence of Dust Particles Under Standard Switching Impulses", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No 2, pp 706-714, 1991.
 20. A. Al Arainy and N.H. Malik and M.I. Qureshi, "Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of Assymetrical Air Gaps Under Swtitching Impulses", IEEE Trans on Dielectrics and Elec. Insul., Vol. 27, No. 2, pp 193-206, 1991
 21. M.I. Qureshi, A. Al Arainy na N.H. Malik, "Performance of Rod-rod Gaps in the Presence of Dust Particles Under Standard Switching Impulses", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 8, No 3, pp. 1045-1051, 1992.
 22. AA. Al-Arainy, N.H. Malik and M.I. Qureshi, "Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of Assymetrical Air Gaps Under Swtitching Impulses", IEEE Trans on Dielectrics and Elect. Insul., Vol 1, No 2, pp. 305-314, 1994.
 23. H. Batz, "Comparative Impulse Tests with Impulse Voltage on Rod Gaps" CIGRE Report No. 325, Paris, France, 1962.
 24. IEC Publication 52, "Recommendation for High Voltage Measurement by Means of Sphere-Gaps (One Sphere Earthed)", Geneva, Switzerland, 1960.
 25. IEEE Committee Report, "Report on Industry Survey of Protective Gap Applications in High Voltage Systems", IEEE trans., Vol. PAS-86, pp. 1432-1437, 1967.
 26. IEEE Working Group Report, "Sparkover Characteristics of High Voltage Portective Gaps", IEEE Trans., Vol. PAS-93, pp. 196-205, 1974.
 27. Ohio Brass Company, "Hi Tension News", Vol.48, No 9, pp. 2-3, 1979.
 28. Special Issue on "UHV Air Insulation: Physical and Engineering Research – Part 1", IEE Proceedings, Vol. 133, Part A, No. 7, 1986.
 29. G.N. Alexandrov, G.V. Podporkgn, Yu. G. Seleznev and A.D. Sivayev, "A Study of the Electric Strenght of Phase-to phase Air Gaps in Compacts Overheads Lines", 4th ISH, Athens, Greece, Paper No. 44.11, 1983.

30. WG No 7 of Committee 33 Dielectric Strength of External Insulation Systems Under Live Working, CIGRE, Paris, 1994.
 31. M. Khalifa, (ed), High Voltage Engineering: Theory and Practice, Marcel Dekker, New York, 1990.
 32. CIGRE Committee Report, "Interference Produced by Corona Effects of Electric System: Description of Phenomena, Practical Guide for Calculation", CIGRE (Electra), Paris, France, pp. 89-97, 1971.
 33. ANSI, "Specifications for Radio Noise and Field Strength Meters 0.015 to 30 megacycles/second", New York, 1963.
 34. A. Al-Arainy, N.H. Malik and L.N. Abdulal, "Electromagnetic Interference from Transmission Lines Located in Central Region of Saudi Arabia", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. 4, No 1, pp. 532-538, 1989.
 35. N.H. Malik and A. Al-Arainy, "EMI Characteristics of Distribution Lines Located in Desert Lands", IEEE Trans, on EMC, Vo. 31, No. 3, pp. 273-279, 1989.
 36. W. Janischewskyj and A. Al-Arainy, "Statistical Characteristics of Microgap Discharge", U.S. – Japan Seminar on EMI in Highly Advanced Social Systems, Honolulu, August 1988.
 37. A. Al-Arainy, "Laboratory Analysis of Gap Discharge on Power Lines", Ph.D. thesis, University of Toronto, Canada, 1982.
 38. IEEE Radio Noise Subcommittee Report, IEEE Trans. On PAS, Vol 92, pp. 1029-1042, 1973.
- I. Electrical Insulation in Power Systems N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi Marcel Dekker Inc. New York – 1998.

CAPÍTULO 4

1. NBR 6936/1992. – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão.
2. Técnicas de Alta Tensão, C.J.G.Junqueira, R.D. Fuchs – 1970.
3. Métodos Estatísticos Aplicados aos Ensaio de Tensão Disruptiva do Sistema Spacer de 15 kV Frente a Impulsos Atmosféricos, *LAT-EFEI* – A C. M. Vieira.
4. HAEFELY – Impulse Generator – Instituto Eletrotécnico de Itajubá/Bresil – Catálogo WO3134.

CAPÍTULO 5

1. NBR 6936/1992. – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão
2. Carrara, G.; Yakov S.: "Statistical Evaluation of Dielectrics Methods", Revista "L'Energia Elettrica", fascículo 1, volume LX, 1983.
3. Pavinatto. E. F., Martinez. M. et alli; "Métodos de Ensaio e Análise Estatística em Ensaio de Tensão Disruptiva de Impulsos Atmosféricos"; VI SEMEL – Seminário Nacional de Materiais no Setor Elétrico;

COPEL – LAC – UFPR; Novembro 1998, Curitiba

CAPÍTULO 6

1. NBR 6936/1992. – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão.
2. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests Applied to Small Air Gaps”; presented at VII SIPDA - 2003; Curitiba-PR Brazil
3. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at VI SIPDA - 2001; Santos-SP Brazil;
4. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at The IEEE - Pulsed Power Symposium 2001; London – United Kingdom;
5. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece.
6. C.de Salles and M.L.B.Martinez; “Improvements on a New Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” – ISH 2003, Delft – Holanda;
7. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations”, Powertech-2003 – Bologna-Itália;

CAPÍTULO 7

1. André Moroz, Credson de Salles, Elimar F. Gonçalves, Luís G. T. Faraco, Flávio E. Spressola, Manuel L.B. Martinez, “Influência dos Condutores – Eletrodos Flutuantes nos Resultados de Ensaio de Impulso Atmosférico”, III ENEAT – 2000 – Campina Grande;
2. Luiz G. Torteli Faraco, Elimar F. Gonçalves, André Moroz, Credson de Salles, Flávio E. Spressola, Manuel Luís Barreira Martinez; “The Existence of Floating Electrodes and the Results of Impulse Tests”; VIII DMMA – International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications – Setembro 2000 – Edimburgo, Escócia;
3. Luiz G. Torteli Faraco, Elimar F. Gonçalves, Credson de Salles, Manuel Luís Barreira Martinez; “The Correction of Humidity in Dielectric Strength Lightning Impulse Testing – Comments”; ISH-2001 – 12TH International Symposium on High Voltage Engineering – Agosto 2001 – Bangalore, Índia;
4. Faraco, L. G.; de Salles C.; et alli; “Application of a Method of Correction of Humidity Developed at EFEI-LAT to a Commercial Dielectric Configurations”; presented at ISH 2001; Bangalore – India;
5. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Application of a Method of Correction of Humidity,

- Developed at EFEI-LAT, to Commercial Dielectrics Configurations” presented at V Induscon – 2002 – Salvador – Brazil;
6. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece;
 7. J.P.Pennacchi, C.de Salles, M.L.B.Martinez, “Correlation Between the New Developed Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” - ISH 2003, Delft – Holanda;

CAPÍTULO 9

1. IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing; IEEE Std 4 (1995).
2. High Voltage Test Techniques Part – I: General Definitions and Test Requirements; IEC Publication 60-1 (1989).
3. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests Applied to Small Air Gaps”; presented at VII SIPDA - 2003; Curitiba-PR Brazil;
4. C.de Salles and M.L.B.Martinez; “Improvements on a New Method to Correct the Humidity Effect on Lightning Impulse Testing” – ISH 2003, Delft – Holanda;
5. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, “A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations”, Powertech-2003 – Bologna-Itália;
6. Pennacchi, JP, de Salles, C, Martinez, MLB “Improvements on the Determination of the Humidity Correction Factor during Lightning Impulse Testing” presented at Med Power – 2002 – Athens – Greece.
7. de Salles, C & Martinez, M.L.B; “A Proposal to Determine the Humidity Correction Factor During Lightning Impulse Testing”; presented at VI SIPDA - 2001; Santos-SP Brazil;
8. André Moroz, Credson de Salles, Elimar F. Gonçalves, Luís G. T. Faraco, Flávio E. Spressola, Manuel L.B. Martinez, “Influência dos Condutores – Eletrodos Flutuantes nos Resultados de Ensaio de Impulso Atmosférico”, III ENEAT – 2000 – Campina Grande;