

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
**Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica**

JOSÉ MESSIAS CAVALCANTE JUNIOR

Uma Análise Estatística da Coordenação de Isolamento em  
Seccionadores de Alta e Extra-Alta Tensão

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
**Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica**

## Uma Análise Estatística da Coordenação de Isolamento em Seccionadores de Alta e Extra-Alta Tensão

JOSÉ MESSIAS CAVALCANTE JUNIOR

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Edson Guedes da Costa, D.Sc.  
Francisco Marcos de Assis, D.Sc.  
Orientadores

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2015



C377a Cavalcante Júnior, José Messias.  
Uma análise estatística da coordenação de isolamento em seccionadores de alta e extra-alta tensão / José Messias Cavalcante Júnior. - Campina Grande, 2015.  
87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.  
"Orientação : Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Francisco Marcos de Assis".  
Referências.

1. Coordenação de Isolamento. 2. Seccionadores. 3. Ensaios de Tipo. 4. Isolamentos Elétricos. I. Costa, Edson Guedes da. II. Assis, Francisco Marcos de. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.316.963(043)

**" UMA ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO EM  
SECCIONADORES DE ALTA TENSÃO"**

**JOSÉ MESSIAS CAVALCANTE JÚNIOR**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/05/2015**



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)



**FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG**  
Orientador(a)



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)



**KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais: Messias e Dorotéa. Ele, um exemplo de ética, profissionalismo, perseverança e paciência; ela, um modelo de mãe psicóloga, inteligência emocional, compreensão, carinho e amor pelos filhos. Sem a ajuda deles e do Grande Arquiteto do Universo, a lugar algum eu teria chegado.

A minha amada esposa Bruna, pela confiança, incentivo, dedicação, conselhos, amor e compreensão da minha ausência em muitos momentos em família, além de ser coautora em minhas duas obras de arte: Bruno e Pedro, razão principal da minha existência.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, pelo suporte financeiro na implantação deste mestrado profissional, disponibilizando meu tempo, recursos diretos e indiretos, para desenvolvimento de um trabalho meticuloso e especialista de inspeção técnica e especificação de seccionadores, parte fundamental desta pesquisa. Em especial, agradeço aos colegas da CHESF Antonio Varejão, Fábio Nepomuceno e Methódio Godoy.

Aos professores Edson Guedes da Costa e Francisco Marcos de Assis, que me instruíram intelectualmente na qualidade de orientadores e pela confiança em mim depositada.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, especialmente aos do Laboratório de Alta Tensão pelo agradável convívio, respeito, amizade, reconhecimento e incentivo, sempre dispostos a ajudar nas questões científicas ou burocráticas.

Aos colegas da CHESF, no mestrado, que me ajudaram na rotina dos estudos para superar os desafios, com conversas e discussões tangentes a cada disciplina do curso.

Por fim, agradeço aos meus amigos, que tanto me ensinam no dia a dia.

*José Messias Cavalcante Junior*

## RESUMO

Esta dissertação avalia a coordenação de isolamento de três seccionadores, considerando surtos de impulsos de manobra para sistemas elétricos com tensões nominais acima de 300 kV e surtos de impulsos atmosféricos para tensões abaixo de 300 kV. A partir de ensaios de seccionadores isolados a ar, realizados em laboratórios de extra-alta tensão, são coletados dados para a verificação da coordenação de isolamento com distâncias diferentes de *open-gap* e a distância de arco a seco no isolador, o que varia os valores de tensão disruptiva entre contatos e fase-terra, respectivamente. Uma análise estatística então é feita, com base nas curvas de distribuição normal de valores, tomando como base o método *up and down* com valores de tensão de ruptura de cinquenta por cento das tensões de impulso ( $U_{50\%}$ ) e a dispersão dos valores medidos ( $\sigma$ ). Adicionalmente, uma análise minuciosa dos resultados nos revela as condições nas quais não se consegue garantir a coordenação de isolamento do seccionador. Com base nesta análise, propõem-se estudos laboratoriais mais detalhados e indica-se a necessidade de inclusão de ensaios de tipo que comprovem a coordenação de isolamento do seccionador nos testes dielétricos das normas técnicas.

**Palavras-chave:** Coordenação de isolamento, seccionadores, ensaios de tipo, isolamentos elétricos.

# ABSTRACT

This dissertation evaluates the insulation coordination of three disconnectors isolated by air, with respect to switching surges for electrical systems with rated voltages above 300 kV, and atmospheric surges for voltages below 300 kV. From assay disconnectors isolated by air, in extra-high-voltage laboratories, data is collected for checking insulation coordination on the electrical distances of "Open-Gap" and dry arc distance, on the insulator, which varies the breakdown voltage values between contacts and fase-to-ground, respectively. Then the statistical analysis is performed on the normal distribution curve values, based on the method "up and down", on breakdown voltage values of the fifty percent of impulse voltages ( $U_{50\%}$ ) and the dispersion of the measured values – standard deviation ( $\sigma$ ). Thereafter, it is taken to analyze the results, obtaining the conditions for which, it may ensure the insulation coordination of the disconnector. Based on this analysis, it is proposed to more detailed laboratory studies and indicates the inclusion of dielectric tests proving the insulation coordination of the disconnector in the type testing of the Brazilian technical standard.

**Keywords:** Insulation coordination, disconnector, type tests, electrical insulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 - Fotografia de um seccionador com a disrupção dielétrica entre contatos. ....	16
Figura 2. 1 - Componentes de um seccionador de alta tensão (D´AJUZ at al, 1985).	19
Figura 2. 2 - SPH - Semi-Pantográfico Horizontal (FRONTIN at al, 2013)	20
Figura 2. 3 – DAL - Dupla Abertura Lateral e detalhe dos contatos (b) (FRONTIN at al, 2013).	20
Figura 2. 4 - Probabilidade de descarga da Isolção. (D´AJUZ at al, 1987).	23
Figura 2. 5 – Variação da suportabilidade do <i>gap</i> para um arranjo ponta-plano em função da frente de onda (LLOYD; ZAFFANELLA, 1982).	24
Figura 2. 6 - Fatores de geometria do intervalo determinados por Paris e Cortina (PARIS; CORTINA, 1968).	25
Figura 2. 7 – Influência de ferragens no isolamento (FRONTIN at al, 2013).	26
Figura 2. 8 - Expoente de ajuste da Equação 2.3 em função do intervalo de ar (HILEMAN, 1999).	27
Figura 2. 9 - Representação do polo de um seccionador para os ensaios dielétricos.	29
Figura 2. 10 - Método <i>up and down</i> de Dixon e Mood (DIXON; MOOD, 1984).	34
Figura 2. 11 - Método convencional de coordenação de isolamento (D´AJUZ at al, 1987).	36
Figura 2. 12 - Distribuição das sobretensões - $f_0(U)$ ( D´AJUZ at al, 1987).	37
Figura 2. 13 – Avaliação do risco de falha de um isolamento (D´AJUZ at al, 1987).	38
Figura 3. 1 - Fotografia de um seccionador de 550 kV pronto para ser ensaiado.	41
Figura 3. 2 - Desenho diagramático com as indicações das dimensões do seccionador de 550 kV.	42
Figura 3. 3 – Fotografias de Gerador de impulso de tensão (a) e Transformador de alta tensão (b).	43
Figura 3. 4 - Forma de onda do impulso atmosférico de tensão, polaridade negativa, aplicada no seccionador - Valor do pico da tensão: $U_{pk} = - 1557$ kV, tempo de frente: $T_1 = 1,21$ $\mu$ s e tempo de cauda: $T_2 = 51,2$ $\mu$ s.	44
Figura 3. 5 - Forma de onda do impulso de manobra de tensão, polaridade positiva, aplicada no seccionador - Valor do pico da tensão: $U_{pk} = 1175$ kV, tempo de frente: $T_p = 254$ $\mu$ s e tempo de cauda: $T_2 = 2824$ $\mu$ s.	44
Figura 3. 6 - Arranjo experimental A, utilizando uma fonte de gerador de impulso de tensão.	45
Figura 3. 7 - Arranjo experimental A e B, utilizando duas fontes de tensão para testes dielétricos.	46
Figura 4. 1 – Curvas características de um seccionador sem coordenação de isolamento.....	63
Figura 4. 2 – Avaliação da coordenação de isolamento para impulso de manobra sob chuva do CH1.	66
Figura 4. 3 – Avaliação da coordenação de isolamento para impulso atmosférico do CH2. ....	69
Figura 4. 4 – Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso atmosférico. ....	72
Figura 4. 5 – Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra a seco. ....	74
Figura 4. 6 – Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra sob chuva.	76
Figura 4. 7 – Análise gráfica de coordenação de isolamento - “condição de criticidade: radical”. ....	79
Figura 4. 8 – Análise gráfica de coordenação de isolamento - “condição de criticidade: crítica”. ....	79
Figura 4. 9 – Análise gráfica de coordenação de isolamento - “condição de criticidade: simples”. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Configurações do polo de um seccionador para os ensaios dielétricos.....	29
Tabela 2. 2 - Níveis de isolamento nominal informados na norma brasileira NBR IEC 60694 – Tabela 1a.....	31
Tabela 2. 3 - Níveis de isolamento nominal informados na norma brasileira NBR IEC 60694 – Tabela 2a.....	32
Tabela 3. 1 – Características elétricas nominais do seccionador.....	41
Tabela 3. 2 – Características físicas dos Seccionadores.....	42
Tabela 3. 3 - Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.1.1.	49
Tabela 3. 4 - Valores dos impulsos aplicados usando o método <i>up and down</i> no contato “a” do item 3.3.1.1.....	49
Tabela 3. 5 - Valores de $U_{50\%}$ através do método simplificado <i>up and down</i> do item 3.3.1.1.....	50
Tabela 3. 6 – Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.1.2.	50
Tabela 3. 7 – Valores da condição da chuva durante a realização das verificações do item 3.3.1.2.....	50
Tabela 3. 8 – Valores dos impulsos aplicados no contato “a” entre fase-terra d o item 3.3.1.2.....	51
Tabela 3. 9 – Valores de $U_{50\%}$ através do método simplificado <i>up and down</i> do item 3.3.1.2.....	51
Tabela 3. 10– Valores da condição atmosférica durante as verificações do item 3.3.1.3.....	52
Tabela 3. 11 – Valores da condição da chuva durante a realização do item 3.3.1.3.....	52
Tabela 3. 12 Valores dos impulsos aplicados no contato “a” do item 3.3.1.3.....	52
Tabela 3. 13– Valores de $U_{50\%}$ através do método simplificado <i>up and down</i> do item 3.3.1.3.....	53
Tabela 3. 14 – Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.2.1.....	54
Tabela 3. 15 – Valores dos impulsos aplicados entre a fase e a terra no contato “a” conforme o item 3.3.2.1.....	55
Tabela 3. 16 – Valores de $U_{50\%}$ e desvio padrão $\sigma$ da curva de isolamento do item 3.3.2.1.....	55
Tabela 3. 17 – Valores da condição atmosféricas durante as verificações do item 3.3.2.2.....	56
Tabela 3. 18 – Valores dos impulsos aplicados conforme o item 3.3.1.1.....	56
Tabela 3. 19 – Valores de $U_{50\%}$ e desvio padrão $\sigma$ da curva de isolamento de <i>open-gap</i> do item 3.3.2.2.....	57
Tabela 3. 20 – Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.3.1.....	58
Tabela 3. 21 – Condição de ensaio durante as verificações com impulso atmosférico do item 3.3.3.1.....	58
Tabela 3. 22 – Valores de $U_{50\%}$ e $\sigma$ para as curvas de isolamento de impulso atmosférico do item 3.3.3.1.....	58
Tabela 3. 23 - Condição atmosférica nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.2.....	59
Tabela 3. 24 – Condição de ensaio nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.2.....	59
Tabela 3. 25 – Valores de $U_{50\%}$ e $\sigma$ para as curvas de isolamento de impulso de manobra do item 3.3.3.2.....	60
Tabela 3. 26 - Condição atmosférica nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.3.....	60
Tabela 3. 27 - Condição da chuva para os impulsos de manobra do item 3.3.3.3.....	60
Tabela 3. 28 – Condição de ensaio nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.3.....	61
Tabela 3. 29 – Valores de $U_{50\%}$ e $\sigma$ para curvas de isolamento a impulso de manobra do item 3.3.3.3.....	61
Tabela 4. 1 – Valores de tensão e desvio padrão de curvas de isolamentos do CH1.....	64
Tabela 4. 2 – Valores de tensão e desvio padrão de curvas de isolamentos do CH2.....	67
Tabela 4. 3 - Valores de tensão de curvas de isolamentos para impulso atmosférico do CH3.....	70
Tabela 4. 4 - Valores de tensão de curvas de isolamentos para impulso de manobra a seco do CH3 ..	72

Tabela 4. 5 - Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra a seco.....	73
Tabela 4. 6 - Valores de tensão de curvas de isolamentos para impulso de manobra sob chuva do CH3. .....	75
Tabela 4. 7 - Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra sob chuva.	75

## LISTA DE SIGLAS

- CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco.
- CIGRÉ - Conseil International des Grands Réseaux Électriques.
- UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.
- IEC - International Engineering Consortium.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- SEP - Sistema Elétrico de Potência.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- SPH - Semi Pantográfico Horizontal (tipo de abertura do seccionador).
- DAL - Dupla Abertura Lateral (tipo de abertura do seccionador).
- NBI - Nível Básico de Impulso atmosférico.
- NBM - Nível Básico de impulso de Manobra.

## LISTA DE SIMBOLOS

V, U	Tensão
$U_{50\%}$ , $U_{50}$	Valor médio estatístico das tensões que provocam descargas em uma função de distribuição cumulativa normal ou curva normal cumulativa
$\sigma$	Desvio-padrão na curva normal cumulativa
$U_{50\%}$	Tensão crítica de descarga - CFO (Critical FlashOver voltage)
$k$	Fator de geometria do intervalo na equação de Paris e Cortina
$d$	Comprimento do intervalo de ar
$h$	Altura do condutor ao solo
$k_g$	Fator de geometria do <i>gap</i> na equação de Gallet
$U_{50\%A}$	Tensão crítica de descarga nas condições atmosféricas do ambiente de laboratório
$U_{50\%P}$	Tensão crítica de descarga nas condições atmosféricas de ambiente padrão
$\delta$	Densidade relativa do ar
A	Altitude em km para densidade relativa do ar
$H_C$	Fator de correção devido à umidade relativa do ar
$G_0$	Fator de comprimento de intervalo de ar para correção atmosférica
$m$	Expoente de $\delta$ para correção atmosférica que dependente do $G_0$
$w$	Expoente de $H_C$ para correção atmosférica que dependente do $G_0$
S	Distancia de gap em metros do $G_0$ para na correção atmosférica
$U_{d-50}$	Tensão de descarga com 50 % de probabilidade de falha do isolamento
$U_i$	Valor de tensão que provocou descarga disruptiva no isolamento
$n_i$	Quantidade de descargas que o $U_i$ provocou descargas
$u_0$	Menor valor de tensão do evento mais raro no método <i>up and down</i>
$\Delta u$	Passo de tensão de acréscimo ou decréscimo no método <i>up and down</i>
A	Fator de correção para determinar $U_{50\%}$ e $\sigma$ no método <i>up and down</i>
B	Fator de correção para determinar o desvio padrão no método <i>up and down</i>
$k$	Número de eventos acontecidos no grupo mais raro no método <i>up and down</i>
$i$	Indexador de passo, a partir de 0, do evento (valor de tensão) do grupo mais raro
$k_i$	Número de eventos acontecidos no <i>i</i> ésimo passo no método <i>up and down</i>
FS	Fator de segurança
$P_t, p$	Função de probabilidade de distribuição cumulativa normal
$U_{\min}$	Valor de mínima de tensão de suportabilidade do isolamento
$U_{50}$	Valor de tensão com 50% de disrupção na curva normal cumulativa
$\sigma_d$	Desvio-padrão das tensões disruptivas na curva normal cumulativa
$V_{50\%}, V_{50}$	Valor médio estatístico das sobretensões em um ponto do sistema em uma função densidade de probabilidade normal ou curva normal
$V_{\max}$	Valor máximo de tensão estatística das sobretensões aleatórias de um sistema
$\sigma_s$	Desvio-padrão das sobretensões em uma curva normal
$f_0$	Função densidade de probabilidade das sobretensões
R	Risco de falha ou densidade de probabilidade de falha de isolamento
$T_1$	Tempo de frente de um impulso de tensão
$T_2$	Tempo de cauda de um impulso de tensão
$U_{pk}$	Valor de pico de tensão em um impulso
$C_g$	Capacitância do gerador de impulso
$R_t$	Resistência de cauda

$R_f$	Resistência de cauda
D	Divisor de tensão do tipo RC
HV	Capacitância de alta tensão
$l_v$	Unidade de medição de baixa tensão
K	Cabo coaxial
S	Unidade de atenuação do sinal para o Osciloscópio
OSC	Osciloscópio
f.o.	Unidade de transformação eletro-óptica
TV	Transformador de Tensão
T	Transformador de alta tensão
$V_1, V_2$	Voltímetros
$R_{HV}$	Resistor de proteção para a alta tensão
G	Intervalo de ar de proteção entre eletrodos – gap de proteção
C	Capacitor
P	Pressão atmosférica
$t_s$	Temperatura de bulbo seco
$t_u$	Temperatura de bulbo úmido ou molhado
H	Humidade absoluta
$K_t$	Fator de correção da temperatura
<i>gap</i>	Menor distância elétrica de um isolamento.
<i>dry-arc</i>	Distância elétrica do isolamento de ar e superfície no isolador de porcelana.
<i>open-gap</i>	Distância elétrica do isolamento de ar entre os contatos do seccionador aberto
$V_p, V_{pico}$	Pico da tensão
$V_{teste}$	Valor do pico do impulso de tensão aplicado para teste da suportabilidade
$U_{0,13\%}$	Valor de tensão com probabilidade de 0,13 % de provocar disrupção = $U_{50\%} - 3\sigma$
$U_{10\%}$	Valor de tensão com probabilidade de 10 % de provocar disrupção = $U_{50\%} - 1,28\sigma$
$U_{90\%}$	Valor de tensão com probabilidade de 90 % de provocar disrupção = $U_{50\%} + 1,28\sigma$
$U_{99,87\%}$	Valor de tensão com probabilidade de 99,87 % de provocar disrupção = $U_{50\%} + 3\sigma$
CH1	Seccionador semi-pantográfico de 550 kV, com <i>gap</i> de 4700 mm.
CH2	Seccionador dupla abertura lateral de 245 kV, com <i>gap</i> de 2390 mm.
CH3	Seccionador semi-pantográfico de 550 kV, com <i>gap</i> de 4340 mm.

# SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução .....	14
1.1 Coordenação de isolamento de seccionadores.....	14
1.2 Motivação .....	15
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Organização do trabalho .....	17
Capítulo 2 – Fundamentação teórica .....	19
2.1 Seccionadores .....	19
2.2 Características de isolamento .....	21
2.3 Configuração e valores padronizados para ensaios de seccionadores.....	28
2.4 Avaliação estatística de isolamentos – Método <i>up and down</i> . .....	32
2.5 Coordenação de isolamento.....	35
Capítulo 3 – Materiais e métodos .....	40
3.1 Materiais .....	40
3.2 Métodos gerais.....	42
3.3 Método <i>up and down</i> aplicado nos materiais .....	48
3.3.1 Seccionador CH1 .....	48
3.3.2 Seccionador CH2 .....	53
3.3.3 Seccionador CH3. ....	57
Capítulo 4 – Resultados e análises .....	62
4.1 Análise do seccionador CH1 .....	63
4.2 Análise do seccionador CH2 .....	66
4.3 Análise do seccionador CH3 .....	69
4.3.1 Suportabilidade a impulso atmosférico.....	70
4.3.2 Suportabilidade a impulso de manobra a seco.....	72
4.3.3 Suportabilidade a impulso de manobra sob chuva.....	75
4.4 Comentários gerais .....	77
Capítulo 5 – Conclusão .....	82
5.1 Conclusões.....	82
5.2 Propostas de trabalhos futuros.....	82
REFERÊNCIAS .....	84

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 Coordenação de isolamento de seccionadores

Nos sistemas de transmissão de energia elétrica, em subestações de alta tensão, o equipamento de bloqueio da corrente principal, em geral um disjuntor, não assegura o isolamento entre os circuitos, devido à pequena distância entre os contatos principais após a abertura. Dessa forma, existe sempre a necessidade de ter um seccionador para separação dos circuitos. As distâncias de separação devem ainda garantir que, em condições extremas, quando uma sobretensão atingir o seccionador, caso haja a ocorrência de uma descarga disruptiva, esta sempre ocorra para a terra e nunca entre os contatos elétricos. As configurações dos ensaios de tipo de seccionadores propostos na norma técnica brasileira (NBR IEC 62271-102, 2006) não consideram uma condição de ensaio em que se avaliem a coordenação de isolamento entre os contatos abertos e a distância elétrica de fase-terra dos isoladores. A coordenação de isolamento consiste na seleção de distâncias de isolamento e suportabilidades elétricas adequadas às sobretensões esperadas para o sistema de transmissão e às quais os equipamentos estão submetidos, levando em consideração as características dos dispositivos de proteção disponíveis.

Dois fatores são os responsáveis pela determinação das características dos isolamentos do seccionador: as solicitações elétricas existentes em sua aplicação e o compromisso entre a técnica, avaliada pelo seu desempenho, e a economia, medida pelo seu custo (D'AJUZ et al, 1987). Seria muito dispendioso construir um seccionador que suportasse todas as sobretensões possíveis. Desse modo, a escolha dos isolamentos deve ser realizada de forma que se minimizem os custos e se obtenha uma determinada probabilidade de desligamento do sistema para cada evento transitório, expressa como um risco de falha aceitável.

De forma a racionalizar os projetos dos seccionadores, são elaboradas normas de procedimento e aplicação, visando padronizar cada equipamento de modo a atender as necessidades dos usuários e a capacidade dos fabricantes. Evitam-se dessa maneira projetos especiais para cada equipamento, que acarretariam em custos mais elevados.

Uma das principais funções do seccionador de alta tensão é garantir uma distância segura de isolamento após a abertura do equipamento de bloqueio principal, geralmente um disjuntor, propiciando que equipamentos ou linhas de transmissão, por exemplo, possam ser seguramente isolados. Os disjuntores, por si só, não são capazes de oferecer essa garantia devido à pequena distância de isolamento entre os contatos após a abertura.

Do ponto de vista ainda dielétrico, o seccionador deve ainda garantir a perfeita coordenação de isolamento para a terra e entre contatos abertos (*open-gap*). Dessa forma, ainda que em condições extremas, se uma disrupção for inevitável, ela deverá ocorrer para terra, e nunca entre contatos.

Além das solicitações dielétricas, como tensão suportável à frequência industrial, impulsos atmosféricos e de manobra, o equipamento também deverá ser capaz de operar normalmente sob corrente nominal e suportar os esforços dinâmicos e térmicos de curto-circuito do sistema (FRONTIN et al, 2013).

## 1.2 Motivação

Dentre os trabalhos desenvolvidos na Divisão de Engenharia de Projetos de Subestações - DEPS, na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, existe a atividade do inspetor para acompanhamento de ensaio de tipo de equipamentos de alta tensão, em especial o seccionador.

Anos atrás, quando um seccionador de 550 kV era ensaiado, era inicialmente avaliado com apenas uma fonte de tensão, seja de impulso ou de tensão aplicada à frequência industrial. Recentemente, a avaliação das condições operativas ou de aplicabilidade é feita utilizando-se também duas fontes de alimentação, conforme procedimento da Comissão de Eletrotécnica Internacional - IEC, sendo mais coerente com a função do seccionador no sistema. A IEC recomenda que sejam aplicadas as tensões de 900 kV de impulso de manobra e 450 kV, valor de pico, na frequência industrial. Analisando-se a especificação da CHESF (CHESF, 2012), observa-se que o valor do impulso é de 1050 kV em um terminal, e no outro terminal é aplicada uma tensão a frequência industrial com valor de crista de  $450 \text{ kV}_{\text{max}}$  ( $\sim 319 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ), vindo de uma fonte de alta tensão à frequência industrial, com a base do polo aterrada.

Outro fator de preocupação é o critério de aprovação adotado na especificação da CHESF que incorporou a norma brasileira em vigor. O critério ainda considera aprovado um

seccionador que apresentar até duas disrupções nas quinze aplicações. Caso ocorra uma terceira disrupção, nas três últimas aplicações, o seccionador é considerado também aprovado com a aplicação de mais 3 impulsos.

Como na ocorrência de disrupção existe uma probabilidade de falha associada, um seccionador poderia ser aprovado com confiabilidade baixa. Um exemplo típico de um resultado pode ser dado pelo ensaio onde ocorreram 3 descargas nas 12 primeiras aplicações e mais 1 descarga nas 3 últimas aplicações. O seccionador foi naturalmente reprovado no ensaio. Contudo, se o mesmo seccionador tivesse como resultado de ensaio, 2 descargas nas 12 primeiras aplicações e mais 1 descarga nas 6 próximas aplicações, o seccionador poderia ter sido aprovado. Isso caracteriza um limiar muito pequeno para a aprovação, considerando que as disrupções poderiam ter ocorrido entre os contatos do seccionador. Esse fato iria aumentar o risco de falha para o sistema elétrico e comprometer a segurança das pessoas que estivessem trabalhando na manutenção de um equipamento, como exemplo: a manutenção de um disjuntor, supostamente isolado da parte energizada do sistema elétrico de potência. A partir dessa constatação foi despertado o interesse em estudar a coordenação de isolamento dos seccionadores.

Na Figura 1.1 é mostrado um seccionador de 550 kV em que durante a verificação do isolamento entre contatos ocorreu uma disrupção no *gap*.



Figura 1. 1 - Fotografia de um seccionador com a disrupção dielétrica entre contatos.

## 1.3 Objetivos

Esta dissertação tem os seguintes objetivos:

Objetivo Geral:

- Investigar a coordenação de isolamento de seccionadores isolados a ar.

Objetivos específicos:

- Aprimorar os conhecimentos sobre seccionadores, suas normas e especificações;
- Analisar os ensaios dielétricos de tipo das normas de seccionadores;
- Realizar um levantamento das curvas normais de suportabilidade de isolamento com a utilização do método *up and down*, metodologia consolidada nas técnicas de ensaios em alta tensão (KIND; FESER, 1999);
- Contribuir para melhoria das normas e das especificações.

## 1.4 Organização do trabalho

Com o intuito de se obter os objetivos propostos, este trabalho está organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 apresenta-se de forma resumida a fundamentação teórica básica necessária para o entendimento desta dissertação. Dentre os assuntos abordados, são discutidos os conceitos básicos de seccionadores; o conhecimento sobre as variáveis que determinam a suportabilidade do isolamento e suas propriedades de rigidez dielétrica, considerando fatores geométricos, atmosféricos e a forma de onda dos transitórios de impulsos de tensão; os valores e métodos de referência utilizados nas verificações durante os ensaios dielétricos de tipo de seccionador; o método estatístico *up and down* que faz o levantamento da curva característica de suportabilidade de isolamento, e, por fim, os conceitos e os métodos utilizados para a coordenação de isolamento.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos de verificação de suportabilidade dielétrica dos isolamentos dos seccionadores, informando os circuitos usados em laboratórios de alta tensão, demonstrando os experimentos, para legitimação dos casos

estudados e a verificação da possibilidade da composição de um conjunto mais amplo de análises posteriores.

No Capítulo 4 será feita uma demonstração e comparação dos resultados obtidos nos experimentos, com a legitimação dos casos estudados, análise da coordenação de isolamento de seccionadores, com a representação por gráficos das curvas de cinquenta por cento de descargas disruptivas de isolamentos, das quais fazem parte os resultados alcançados nos estudos de casos desta dissertação.

No Capítulo 5 são feitas conclusões e serão apresentadas as sugestões para linhas de pesquisas em trabalhos futuros.

# Capítulo 2 – Fundamentação teórica

## 2.1 Seccionadores

Os seccionadores são dispositivos elétricos que fazem parte do grupo denominado equipamentos de manobra. Todavia, eles não são um equipamento para interrupção de correntes, exceção feita aos modelos apropriados para manobra sob carga. Contudo, eles, de forma geral, somente podem operar quando houver uma variação insignificante de tensão entre seus terminais ou nos casos de restabelecimento ou interrupção de correntes insignificantes, como os seccionadores com o dispositivo de transferência de barras (FRONTIN at al, 2013).

Na Figura 2.1 são apresentados os principais componentes estruturais nem sempre comuns a todos os modelos, que são: base -1; mecanismo de operação - 2,11,12; coluna de isolador suporte - 3; coluna de isolador rotativo - 4; terminal de conexão -5; lâmina principal - 15, 6,7,8; lâmina de aterramento - 16; contato móvel - 9; contato fixo - 10; hastes de acionamento mecânico - 13, 14; anéis anticorona - próximo aos itens 9 e 10. (D’AJUZ at al, 1985).

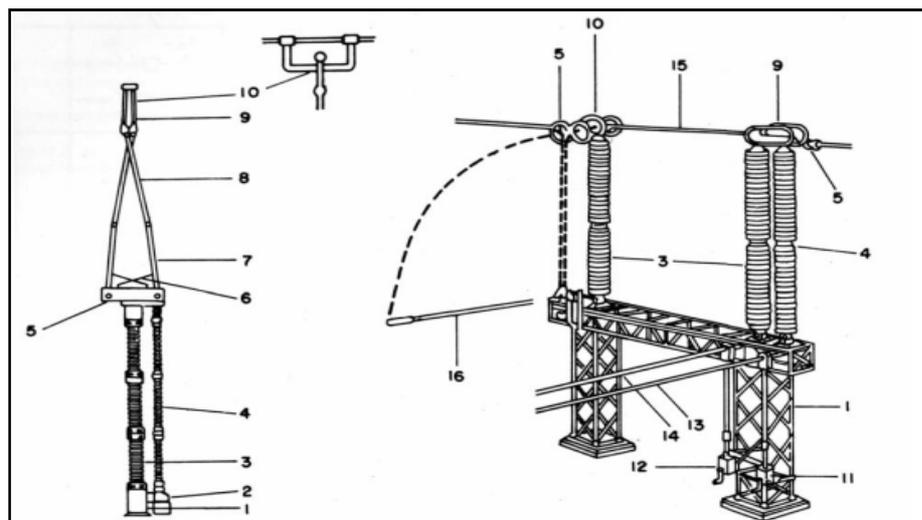


Figura 2. 1 - Componentes de um seccionador de alta tensão (D’AJUZ at al, 1985).

Com a evolução dos modelos de subestação e a falta de espaço físico, os seccionadores foram modificados na sua construção, produzindo um ‘leque’ de diversos tipos

com várias modalidades de aberturas e infindáveis maneiras e modos de instalação. Os principais pontos que influenciam a escolha do tipo construtivo dos seccionadores são: nível de tensão, esquema de manobra, limitação de área ou de afastamento elétrico e tipo padrão utilizado pela empresa. Essas limitações estão permitindo que os seccionadores, que somente utilizavam o ar como meio isolante, utilizem outros elementos como o gás SF<sub>6</sub>, e, assim, permitindo a diminuição de tamanho e integração com outros equipamentos.

Devido a sua variedade de tipos e de configurações (*design*), os seccionadores são um dos equipamentos mais complexos em termos de gestão e projetos de aplicação nas subestações. Além das suas funções normais, eles podem desempenhar as funções para transferência de barras, contornar equipamentos (*by-pass*) e separar circuitos por necessidade operativa ou por necessidade de isolar equipamentos para a realização de manutenção destes.

Nas Figuras 2.2 e 2.3 são mostrados os tipos de seccionadores que foram utilizados para extrair os dados estatísticos que validassem esta dissertação.



Figura 2. 2 - SPH - Semi-Pantográfico Horizontal (FRONTIN at al, 2013)

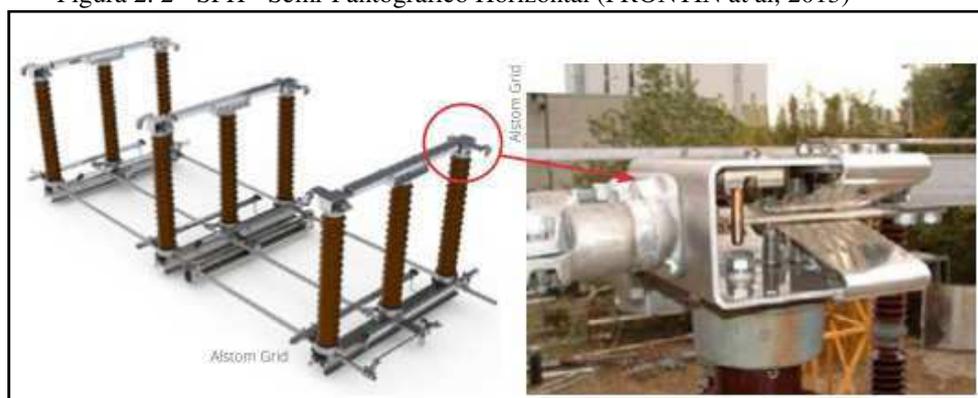


Figura 2. 3 – DAL - Dupla Abertura Lateral e detalhe dos contatos (b) (FRONTIN at al, 2013).

Os seccionadores possuem um determinado conjunto de características que devem ser ponderadas na sua aquisição. Essas características são definidas de acordo com as

solicitações dielétricas e de potência às quais o seccionador será submetido. Dessa forma as principais características técnicas do seccionador são: tensão nominal, frequência nominal, nível de isolamento, corrente nominal, correntes nominais de curto-circuito, esforços mecânicos sobre os terminais e tensão nominal de alimentação dos circuitos auxiliares.

Para comprovar que as características técnicas estão de acordo com as especificações informadas pelos fabricantes, realizam-se os ensaios de tipo, geralmente em laboratórios com grande capacidade de tensão ou níveis altos de corrente, seguindo uma norma de procedimento (ABNT NBR IEC 62271-102, 2006).

Em alguns casos, as especificações técnicas de clientes mostram valores de NBI – Nível Básico de Impulso atmosférico, e NBM – Nível Básico de impulso de Manobra, que parecem não estar em harmonia. Por exemplo, é relativamente comum a solicitação de seccionadores com NBI de 1.550 kV, enquanto ao mesmo tempo solicitam valores de NBM de 1.175 kV (CHESF, 2012). Como o impulso de manobra é muito mais crítico e acontece com muito mais frequência que o impulso atmosférico, precisa-se atender a este quesito para garantir a perfeita coordenação de isolamento. Portanto, um isolador com capacidade de suportar o valor de NBM de 1.175 kV deverá ter altura de 4.000 mm. Esta é a questão, quando elevamos a altura do isolador de 3.350 mm para 4.000 mm, o valor suportável de NBI também sobe, passando agora para o valor de 1.800 kV, contra os 1.550 kV solicitados, acarretando elevação dos valores suportáveis a 60 Hz a seco e sob chuva. Vale lembrar que todos estes valores são relativos à terra, portanto é preciso confirmação de que a suportabilidade de *open-gap* está em concordância com o valor para terra, ou teremos um grande problema de coordenação de isolamento, colocando em risco uma das principais funções do seccionador, que é garantir o isolamento quando em posição aberta (FRONTIN et al, 2013).

## 2.2 Características de isolamento

Os isolamentos são classificados como: isolamentos externos, que utilizam o ar e a superfície vitrificada do isolador como dielétrico, podendo estar submetida às intempéries e aos agentes externos, como insetos, poluição, umidade; e isolação interna, que são as partes internas da isolação sólida, líquida ou gasosa de um equipamento. Outra classificação dos isolamentos diz respeito à característica de autorrecuperação de suas propriedades isolantes,

integralmente, após uma descarga disruptiva provocada pela solicitação elétrica durante a aplicação de uma tensão. Assim, o isolamento do seccionador é um exemplo de isolamento externa e autorrecuperante (D'AJUZ et al, 1987)

As solicitações elétricas são tensões caracterizadas por uma magnitude, uma duração e uma probabilidade de ocorrência. Dessa forma, encontram-se os seguintes tipos de solicitações elétricas verificados em nosso sistema: tensões à frequência industrial, que não excedem a tensão máxima de operação do sistema; sobretensões temporárias; sobretensões manobra e sobretensões atmosféricas.

A suportabilidade de isolamento de um equipamento, que é a propriedade de se opor a descargas disruptivas, também conhecida como suportabilidade dielétrica, é testada através de ensaios dielétricos, para verificar se o equipamento está em conformidade com o nível de isolamento para o qual ele fora projetado. A escolha dos ensaios varia com a faixa de tensão do equipamento, e normas especificam os métodos e os critérios de aprovação, que serão vistos mais adiante.

Os espaçamentos de isolamento apresentam uma probabilidade de falha associada a cada nível de tensão: não há como concluir, deterministicamente, se uma dada sobretensão provocará ou não a descarga disruptiva em um isolamento. Apesar de tentativas de empregar outras distribuições cumulativas, como a de Weibull (IEC 60071-2, 1996), a distribuição cumulativa de Gauss, curva normal, é largamente utilizada e consegue modelar bem a natureza estatística dos isolamentos. No entanto, ela é matematicamente ilimitada no lado dos valores próximo de zero, o que não se sustenta fisicamente, uma vez que baixas tensões nunca provocariam uma descarga. Entretanto, a característica de isolamento mostra-se válida para valores de até cerca de quatro desvios padrão abaixo da tensão crítica de descarga, que é adequada para todas as aplicações de isolamento (HILEMAN, 1999). Nesta dissertação adota-se a distribuição normal para avaliação do isolamento.

A curva característica do valor de tensão disruptiva de um isolamento é representada como uma distribuição cumulativa normal cujo comportamento estatístico é caracterizado pelo valor médio ( $U_{50\%}$ ), chamada de tensão crítica de descarga, e um desvio padrão ( $\sigma$ ), coeficiente de dependência que estabelece o limite de confiança do valor adotado, que depende da forma da onda, polaridade, natureza do dielétrico etc. Geralmente assume-se o valor do limite de confiança, dado em porcentagem de  $U_{50\%}$ , desvio padrão na ordem de 6%

de  $U_{50\%}$  para impulsos de manobra, e 3% de  $U_{50\%}$  para impulso atmosférico, exceto quando recomendação feita em especificação ou norma do equipamento (D'AJUZ at al, 1987).

O valor de  $U_{50\%} + 3\sigma$  tem uma probabilidade 99,86% de acontecer disrupção, enquanto que o valor de  $U_{50\%} - 3\sigma$  tem uma probabilidade 0,14% de acontecer disrupção no isolamento. Assim os valores de impulso de tensão acima de  $U_{50\%} + 3\sigma$  são chamados de tensão de impulso de descarga disruptiva do isolamento, e os valores abaixo de  $U_{50\%} - 3\sigma$  são definidos como tensão de impulso suportável do isolamento (KIND, FESER, 1999).

Na Figura 2.4 é apresentada uma curva de distribuição gaussiana com as probabilidades de descargas da isolação para representar a suportabilidade do isolamento dos equipamentos.

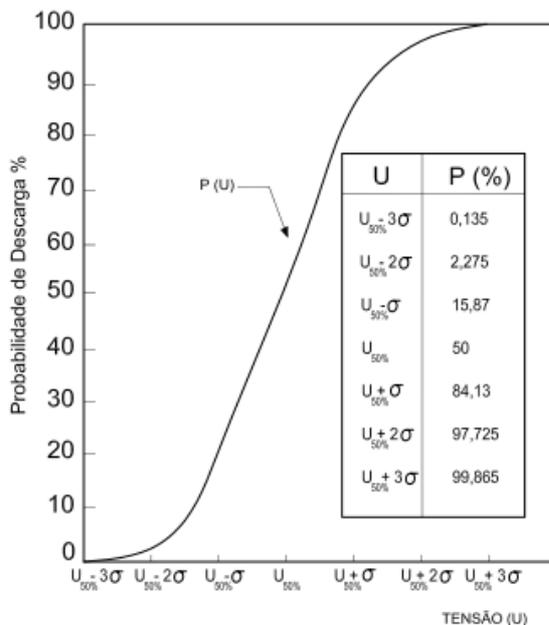


Figura 2. 4 - Probabilidade de descarga da Isolação. (D'AJUZ at al, 1987).

## 2.2.1 Fatores do isolamento fase-terra

A suportabilidade de intervalos de ar a impulsos de polaridade negativa é superior a impulsos de polaridade positiva em configurações de campo elétrico não uniforme. Desse modo, por contribuírem muito pouco no risco de falha, o efeito das sobretensões negativas é geralmente desconsiderado (WATANABE, 1967; PARIS, CORTINA, 1968).

O efeito da forma de onda e particularmente a duração do tempo de frente de onda da sobretensão alteram os níveis de suportabilidade dos isolamentos. Vários experimentos têm

mostrado que existe um tempo de frente de onda crítico para o qual a suportabilidade de um dado intervalo de ar é mínima (WATANABE, 1967; PARIS, CORTINA, 1968; CARRARA, DELLERA, SARTORIO, 1970; HARADA, AIHARA, AOSHIMA, 1973; MENEMENLIS, ISAKSSON, 1974; LLOYD, ZAFFANELLA, 1982). Na Figura 2.5 é mostrado que as curvas de variação da tensão de 50% de probabilidade de falha apresentam-se na forma U, e que o tempo de frente de onda crítico aumenta com o tamanho do intervalo de ar.

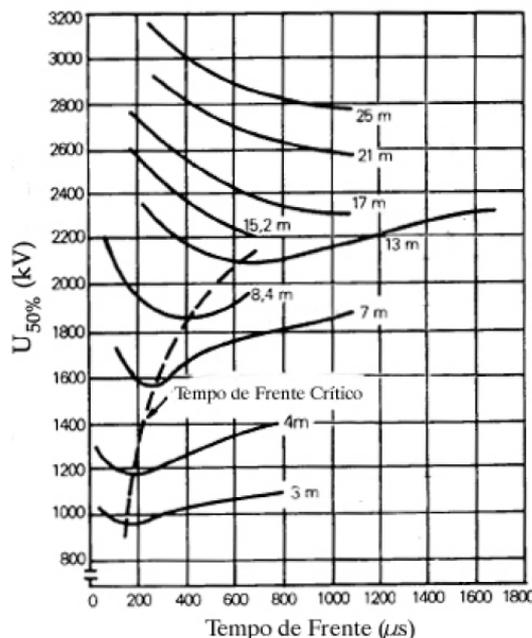


Figura 2. 5 – Variação da suportabilidade do *gap* para um arranjo ponta-plano em função da frente de onda (LLOYD; ZAFFANELLA, 1982).

O efeito da chuva é maior para a polaridade negativa. Embora em alguns casos a suportabilidade possa ser menor do que a apresentada para surtos positivos, admite-se que a polaridade positiva implica sempre menores tensões de descarga. Deve-se ressaltar ainda que a diminuição no valor de  $U_{50\%}$  pode chegar a 30% em isoladores levemente contaminados expostos à chuva (LLOYD; ZAFFANELLA, 1982).

Para que ocorra a descarga, é necessário que a duração da sobretensão exceda um tempo estatístico de dispersão e um tempo de propagação do canal ionizado. Para tempos de frente de onda críticos, a descarga se dá próxima ao pico; para tempos menores, ocorre na cauda, e, para tempos maiores, na frente da onda. Outra característica importante no formato das ondas são os ressaltos, que podem impor reduções expressivas na suportabilidade.

Paris e Cortina foram os primeiros pesquisadores a mostrar que gráficos de tensão  $U_{50\%}$  em função do comprimento do intervalo de ar fornecem curvas com o mesmo formato para diferentes configurações de eletrodos, e que as curvas podem ser relacionadas por meio

de um fator específico à geometria básica ponta-plano, que possui a menor suportabilidade (PARIS, 1967; PARIS, CORTINA, 1968). Assim, nos artigos, os autores propuseram a seguinte equação:

$$U_{50\%}(d) = k 500 d^{0,6} \quad (2.1)$$

sendo  $k$  o fator de geometria do intervalo determinado experimentalmente e  $d$ , a distância do intervalo de ar entre as partes condutoras mais próximas em metros.

Na Figura 2.6 é mostrado o gráfico de  $U_{50\%} \times d$  para várias curvas identificadas por números e ao lado é mostrada a tabela que relaciona os números das curvas com os diferentes tipos de eletrodos e valores de  $k$ .

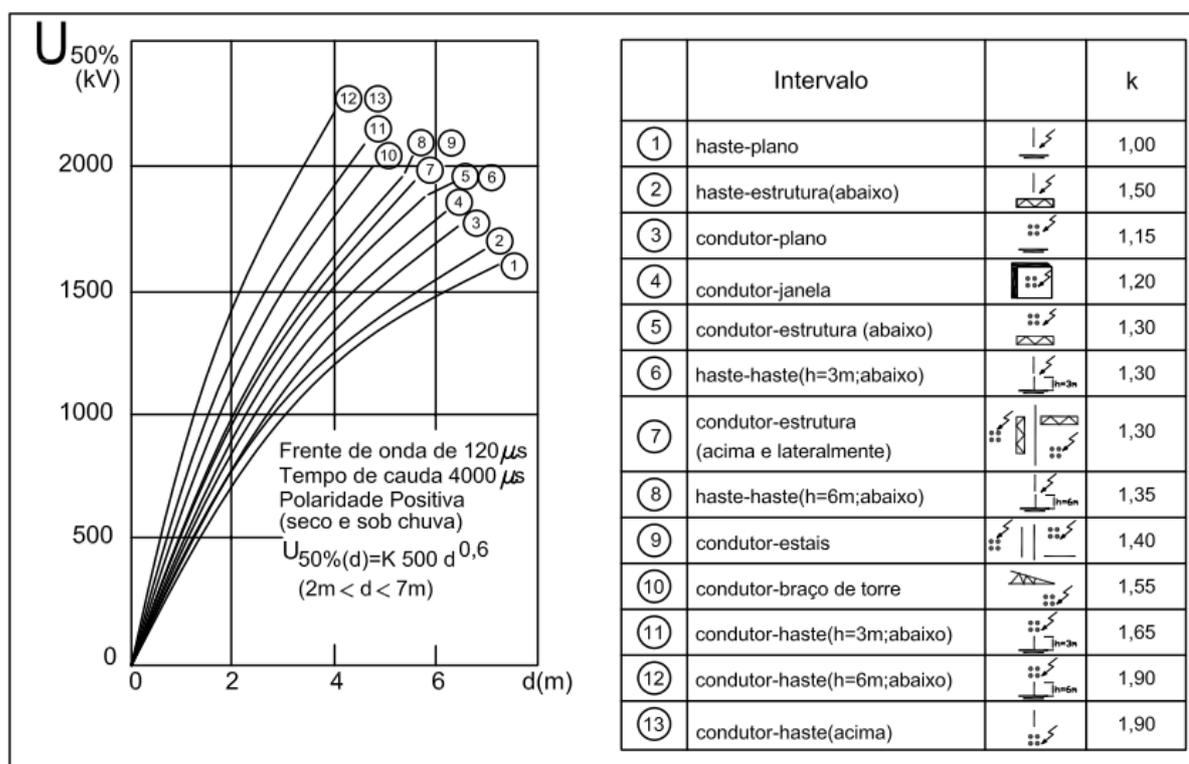


Figura 2. 6 - Fatores de geometria do intervalo determinados por Paris e Cortina (PARIS; CORTINA, 1968).

A equação apresentada, no entanto, reflete os experimentos dos autores supracitados realizados com duplas exponenciais de  $120 \mu s$  de tempo de frente. Posteriormente, Gallet et al sugeriram a Equação 2.2 (GALLET et al, 1975), abaixo descrita, para o cálculo de  $U_{50\%}$  para o tempo de frente crítico. A equação é válida para intervalos de ar de até 15 metros aproximadamente.

$$U_{50\%}(d) = k_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{d}} \quad (2.2)$$

Para subestações o valor prático de  $K_g$  é 1,3, todavia um fator mais baixo de 1,1 pode ser utilizado. Para isoladores suporte de pedestal, o fator de *gap* utilizado para condições de chuva é 1,18 aplicado na Equação 2.2 (HILEMAN, 1999).

A presença de ferragens na parte ativa de um isolador modifica o comportamento dos isolamentos (CIGRÉ, 1984). Isso pode ser verificado, por exemplo, através de experimentos que introduzem pequenas proeminências no plano aterrado para as geometrias ponta-plano e condutor-plano. No seccionador, para dimensões que o anel anticorona adentrou ao isolamento alterando a distribuição de campo ao seu redor e, por dar uma uniformidade de campo elétrico, aumenta a distância elétrica de isolamento. Na Figura 2.7 é apresentado um exemplo de como a inserção de eletrodos equalizadores faz uma melhor distribuição do campo elétrico.



Figura 2. 7 – Influência de ferragens no isolamento (FRONTIN at al, 2013).

A presença de isoladores distorcendo o campo elétrico provoca uma pequena redução no valor da suportabilidade (PARIS, 1967). Lloyd e Zaffanella sugerem uma redução de 5% na suportabilidade para isoladores verticais limpos e secos (LLOYD; ZAFFANELLA, 1982), enquanto o Grupo de Trabalho 33.03 do Comitê de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), admite diferentes reduções percentuais de acordo com a geometria do intervalo (CIGRÉ, 1984).

Uma vez que a não há diferença significativa de suportabilidade dielétrica para testes de impulso atmosférico com e sem chuva, não há necessidade de registro de valores para estes tipos de impulso de tensão sob chuva (HILEMAN, 1999).

As condições atmosféricas influem diretamente no comportamento de disrupção dos intervalos de ar. A menor pressão do ar, como ocorre em regiões de maiores altitudes, diminui a suportabilidade. Quando se analisa a umidade do ar, observa-se que sua presença perto do saturamento eleva a suportabilidade dielétrica, enquanto que, para umidade relativa do ar abaixo de 70%, a suportabilidade diminui com o aumento da umidade.

A Equação 2.3 fornece a relação entre as tensões críticas de descarga em condições-padrão e condições reais.

$$U_{50\%A} = \delta^m H_c^w U_{50\%P} \quad (2.3)$$

sendo  $U_{50\%A}$  é a tensão nas condições atmosféricas do ambiente de laboratório fora do padrão,  $U_{50\%P}$  é a tensão nas condições atmosféricas do ambiente padrão,  $\delta$  é a densidade relativa do ar,  $H_c$  é o fator de correção devido à umidade relativa do ar, e  $m$  e  $w$  são expoentes que dependente do comprimento do intervalo de ar, conforme mostrado na Figura 2.8.

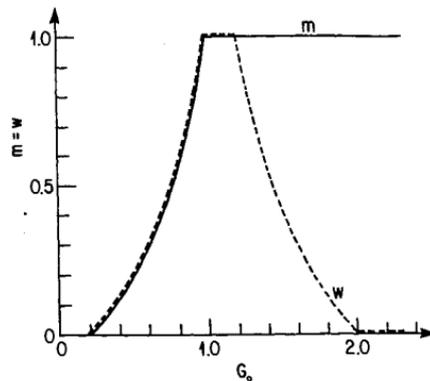


Figura 2. 8 - Expoente de ajuste da Equação 2.3 em função do intervalo de ar (HILEMAN, 1999).

O fator de correção devido à umidade relativa do ar -  $H_c$  é definido na equação:

$$H_c = 1 + 0,0096 \left[ \frac{H}{\delta} - 11 \right] \quad (2.4)$$

em que,  $H$  é a umidade absoluta em  $g/m^3$ . A umidade absoluta é obtida das leituras das temperaturas de bulbo seco e úmido (HILEMAN, 1999).

Na Figura 2.8, o fator de comprimento de intervalo  $G_0$  é definido na equação:

$$G_0 = \frac{U_{50\%S}}{500 S} \quad (2.5)$$

em que,  $S$  é a distância do gap em metros. O valor de  $m$  e  $w$  é igual a 1, para impulso atmosférico em que  $1,0 < G_0 < 1,2$ , e para impulso de manobra em que  $0,2 < G_0 < 1,0$ , o  $m = w = 1,25G_0 (G_0 - 0,2)$ .

Como a densidade relativa do ar é função da pressão e temperatura, conseqüentemente é também função da altitude, assim  $\delta = 0,997 - 0,106A$ , em que A é a altitude em km (HILEMAN, 1999).

## **2.3 Configuração e valores padronizados para ensaios de seccionadores**

Para evitar a elaboração de projetos especiais para cada equipamento e diversas formas de ensaiá-los acarretando custos mais elevados, são elaboradas normas técnicas com guias, procedimento e aplicação e, desse modo, padronizar cada equipamento buscando atender as necessidades dos usuários e a capacidade dos fabricantes.

Desde os anos 30, a avaliação de desempenho das isolações frente às sobretensões é feita através de ensaios com o impulso atmosférico e de manobra normalizados. O impulso atmosférico é caracterizado pela sua amplitude, que depende da classe de tensão do equipamento, e dos seus tempos de frente (1,2  $\mu$ s) e de cauda (50  $\mu$ s). O tempo de frente é definido como 1/0,6 vez o intervalo de tempo entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de crista na curva de tensão de ensaio. Enquanto que o tempo de cauda, ou tempo até meio valor, é definido como o intervalo entre a origem virtual e o instante no qual a curva de tensão de ensaio tenha decrescido até a metade do valor da tensão de ensaio (ABNT NBR IEC 60060-1, 2013).

O impulso de manobra é caracterizado pela sua amplitude e por uma onda que atinge seu valor máximo em 250  $\mu$ s, tempo de frente, e decai à metade do seu valor em 2500  $\mu$ s, tempo até o meio valor.

Sabe-se que os ensaios dielétricos de tipo são feitos para verificação do dimensionamento das distâncias elétricas no projeto de um seccionador. Assim são feitos todos os ensaios dielétricos para aprovação do isolamento do seccionador, nas configurações indicadas pela norma que também especificam os métodos e os critérios de aprovação (ABNT NBR IEC 60694, 2006). Na Figura 2.9, junto com a Tabela 2.1, estão mostradas de forma representativa as configurações para ensaios de um polo de seccionador, em que: “A” representa o terminal do contato móvel, “a” representa o terminal do contato fixo e “F”

representa a base do polo do seccionador. Salientando que as posições 6 e 7 somente são exigidas para tensões nominais maiores e iguais a 300 kV.

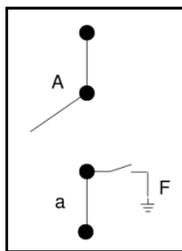


Figura 2. 9 - Representação do polo de um seccionador para os ensaios dielétricos.

Tabela 2. 1- Configurações do polo de um seccionador para os ensaios dielétricos.

POSIÇÃO	SECCIONADOR	IMPULSO	60 Hz	ATERRAMENTO	SEM CONEXÃO
1	Fechado	Aa	-	F	-
2	Aberto	A	-	aF	-
3	Aberto	a	-	AF	-
4	Aberto	a	-	A	F
5	Aberto	A	-	a	F
6	Aberto (BIAS)	A	a	F	-
7	Aberto (BIAS)	a	A	F	-

Como o nível de isolamento do seccionador caracteriza a suportabilidade dielétrica do equipamento às solicitações elétricas nos ensaios dielétricos, assim, para um determinado nível de isolamento, existem valores que os isolamentos deverão suportar durante os ensaios. Existem basicamente três tipos de ensaios dielétricos:

- **Ensaio de tensão suportável de curta duração à frequência industrial.**

Neste teste é aplicado um valor de sobretensão à frequência industrial, em relação à tensão normal de operação existente na norma ou especificação técnica. O equipamento deve suportar durante um intervalo de tempo especificado, geralmente não superior a 1 minuto, sem apresentar nenhuma descarga em condições a seco e/ou sob chuva. Este tempo de 1 minuto é uma margem de segurança muito grande em relação ao tempo de duração da maior parte das sobretensões temporárias. Vale salientar que existe o nível de escoamento, que é o perímetro em mm da superfície do isolador em contato com o ar. Esse nível de escoamento reflete o grau de poluição ao qual o equipamento estará exposto em sua aplicação final. A poluição altera a rigidez dielétrica fase-terra do seccionador sob chuva.

- **Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico.** Neste Ensaio, chamado de 2/15, é aplicada uma série de 15 impulsos atmosféricos normalizados, para cada polaridade e em cada configuração de ensaio, conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 62271-102,

2006). O valor de pico do impulso atmosférico de tensão é o valor do NBI do seccionador, que é o valor para o qual o seccionador tem 90% de probabilidade de suportar, ou seja, só podem ocorrer 2 descargas disruptivas na isolação submetida às 15 aplicações. Como a suportabilidade da isolação ao impulso atmosférico é pouco afetada pela chuva, esta deve ser especificada apenas a seco.

- **Ensaio de tensão suportável de impulso de manobra.** Assim como na tensão de impulso atmosférico, o valor da tensão também é conhecido como o valor de NBM do isolamento do seccionador, que é o valor de crista para o qual o seccionador tem 90% de probabilidade de suportar. Neste teste também são aplicados 15 impulsos de manobra normalizados, para cada polaridade e em cada configuração de ensaio, a seco e sob chuva, já que a suportabilidade ao impulso de manobra, principalmente na superfície dos isoladores, tende a se enfraquecer sob elevada precipitação, conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 62271-102, 2006). Eles são exigidos para tensões nominais maiores e iguais a 300 kV.

Nas Tabelas 2.2 e 2.3, contidas da norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), mostram-se os valores de tensão suportável para as condições atmosféricas de referência normalizadas (ABNT NBR IEC 60060-1, 2013). Assim, a própria norma informa e orienta quanto aos valores de tensão para a coordenação de isolamento que os seccionadores devem suportar entre fase e terra: “valor comum”, e entre contatos abertos: “entre a distância de seccionamento” (IEC-71-1, 1993; IEC-71-2, 1996).

Tabela 2. 2 - Níveis de isolamento nominal informados na norma brasileira NBR IEC 60694 – Tabela 1a.

Tensão nominal $U_r$ kV (eficaz)	Tensão suportável nominal de curta duração à frequência industrial $U_d$ kV (eficaz)		Tensão suportável nominal de impulso atmosférico $U_p$ kV (crista)	
	Valor comum	Entre a distância de seccionamento	Valor comum	Entre a distância de seccionamento
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3,6	10	12	20	23
			40	46
7,2	20	23	40	46
			60	70
12	28	32	60	70
			75	85
17,5	38	45	75	85
			95	110
24	50	60	95	110
			125	145
36	70	80	145	165
			170	195
52	95	110	250	290
72,5	140	160	325	375
100	150	175	380	440
	185	210	450	520
123	185	210	450	520
	230	265	550	630
145	230	265	550	630
	275	315	650	750
170	275	315	650	750
	325	375	750	860
245	360	415	850	950
	395	460	950	1 050
	460	530	1 050	1 200

Tabela 2. 3 - Níveis de isolamento nominal informados na norma brasileira NBR IEC 60694 – Tabela 2a.

Tensão nominal $U_r$ kV (eficaz)	Tensão suportável nominal de curta duração à frequência industrial $U_d$ kV (eficaz)		Tensão suportável nominal de impulso de manobra $U_s$ kV (crista)			Tensão suportável nominal de impulso atmosférico $U_p$ kV (crista)	
	Fase-terra e entre fases (nota 3)	Entre contatos abertos do dispositivo de manobra e/ou entre distância de seccionamento (nota 3)	Entre fase e terra e entre dispositivo de manobra aberto	Entre fases (notas 3 e 4)	Entre distância de seccionamento (notas 1, 2 e 3)	Fase-terra e entre fases	Entre contatos abertos do dispositivo de manobra e/ou entre distância de seccionamento (notas 2 e 3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
300	380	435	750	1 125	700 (+ 245)	950	950 (+ 170)
			850	1 275		1 050	1050 (+ 170)
362	450	520	850	1 275	800 (+ 295)	1 050	1 050 (+ 205)
			950	1 425		1 175	1 175 (+ 205)
420	520	610	950	1 425	900 (+ 345)	1 300	1 300 (+ 240)
			1 050	1 575		1 425	1 425 (+ 240)
550	620	800	1 050	1 680	900 (+ 450)	1 425	1 425 (+ 315)
			1 175	1 760		1 550	1 550 (+ 315)
800	830	1 150	1 300	2 210	1 100 (+ 650)	1 800	1 800 (+ 455)
			1 425	2 420		2 100	2 100 (+ 455)

NOTA 1 A coluna (6) é também aplicável a alguns disjuntores; ver IEC 60056.

NOTA 2 Na coluna (6), os valores entre parênteses são os valores de crista da tensão à frequência industrial  $U_r \sqrt{2} \sqrt{3}$ , aplicada ao terminal oposto (tensão combinada).

Na coluna (8), os valores entre parênteses são valores de crista da tensão à frequência industrial 0,7  $U_r \sqrt{2} \sqrt{3}$ , aplicada ao terminal oposto (tensão combinada).

Ver anexo D.

NOTA 3 Os valores da coluna (2) são aplicáveis:

- para ensaios de tipo fase-terra,
- para ensaios de rotina fase-terra, fase-fase e entre contatos abertos do dispositivo de manobra.

Os valores das colunas (3), (5), (6) e (8) são aplicáveis somente para ensaios de tipo.

NOTA 4 Esses valores são derivados dos fatores multiplicadores apresentados na tabela 3 da IEC 60071-1.

## 2.4 Avaliação estatística de isolamentos – Método *up and down*.

Os valores medidos para determinação experimental da rigidez dielétrica de isolamentos são de natureza aleatória e podem mostrar dispersão apreciável, dependendo do material isolante e da configuração dos eletrodos de teste. Então, para análise adequada de medições, métodos estatísticos devem ser aplicados, cujos resultados podem ser representados

de uma maneira simples e clara, e podem também ser facilmente comparados com outros resultados (HAUSCHILD; MOSCH, 1992).

Conforme visto no item 2.2, a característica de isolamento das tensões disruptivas de uma configuração de eletrodos é bem representada por uma distribuição normal, caracterizada pelo seu valor médio e o desvio padrão.

Quando somente a tensão de descarga disruptiva de 50% de um *gap* é necessária, ela pode ser determinada com um mínimo de tempo e com uma exatidão confiável utilizando o método *up and down*. A tensão de descarga disruptiva de 50% pode então ser determinada usando a Equação 2.6. Mesmo para uma quantidade de vinte amostras, o método fornece uma estimativa com um alto grau de confiança, dentro da faixa de probabilidade de descarga disruptiva entre  $P(U) = 30\%$  e  $P(U) = 70\%$  (KIND; FESER, 1999).

$$U_{d-50} = \frac{\sum n_i U_i}{\sum n_i} \quad (2.6)$$

Todavia, para a análise experimental de pesquisa, necessita-se da curva característica de isolamento das tensões de descargas disruptivas de 50% dos isolamentos de um seccionador. Deve-se, então, executar as análises e comparações. Assim, utilizando o método *up and down* e as equações propostas por Dixon (DIXON, MASSEY, 1969; DIXON, MOOD, 1984), tem-se uma exatidão elevada para a curva dos isolamentos, com as estimativas de seu valor médio e desvio padrão.

O método consiste em varias aplicações de impulsos de tensão em que o valor de tensão é inicialmente aumentado em passos de uma amplitude fixada em  $\Delta u$ , que deve ser em torno de 3% do provável valor de tensão de descarga (KIND, FESER, 1999; HILEMAN, 1999). A partir de um valor inicial  $u_{00}$ , em que, com certeza, nenhuma descarga ocorre, até que a primeira descarga ( $U_{\ell}$ ) aconteça em uma tensão  $u_{11}$ , conforme Figura 2.10. A tensão é então reduzida de  $\Delta u$ . Se nenhuma descarga acontecer na tensão  $u_{12}=u_{11}-\Delta u$ , a tensão de teste deve ser aumentada em  $\Delta u$ , caso contrário, deve ser reduzida de  $\Delta u$ . O processo é repetido até um número predeterminado  $n$  de valores de tensão  $u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n}$ , ser obtido. A determinação do valor da tensão de  $U_{50\%}$  e o desvio padrão  $\sigma$  são baseados nos eventos de interrupção, ou não interrupção, que mais raramente ocorrem nas  $n$  tensões aplicadas. Assim, este evento ocorre  $k$  vezes durante o curso do teste de  $n$  aplicações de surtos, e o evento complementar acontece  $q$  vezes, de modo que  $n=k+q$ . Para avaliação do teste, os  $n$  valores de tensão  $u_i$  são classificados de acordo com a sua magnitude. O índice  $i = 0$  é colocado no passo  $u_i$  para aquela menor

tensão em que o primeiro evento mais raro ocorre. Aos demais passos maiores são dados os índices:  $i = 1, 2, \dots, r$ , em que  $r$  é o maior valor de tensão do evento mais raro (HAUSCHILD; MOSCH, 1992). Na Figura 2.10 é mostrado o plano de teste (a) e a aplicação do método (b, c), em que:  $n$  é o tamanho da amostragem,  $k$  é o número de eventos de descargas do grupo de disrupção D e  $q$  é o número de eventos sem descargas do grupo de não disrupção N.

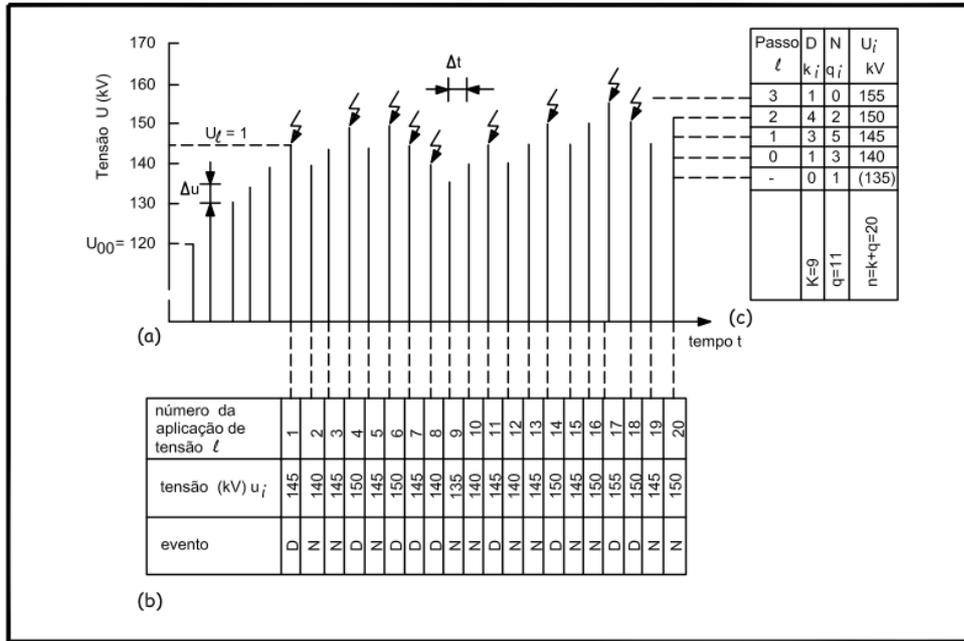


Figura 2. 10 - Método *up and down* de Dixon e Mood (DIXON; MOOD, 1984).

A tensão de descarga de  $U_{50\%}$  pode ser estimada usando a equação 2.7:

$$U_{50\%} = u_0 + \Delta u \left( \frac{A}{k} \pm 0,5 \right) \quad (2.7)$$

em que:  $A = \sum_{i=1}^r i k_i$ ,  $k_i$  é o número de eventos acontecidos no  $i$ ésimo passo. Se os eventos que aconteceram foram de descarga, o sinal da Equação 2.7 é negativo; no caso de não disrupção, ele é positivo. O desvio padrão  $\sigma$  é estimado usando a equação:

$$\sigma = 1,62 \Delta u \left( \frac{kB - A^2}{k^2} + 0,029 \right) \quad (2.8)$$

sendo:  $B = \sum_{i=1}^r i^2 k_i$ .

O resultado da estimativa do valor da tensão de  $U_{50\%}$  e do desvio padrão  $\sigma$  é influenciado pela amplitude escolhida  $\Delta u$ , associada à primeira tensão de descarga  $u_1$ . Assim, quanto menor for o  $\Delta u$  escolhido, em relação ao desvio padrão exato da população de

amostras, menor será a tensão  $u_{11}$ , e menor a probabilidade  $p_1$ , em que ocorre a primeira disrupção (KUCERA, 1972). Existe também o método *up and down* estendido, colocado em prática por Carrara & Deller, em 1972 (CARRARA, HAUSCHILD, 1999; ABNT NBR IEC 60060-1, 2013). Baseado no princípio de que o método pode ser aplicável para m aplicações de tensão de um mesmo valor de passo de tensão, necessitando-se de um grande número de aplicações para garantir o efeito da maior exatidão, em relação ao método de Dixon (HAUSCHILD, MOSCH, 1992).

## 2.5 Coordenação de isolamento

A definição de coordenação de isolamento em sua forma mais simples e fundamental é a seleção da rigidez dos isolamentos. Já a norma (IEC 71-1, 1993) diz que a coordenação de isolamento é a seleção da rigidez dielétrica dos equipamentos em relação às tensões que podem aparecer no sistema para o qual os equipamentos se destinam, levando em conta o ambiente de serviço e as características dos dispositivos de proteção disponíveis.

A norma de coordenação de isolamento (IEC 71-2, 1996) mostra que os níveis de isolamento das tensões nominais devem ser escolhidos considerando o grau de exposição às sobretensões, de frente rápida e frente lenta, o tipo de aterramento do neutro do sistema e o tipo de dispositivos limitadores de tensão.

Basicamente, existem dois métodos para determinação da coordenação de isolamento em função das sobretensões de manobra e atmosféricas: o método convencional, ou determinista, e o método estatístico, ou probabilístico.

O método de coordenação de isolamento mais simples é o método convencional, cujo desconhecimento acerca do risco de falha envolvido torna-o apropriado para isolamentos não autorrecuperativos, que não admitem probabilidade de disrupção.

O método convencional consiste basicamente em utilizar uma margem de segurança, ou fator de segurança – FS, sobre o valor máximo de sobretensão imposta ao isolamento, de modo que a mínima tensão de suportabilidade do isolamento seja igual ou maior que este valor. Em geral é utilizado o valor de 1,15 para surtos de manobra, e 1,25 para surtos atmosféricos. Assim o nível de isolamento é determinado de forma a obter uma margem suficientemente segura, destinada a cobrir as incertezas na obtenção desses valores, e nenhum esforço é feito no sentido de se obter o risco de falha da isolação (D'AJUZ at al, 1987).

Dessa forma temos as seguintes expressões:

$$U_{min} \geq \text{NBI} = 1,25 \times V_{m\acute{a}x} \quad \text{e} \quad (2.9)$$

$$U_{min} \geq \text{NBM} = 1,15 \times V_{m\acute{a}x} \quad (2.10)$$

Conforme visto no item 2.2 e 2.4, o comportamento estatístico do isolamento é bem representado por uma curva de distribuição cumulativa normal, mostrada na Figura 2.4, e caracterizada pelos valores de tensão de  $U_{50\%}$  e do desvio padrão  $\sigma$ , e expressa pela Equação 2.11:

$$p = F(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^V e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{V-U_{50\%}}{\sigma}\right)^2} dV \quad (2.11)$$

em que  $F(V)$  é a probabilidade de ruptura quando a tensão  $V$  é aplicada ao isolamento.

Vale lembrar que o valor limite da integração de menos infinito é fisicamente impossível, uma vez que tensões próximas de zero não causam ruptura. As tensões capazes de provocar descarga são aquelas com valores maiores que  $4\sigma$  abaixo de  $U_{50\%}$ , ou seja,  $F(V) = 0$  para  $V \leq (U_{50\%} - 4\sigma)$  (ANJO, KISHIJIMA, OHUCHI, SIZUKI, 1968).

Aplicando o método convencional para um isolamento autorrecuperante, e considerando que: o FS é 1,15, o valor máximo de sobretensão é  $V_{50\%} + 2,05\sigma_s (=V_{m\acute{a}x})$ , e o valor de mínima tensão de suportabilidade do isolamento é praticamente  $U_{50\%} - 3\sigma_d (=U_{min})$ , tem-se que (D'AJUZ at al, 1987):

$$U_{50\%}(1 - 3\sigma_d) \geq 1,15 \times [V_{50\%}(1 + 2,05\sigma_s)] \quad (2.12)$$

Na Figura 2.11 é mostrado o método convencional de coordenação de isolamento levando em consideração a Equação 2.11 e 2.12.

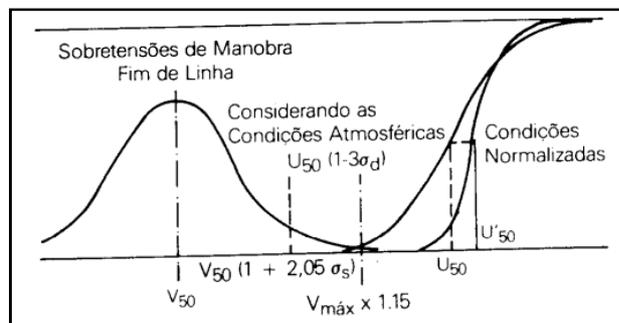


Figura 2. 11 - Método convencional de coordenação de isolamento (DÁJUZ at al, 1987).

O método estatístico traduz-se por calcular o risco de falha, através de uma análise numérica de natureza estatística, da distribuição cumulativa da suportabilidade do isolamento e da densidade de probabilidade das sobretensões previstas, ou calculadas, para o sistema em análise. Este método é apropriado à isolação autorrecuperante, na qual a distribuição da suportabilidade de isolamento é representada pela distribuição gaussiana, caracterizada pelo seu valor de 50% de probabilidade  $U_{50\%}$  e o desvio padrão  $\sigma_d$ . A Figura 2.13 mostra a distribuição de suportabilidade de isolamento -  $P_t(U)$ , destacando o valor NBM, que corresponde a 10% na distribuição de suportabilidade.

Para quantificar o número médio esperado de falhas por ano de um isolamento, deve-se considerar todos os eventos que possam dar origem às sobretensões e que podem afetar o isolamento. Somente as ocorrências identificadas como estatisticamente homogêneas podem ser combinadas em uma única distribuição. As amplitudes de sobretensões assumidas como homogêneas são identificadas pelo mesmo local, causa, polaridade e forma de onda, sendo estas associadas a impulsos atmosféricos, ou de manobra, de polaridade positiva.

Assim a distribuição das sobretensões é representada por uma distribuição gaussiana, caracterizada pelo seu valor de 50% de probabilidade -  $V_{50\%}$ , e o desvio padrão -  $\sigma_s$ . A Figura 2.12 mostra a distribuição das sobretensões -  $f_0(U)$ , destacando  $V_{m\acute{a}x}$ , como probabilidade de referência o valor de 2%, ou seja, valores maiores que  $V_{m\acute{a}x}$  ocorrem em 2% das sobretensões.

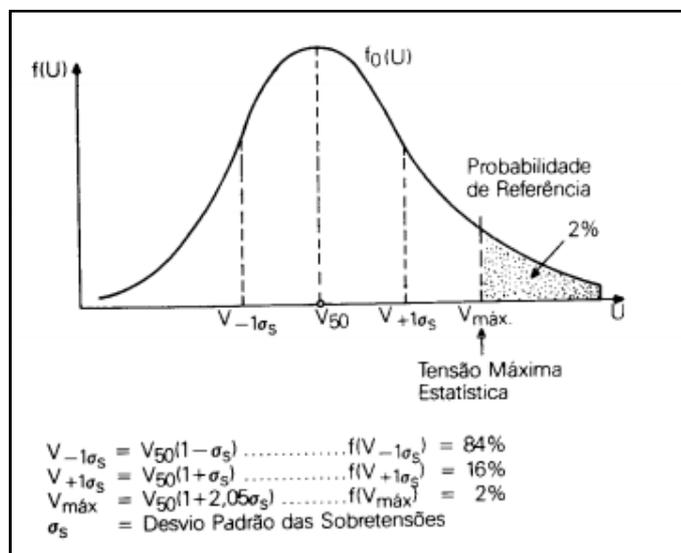


Figura 2. 12 - Distribuição das sobretensões -  $f_0(U)$  ( D'AJUZ at al, 1987).

A densidade de probabilidade de falha de isolamento para uma determinada distribuição de sobretensões, isto é, o risco de falha - R, será então:

$$R = \int_0^{\infty} f_0(U) \cdot P_t(U) \cdot dU \quad (2.13)$$

em que: R é o risco de falha,  $P_t(U)$  é a densidade de probabilidade da suportabilidade do isolamento e  $f_0(U)$  é a função densidade de probabilidade das sobretensões.

Assim, assumindo que  $P_t(U)$  e  $f_0(U)$  não sejam correlacionados, a Equação 2.13 mostra o princípio geral do método estatístico, pelo qual a probabilidade de falha pode ser estimada. Na Figura 2.13, é mostrado o método estatístico de coordenação de isolamento, em que o risco de falha é a área hachurada.

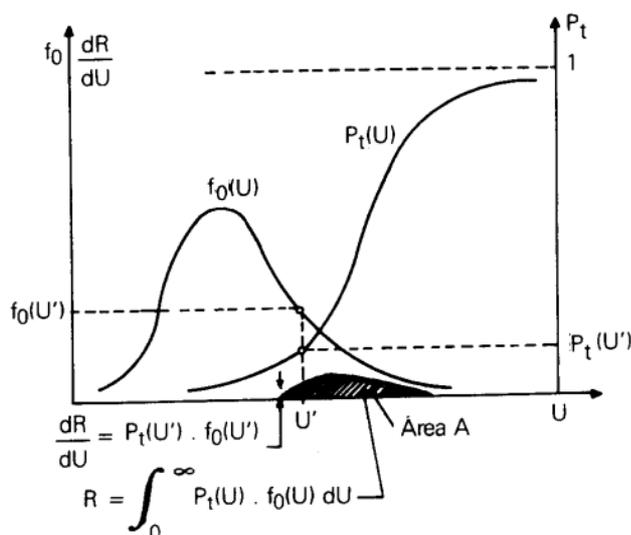


Figura 2. 13 – Avaliação do risco de falha de um isolamento (DÁJUZ at al, 1987).

Em geral, as distâncias dos isolamentos de seccionadores são definidas pela suportabilidade de tensão de impulsos de manobra e atmosféricos (HILEMAN, 1999). Assim, os isolamentos fase-terra e entre contatos de um seccionador são testados pelos ensaios dielétricos normalizados.

Conforme item 2.3, através dos ensaios “15/2” de suportabilidade de impulsos, verifica-se que os valores de  $U_{10\%}$  fase-terra e  $U_{10\%}$  de *open-gap* são maiores que os valores normalizados da suportabilidade fase-terra (valor comum) e entre a distância de seccionamento. Dessa forma, a norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006) nos guia quanto a um valor de coordenação de isolamento que os seccionadores deverão ter, e são esses valores que deverão ser utilizados como referência nos testes dos seccionadores. Porém este ensaio 15/2 não confirma que o valor de  $U_{10\%}$  de *open-gap* é maior que o valor de  $U_{10\%}$  fase-terra, e também não verifica a diferença entre eles.

Muitos problemas de coordenação de isolamento estão relacionados com a proteção de um *gap* de ar por meio de outro *gap*. Como por exemplo, a proteção do isolamento externo

de uma bucha por meio de um *gap* de haste, em especial na proteção do espaço entre contatos de um seccionador por meio do isolamento fase-terra do isolador suporte, etc. Gianguido Carrara verificou o aspecto estatístico de coordenação de isolamento entre dois gaps, quando estudou as tensões causadas por impulsos de manobra, a dispersão inerente das características dielétricas do *gap* de ar, ou seja, a probabilidade de disrupção e o tempo para disrupção. Nesta abordagem aplicaram-se de forma profunda os conceitos dos métodos estatísticos. (CARRARA, 1965).

O ensaio do método *up and down* com 30 impulsos fornece os valores de  $U_{50\%}$  junto com os valores de desvios padrão dos isolamentos. Então o levantamento das curvas características dos isolamentos fase-terra e *open-gap* nos dará a definição da existência de coordenação de isolamento do seccionador, e verificará qual a diferença de tensão que existe entre o valor de  $U_{10\%}$  de *open-gap* e o valor de  $U_{10\%}$  fase-terra a que a norma se refere.

Carrara e Delleria verificaram o risco de falha na suportabilidade da isolação fase-terra do seccionador, e o risco de falha na suportabilidade da isolação no “gap” do seccionador, para verificar se um isolamento está protegendo outro (CARRARA, DELLERA, 1966). A avaliação e comparação do risco de falha dos isolamentos mostram a existência de coordenação de isolamento de um seccionador, calculada pela distribuição da frequência de ocorrência das sobretensões em um ponto qualquer de um sistema, onde será aplicado o equipamento.

Quando, na verificação do risco de falha de um sistema fechado, cujo valor da sobretensão é único  $U_1$ , ou seja, a densidade de probabilidade fica sendo  $f_0(U_1) = 1$ , o risco de falha será igual ao valor da probabilidade da curva de suportabilidade  $P_t(U)$ , na Figura 2.13 (D’AJUZ et al, 1987). Assim, nos ensaios dielétricos, o risco de falha dos isolamentos testados é a própria curva de suportabilidade do isolamento, para o impulso de tensão, polaridade e forma de onda que esteja sendo aplicado.

# Capítulo 3 – Materiais e métodos

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados na aplicação da metodologia proposta para a verificação da coordenação de isolamento do seccionador, e para proposição da construção de procedimento de ensaio para realizar essa verificação.

Os ensaios realizados são para verificação da suportabilidade dielétrica do seccionador para um determinado nível de tensão. São testes com aplicação de: tensão suportável a frequência industrial, impulsos de sobretensões de manobra, impulsos de sobretensões atmosféricas e, para tensões acima de 300 kV, aplicação do método de verificação dielétrica usando duas fontes de tensão. Esses ensaios não verificam a coordenação de isolamento do seccionador existente entre o isolamento longitudinal (entre contatos) e entre as partes ativas e a terra do seccionador aberto.

Os experimentos foram realizados em vários laboratórios de extra-alta tensão.

## 3.1 Materiais

Para a validação das técnicas propostas são utilizados:

- 01 seccionador de 550 kV, tipo: Montagem Horizontal Semi-Pantográfico Abertura Horizontal – MHSPH, com NBI de 1760 kV e NBM de 1300 kV – **CH1**;
- 01 seccionador de 245 kV, tipo: Montagem Horizontal Dupla Abertura Lateral – MHDAL, com NBI de 1050 kV – **CH2**;
- 01 seccionador de 550 kV, tipo: Montagem Horizontal Semi-Pantográfico Abertura Horizontal – MHSPH, com NBI de 1550 kV e NBM de 1175 kV – **CH3**;

Na Figura 3.1 é visualizada a fotografia do Seccionador CH1 de tensão nominal 550 kV, objeto de teste, posicionado no circuito experimental com o auxílio de um suporte isolante e sua estrutura metálica.



Figura 3. 1 - Fotografia de um seccionador de 550 kV pronto para ser ensaiado.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as principais características elétricas dos seccionadores. Os valores visualizados para os seccionadores foram obtidos através da informação dos fabricantes. Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características físicas dos seccionadores CH1, CH2 e CH3.

Tabela 3. 1 – Características elétricas nominais do seccionador.

Dados Técnicos	CH1	CH2	CH3
Frequência de Operação	50 Hz	50 Hz	60 Hz
Corrente Nominal	4000 A	2000 A	3150 A
Corrente nominal de curto circuito simétrico	50 kA	50 kA	40 kA
Pico da Corrente de curto circuito assimétrico	130 kA	130 kA	104 kA
Tensão nominal	550 kV	252 kV (245 kV)	550 kV
Tensão suportável a frequência industrial a seco e sob chuva	740 kV	460 kV	650 kV
Tensão suportável de Impulso de manobra	1300 kV	- x -	1175 kV
Tensão suportável de Impulso Atmosférico	1675 kV	1050 kV	1550 kV

Tabela 3. 2 – Características físicas dos Seccionadores.

Dados Técnicos	CH1	CH2	CH3
Tipo do Seccionador	SPH	DAL	SPH
Distância de arco a seco	4140 mm	2080 mm	3850 mm
Distância de escoamento	13750 mm	6125 mm	13750 mm
Distância entre os anéis que protegem os contatos	4700 mm	2390 mm	4340 mm
Peso	1610 kg	770 Kg	1406 kg

Na Figura 3.2 é visualizado o desenho técnico e diagramático do seccionador CH1 de 550 kV, com a indicação de suas dimensões entre contatos e fase-terra.

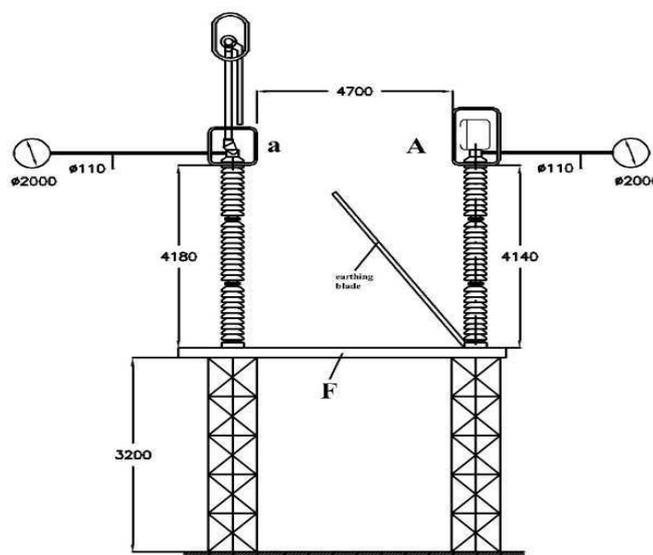


Figura 3. 2 - Desenho diagramático com as indicações das dimensões do seccionador de 550 kV.

## 3.2 Métodos gerais

Nesta seção são descritos os ensaios de tipo dielétricos de seccionadores. Os ensaios são regidos pelas normas brasileiras (ABNT NBR IEC 60694, 2006; ABNT NBR IEC 62271-102, 2006; ABNT NBR IEC 60060-1, 2013). O mesmo arranjo experimental foi utilizado para levantamento das curvas características de isolamento dos seccionadores. Os ensaios foram realizados com a utilização dos métodos de uma e de duas fontes, que serão descritos nos itens 3.2.2 e 3.2.3 a seguir. Em quaisquer das situações sempre são utilizadas as formas de onda normalizadas (ABNT NBR IEC 60060-1, 2013).

### 3.2.1 Materiais de laboratórios e formas de ondas

Para execução dos ensaios de tipo dielétricos normalizados e das verificações de isolamento dos seccionadores, em laboratórios de extra-alta tensão, são utilizados: um gerador de impulso de tensão de manobra ou atmosférico, uma fonte à frequência industrial com um transformador de alta tensão e uma mesa de controle para realização do controle da tensão e captação dos sinais de tensão para registro.

Na Figura 3.3 são mostrados um gerador de impulso e um transformador de alta tensão.



Figura 3. 3 – Fotografias de Gerador de impulso de tensão (a) e Transformador de alta tensão (b).

Nas Figuras 3.4 e 3.5 são observadas as formas de onda de impulsos atmosférico e de manobra, respectivamente, para verificação do nível de isolamento durante os ensaios de tipo dielétricos.

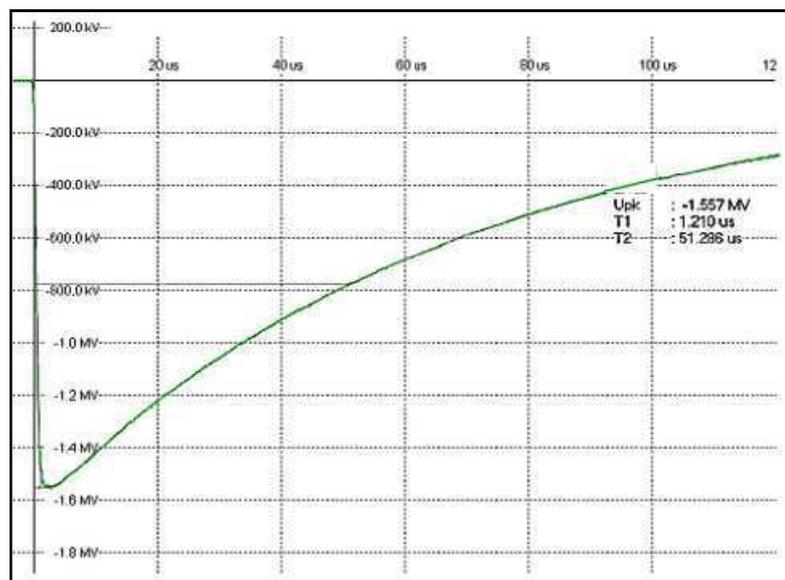


Figura 3. 4 - Forma de onda do impulso atmosférico de tensão, polaridade negativa, aplicada no seccionador - Valor do pico da tensão:  $U_{pk} = -1557 \text{ kV}$ , tempo de frente:  $T1 = 1,21 \text{ }\mu\text{s}$  e tempo de cauda:  $T2 = 51,2 \text{ }\mu\text{s}$ .

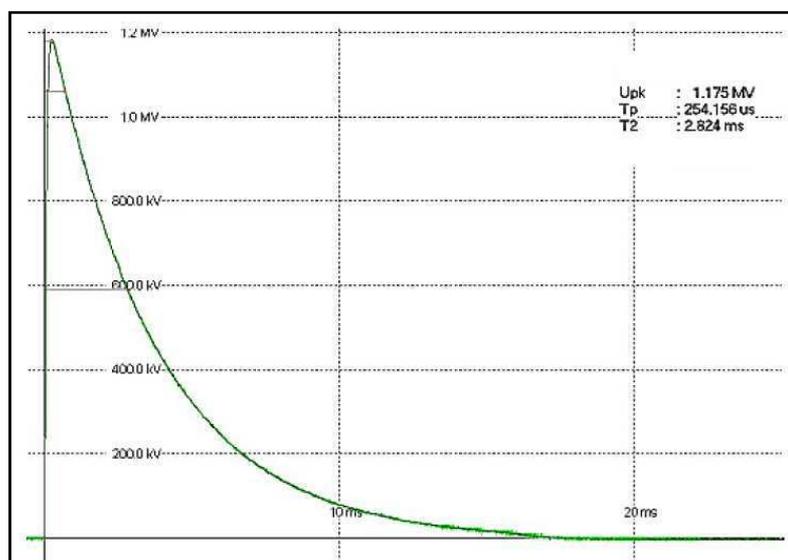


Figura 3. 5 - Forma de onda do impulso de manobra de tensão, polaridade positiva, aplicada no seccionador - Valor do pico da tensão:  $U_{pk} = 1175 \text{ kV}$ , tempo de frente:  $T_p = 254 \text{ }\mu\text{s}$  e tempo de cauda:  $T2 = 2824 \text{ }\mu\text{s}$ .

### 3.2.2 Ensaios com uma fonte de tensão

Os ensaios para verificação de suportabilidade dielétrica do seccionador foram realizados utilizando-se como referência o diagrama esquemático do arranjo experimental observado na Figura 3.6.

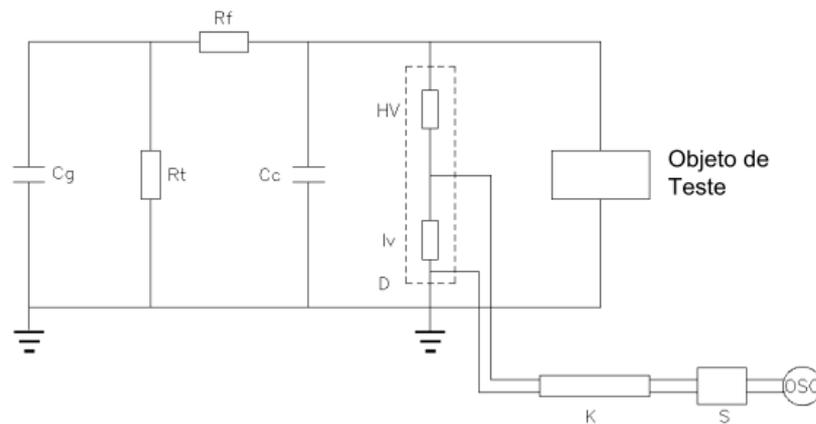


Figura 3. 6 - Arranjo experimental A, utilizando uma fonte de gerador de impulso de tensão.

O sistema de medição e controle do gerador de tensão de impulso do laboratório de extra-alta tensão utilizado no CH1 é composto por vários equipamentos e materiais, circuito A, descritos abaixo:

- $C_g$  – Capacitância do Gerador de impulso: 24 unidades de 20,8 nF x 100 kV;
- $R_t$  – resistência de cauda de 3120  $\Omega$  (24 x 130  $\Omega$ );
- $R_f$  – resistência de frente de 559  $\Omega$  (6 x 30  $\Omega$  + 18 x 30/22  $\Omega$  + 150  $\Omega$ (ext.));
- $D$  – divisor de tensão do tipo RC com um fator de relação de 1 / 47455;
- $HV$  – Capacitância de alta tensão 330 pF;
- $I_v$  – Unidade de medição de baixa tensão;
- $K$  – Cabo coaxial;
- $S$  – unidade terminal de atenuação de sinal para o osciloscópio;
- $OSC$  – Osciloscópio tipo TDS 460 A.

O circuito é composto por uma mesa de controle, um gerador de impulso de tensão de Marx, o que é bem descrito por Kind e Feser (KIND; FESER, 1999), com 24 estágios de 100 kV/estágio, em que cada estágio é formado por um capacitor de alta tensão em paralelo com um resistor de cauda e em série com um resistor de frente de onda ( $C_g = 20,8 \text{ nF}$  (100

kV) e  $R_t = 147,35 \text{ k}\Omega$ , e  $R_f = 71,23 \text{ k}\Omega$ ). A alteração dos resistores tem influência na constante de tempo RC do circuito, que define a forma de onda do impulso de tensão com uma capacitância de alta tensão de  $HV = 330 \text{ pF}$ , em paralelo com o objeto de teste. Em seguida temos um capacitor de carga que serve para ensaios de objetos que tenham uma impedância baixa. No entanto, ele não é utilizado, pois o seccionador tem uma elevada rigidez dielétrica. A partir daí, temos um divisor de tensão “D” em paralelo com o objeto de teste, para medição da queda de tensão na unidade de baixa tensão através do componente “lv” do divisor capacitivo tipo RC. A coleta do sinal é feita por um cabo coaxial para um osciloscópio digital com memória tipo Tektronix TDS 460A.

### 3.2.3 Ensaios com duas fontes de tensão

Os ensaios para verificação de suportabilidade dielétrica utilizando o método de duas fontes foram realizados aplicando impulsos de tensão em conjunto com uma fonte de alta tensão à frequência industrial aplicada no terminal oposto àquele em que fora aplicado o impulso de tensão. Todavia, o disparo do impulso de tensão é sincronizado para ser aplicado no valor máximo do semiciclo de tensão senoidal, oposto à polaridade do impulso de tensão (ABNT NBR IEC 60060-1, 2013).

Na Figura 3.7 é mostrado o diagrama esquemático do arranjo experimental com os principais componentes do laboratório utilizados nos testes.

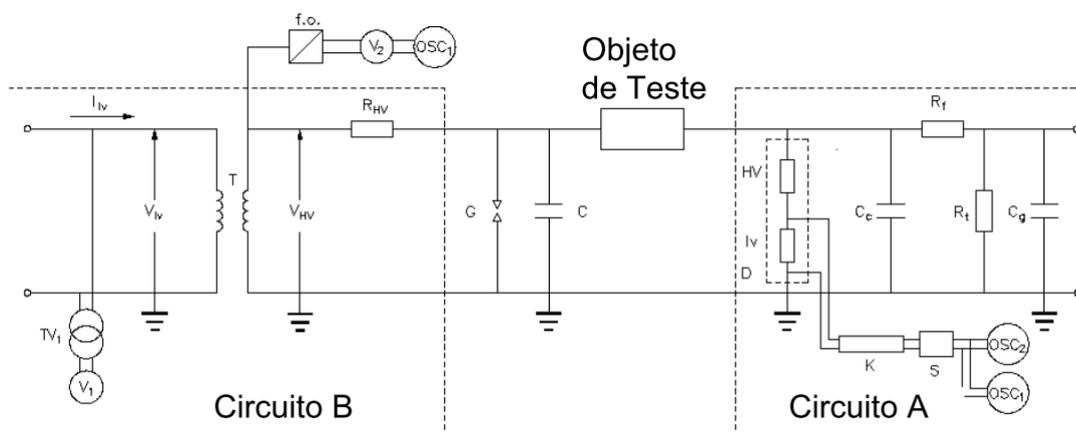


Figura 3. 7 - Arranjo experimental A e B, utilizando duas fontes de tensão para testes dielétricos.

O circuito é composto por uma mesa de controle, que faz a sincronização do impulso de tensão com o sinal senoidal proveniente do sistema de medição por fibra óptica utilizando-se de um osciloscópio digital com memória tipo Nicolet.

Na medição ou aquisição da tensão aplicada ao objeto de teste utilizou-se de um divisor de tensão misto. Na aquisição do sinal de tensão utilizou-se um cabo coaxial com um atenuador de sinal antes do osciloscópio.

O sistema de medição e controle do gerador de impulso de tensão de manobra do laboratório de extra-alta tensão utilizado no CH1 é composto por vários equipamentos e materiais, que formam o circuito A, descrito abaixo:

- $C_g$  – Capacitância do Gerador de impulso: 24 unidades de 20,8 nF x 100 kV;
- $R_t$  – resistência de cauda de 147,35 k $\Omega$  (24 x 6,4 k $\Omega$ );
- $R_f$  – resistência de frente de 71,23 k $\Omega$  (30  $\Omega$  + 2x2 k $\Omega$  + 21x3,2 k $\Omega$ );
- D – divisor de tensão do tipo RC com um fator de relação de 1 / 48564;
- HV – Capacitância de alta tensão 330 pF;
- $I_v$  – Unidade de medição de baixa tensão;
- K – Cabo coaxial;
- S – unidade terminal de atenuação de sinal para o osciloscópio;
- OSC<sub>1</sub> – Osciloscópio tipo Nicolet (canal 2);
- OSC<sub>2</sub> – Osciloscópio tipo TDS 460 A.

O sistema de medição e controle do transformador de alta tensão à frequência industrial do laboratório, circuito B, é composto por vários equipamentos e componentes, descritos abaixo:

- TV<sub>1</sub> – Transformador de tensão tipo CGS => relação de 6000 / 100;
- T – Transformador de alta tensão, booster, tipo MWB de 2 MVA => relação de 6000 V / 800 kV – 2 unidades;
- f.o. – unidade de transformação eletro-óptica para leitura direta da tensão;
- V<sub>1</sub> e V<sub>2</sub> – Voltímetros – modelo: Fluke 179;
- OSC<sub>1</sub> – Osciloscópio tipo Nicolet (canal 1);
- R<sub>HV</sub> – Resistor de proteção PASSONI & VILLA: 1k $\Omega$  – 3A;
- G – *gap* de proteção de 1200 mm;
- C – Capacitor Icar com capacitância de 10 nF.

### **3.3 Método *up and down* aplicado nos materiais**

Todos os seccionadores com os valores aqui apresentados foram aprovados nos ensaios de tipo. Todavia, após as verificações recomendadas pela norma brasileira e IEC, foi feito um levantamento da curva característica do isolamento de cada seccionador utilizando o método *up and down*.

#### **3.3.1 Seccionador CH1**

Para determinar a suportabilidade dielétrica e a tensão crítica de descarga dos isolamentos do seccionador CH1, foram feitos no laboratório de extra-alta tensão os ensaios de tipo e as verificações do isolamento do seccionador, que é do tipo SPH 550 kV. O seccionador foi aprovado durante as verificações de suportabilidade dielétrica para seu nível de isolamento.

Os ensaios de tipo foram realizados conforme arranjo experimental da Figura 3.6 e 3.7, com o sistema de medição e controle do gerador de impulso de tensão de impulso de manobra do laboratório de extra-alta tensão.

Após a conclusão dos ensaios de tipo, foi feito o levantamento da curva de suportabilidade do isolamento do seccionador através do método *up and down*. Inicialmente foram aplicados 30 impulsos de tensão com uma fonte de impulso de tensão na forma de onda padrão de manobra, positivo, que é o mais crítico neste nível de tensão. Posteriormente foram aplicados apenas 20 impulsos de tensão com duas fontes de tensão, visando diminuir o risco de danificar a fonte de alta tensão à frequência industrial.

Assim foram feitos os registros para levantamentos das curvas característica de isolamento do seccionador CH1 para verificação da coordenação de isolamento cujos valores registrados são apresentados a seguir.

##### **3.3.1.1. Isolamento fase-terra do CH1, a seco.**

Foram aplicados 30 impulsos no contato fixo “a” do seccionador na posição aberto. Com o outro contato móvel “A” e a base do polo aterrados, estas aplicações foram feitas com

o seccionador no estado seco, conforme a Figura 2.9. Para o arranjo experimental do item 3.2.2, na condição de teste número 3 da Tabela 2.1, do Capítulo 2. As condições ambientais são mostradas na Tabela 3.3, e obtiveram os valores indicados na Tabela 3.4.

Tabela 3. 3 - Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.1.1.

Condições atmosféricas e fator de correção			
P	$t_s / t_u$	H	$K_t$
kPa	°C	g / m <sup>3</sup>	---
100,9	10,5	3,6	0,98

Tabela 3. 4 - Valores dos impulsos aplicados usando o método *up and down* no contato “a” do item 3.3.1.1.

Tensão Aplicada kV / Nº do impulso	1370	1445	1505	1565
1				X
2			O	
3				X
4			O	
5				X
6			O	
7				X
8			X	
9		O		
10			X	
11		X		
12	O			
13		O		
14			O	
15				X
16			X	
17		O		
18			O	
19				X
20			O	
21				X
22			O	
23				X
24			O	
25				X
26			O	
27				X
28			X	
29		X		
30	O			

O – sem interrupção; X – com interrupção;

Para os valores acima e aplicando a Equação 2.6, e considerando o desvio padrão como 6% de  $U_{50\%}$  foram determinados os valores apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Valores de  $U_{50\%}$  através do método simplificado *up and down* do item 3.3.1.1.

<b><math>U_{50\%}</math> não corrigido:</b> $U_{50\%NC} = \Sigma U \times N / \Sigma N = 1506 \text{ kV}$		<b><math>U_{50\%}</math> corrigido:</b> $U_{50\%C} = U_{50\%NC} / K_t = 1537 \text{ kV}$			<b><math>U_{10\%} = U_{50\%C} (1-1,3\sigma) =</math> <math>U_{50\%C} (1-1,3 \times 0,06) = 1417 \text{ kV}</math></b>	
Tensão aplicada – U	1370	1445	1505	1565		
Quantidade de impulsos aplicados – N	2	5	13	10	$\Sigma N$	30
U x N	2740	7225	19565	15650	$\Sigma U \times N$	45180

Caso se aplicasse as Equações 2.7 e 2.8 aos valores da Tabela 3.4, teria como resultado o valor de  $U_{50\%} = 1550 \text{ kV}$  e o valor de desvio padrão  $\sigma = 54,9 \text{ kV}$ . Dessa forma foram utilizados a Equação 2.6 e o valor de desvio padrão de 6% por apresentarem valores de tensão disruptiva mais conservativos.

### 3.3.1.2. Isolamento fase-terra do CH1, sob chuva.

Com o arranjo experimental do item 3.2.2, foram feitas mais 30 aplicações de impulsos de tensão no contato fixo “a” do seccionador na posição aberto, e com o outro contato móvel “A” aterrado, porém com o seccionador na condição: sob chuva, conforme a Figura 2.9, para na condição de teste número 3 da Tabela 2.1, do Capítulo 2. As condições ambientes são mostradas na Tabela 3.6, as condições da chuva foram mostradas na Tabela 3.7 e obtiveram os valores da Tabela 3.8.

Tabela 3.6 – Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.1.2.

<b>Condição atmosférica e fator de correção</b>			
P	$t_s/t_u$	H	$K_t$
kPa	$^{\circ}\text{C}$	$\text{g}/\text{m}^3$	---
99,97	11/5	---	1,01

Tabela 3.7 – Valores da condição da chuva durante a realização das verificações do item 3.3.1.2.

<b>Condição da chuva</b>					
	taxa média de chuva (mm/min)			Temperatura da água	Resistência da água
	Contato Móvel	<i>Open-gap</i>	Contato fixo	$^{\circ}\text{C}$	$\Omega * \text{m}$
vertical	1,4	1,6	1,4	5	100
horizontal	1,2	1,2	1,2		

Tabela 3. 8 – Valores dos impulsos aplicados no contato “a” entre fase-terra d o item 3.3.1.2.

Nº do impulso	Tensão Aplicada (kV)				
	1384	1440	1498	1555	1613
1		X			
2	O				
3		O			
4			X		
5		O			
6			O		
7				X	
8			O		
9				X	
10			O		
11				O	
12					X
13				X	
14			O		
15				X	
16			O		
17				X	
18			O		
19				X	
20			X		
21		O			
22			O		
23				X	
24			X		
25		O			
26			X		
27		O			
28			O		
29				X	
30			X		

O – sem interrupção; X – com interrupção;

Para os valores acima e aplicando a Equação 2.6, e considerando o desvio padrão como 6% de  $U_{50\%}$  foram determinados os valores apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3. 9 – Valores de  $U_{50\%}$  através do método simplificado *up and down* do item 3.3.1.2.

<b><math>U_{50\%}</math> não corrigido:</b> $U_{50\%nc} = \Sigma U \times N / \Sigma N = 1503,5 \text{ kV}_{\text{pico}}$		<b><math>U_{50\%}</math> corrigido: <math>U_{50\%c} =</math></b>			<b><math>U_{10\%} = U_{50\%c} (1-1,3\sigma) = 1489 (1-1,3 \times 0,06) U_{10\%} = 1372 \text{ kV}_{\text{pico}}</math></b>		
U tensão aplicada	1384	1440	1498	1555	1613		
Nº de impulsos aplicados	1	6	13	9	1	$\Sigma N$	30
U x N	1384	8640	19474	13995	1613	$\Sigma U \times N$	45106

Caso se aplicasse as Equações 2.7 e 2.8 aos valores da Tabela 3.4, teria como resultado o valor de  $U_{50\%} = 1570 \text{ kV}$  e o valor de desvio padrão  $\sigma = 52,1 \text{ kV}$ . Dessa forma foram utilizados a Equação 2.6 e o valor de desvio padrão de 6% por apresentarem valores de tensão disruptiva mais conservativos.

### 3.3.1.3. Isolamento *open-gap* do CH1, sob chuva.

Para esta verificação foram feitas apenas 20 aplicações de impulso visando não danificar o transformador de alta tensão, que, apesar de ter um *gap* de proteção ponta-ponta, o risco de uma falha na isolação existe. Os impulsos de tensão foram aplicados no contato fixo “a” do seccionador na posição aberto. Foi aplicada a tensão senoidal de pico complementar de 515 kV<sub>pico</sub> à frequência industrial no outro contato móvel “A”. Porém a base de polo “F” aterrada e o seccionador na condição sob chuva, conforme a Figura 2.9. Para a condição de teste número 7 da Tabela 2.1, do Capítulo 2. As condições ambientes são mostradas na Tabela 3.10, as condições da chuva são mostradas na Tabela 3.11, obtendo os valores da Tabela 3.12.

Tabela 3. 10– Valores da condição atmosférica durante as verificações do item 3.3.1.3.

Condição atmosférica e fator de correção			
P	t <sub>s</sub> /t <sub>u</sub>	H	K <sub>t</sub>
kPa	°C	g/m <sup>3</sup>	
101,67	11/5	---	1,02

Tabela 3. 11 – Valores da condição da chuva durante a realização do item 3.3.1.3.

Condição da chuva					
	taxa média de chuva (mm/min)			Temperatura da água	Resistência da água
	Contato Móvel	<i>Open-gap</i>	Contato fixo	°C	Ω * m
vertical	1,4	1,6	1,4	5	100
horizontal	1,2	1,2	1,2		

Tabela 3. 12 Valores dos impulsos aplicados no contato “a” do item 3.3.1.3.

Nº do impulso	Tensao Aplicada kV			
	1388	1438	1495	1554
1		X		
2	O			
3		O		
4			X	
5		O		
6			O	
7				X
8			X	
9		X		
10	O			
11		O		
12			X	
13		O		
14			O	
15				X
16			O	
17				X
18			O	
19				X
20			X	

O – sem disrupção; X – com disrupção;

Para os valores mostrados na Tabela 3.12 acima, aplicando as Equações 2.6 e considerando o desvio padrão como 6% de  $U_{50\%}$ , foram verificados os valores apresentados na Tabela 3.13. Salienta-se que a tensão completa existente no *open-gap* foi a soma de módulo das tensões de pico do semiciclo negativo e do impulso de tensão aplicado no terminal oposto. O valor médio das tensões de pico do gerador de impulso foi igual a 1479  $kV_{pico}$ , corrigido pelo coeficiente de condições atmosféricas: 1450  $kV_{pico}$ , e somado ao valor de tensão senoidal de pico complementar de 515  $kV_{pico}$ . Assim o valor total de tensão entre contatos foi de  $U_{50\%} = 1965 kV_{pico}$ , cujo valor de  $U_{10\%}$  é 1851  $kV_{pico}$ .

Tabela 3. 13– Valores de  $U_{50\%}$  através do método simplificado *up and down* do item 3.3.1.3.

<b><math>U_{50\%}</math> não corrigido:</b> $U_{50\%nc} = \Sigma U \times N / \Sigma N = 1479 kV_{pico}$	<b><math>U_{50\%}</math> corrigido: <math>U_{50\%c} =</math></b>				<b><math>U_{10\%} = U_{50\%c} (1-1,3\sigma) = 1450 (1-1,3x0,06)</math></b>	
	<b><math>U_{50\%nc} / K_t = 1450 kV_{pico}</math></b>				<b><math>U_{10\%} = 1336 kV_{pico}</math></b>	
U tensão aplicada	1388	1438	1495	1554		
Nº de impulsos aplicados	2	6	8	4	$\Sigma N$	20
$U \times N$	2776	8628	11960	6216	$\Sigma U \times N$	29580

Caso se aplicasse as Equações 2.7 e 2.8 aos valores da Tabela 3.4, teria como resultado o valor de  $U_{50\%} = 1418 kV$  e o valor de desvio padrão  $\sigma = 52,5 kV$ . Dessa forma foram utilizados a Equação 2.6 e o valor de desvio padrão de 6% por apresentarem valores de tensão disruptiva mais conservativos.

### 3.3.2 Seccionador CH2

Para determinar a curva característica de suportabilidade dos seccionadores, foram feitos em outro laboratório de extra-alta tensão próximo ao nível do mar, os ensaios de tipo do seccionador CH2, que é um seccionador tipo DAL, dupla abertura lateral, e que foi aprovado durante as verificações de suportabilidade dielétrica para o nível de isolamento de 245 kV. Salienta-se que para este tipo de seccionador o polo é simétrico em relação ao isolador rotatório central, ou seja, o contato fixo “a” do seccionador é similar ao outro contato fixo “A”, na Figura 2.9. Os ensaios de tipo foram feitos conforme arranjo experimental da figura 3.6, com o sistema de medição e controle do gerador de impulso atmosférico de tensão, com a composição dos equipamentos e materiais descritos abaixo:

- $C_g$  – Capacitância do Gerador de impulso: 12 unidades de 37,8 nF x 100 kV;
- $R_t$  – resistência de cauda de 1750 k $\Omega$ ;
- $R_f$  – resistência de frente de 280 k $\Omega$ ;
- HV – Capacitância de alta tensão 2 nF;
- K – Cabo coaxial;
- S – unidade terminal de atenuação de sinal para o osciloscópio;
- OSC – Osciloscópio tipo TDS 520 C.

Após a conclusão dos ensaios de tipo dielétricos, foi feito o registro dos valores de tensão de ruptura e não ruptura, para levantamento da curva de suportabilidade do isolamento do seccionador, através do método *up and down* de Dixon e Mood. Para verificação da coordenação de isolamento foram aplicados 30 impulsos de tensão no seccionador CH2, com forma de onda padrão de impulso atmosférico, cujos valores registrados serão apresentados a seguir.

### 3.3.2.1. Isolamento fase-terra do CH2.

Para o arranjo na condição de teste número 3, da Tabela 2.1, foram aplicados 30 impulsos atmosféricos de tensão no contato fixo “a” do seccionador na posição aberto, com o outro contato fixo “A” e a base do polo aterrado, conforme Figura 2.9, Capítulo 2. As condições ambientes são mostradas na Tabela 3.14, e obtiveram-se os valores da Tabela 3.15.

Tabela 3. 14 – Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.2.1.

Condições atmosféricas e fator de correção			
P	$t_s / t_u$	H	$K_t$
kPa	$^{\circ}\text{C}$	$\text{g} / \text{m}^3$	---
101,3	18 / 15	11,13	1,01

Tabela 3. 15 – Valores dos impulsos aplicados entre a fase e a terra no contato “a” conforme o item 3.3.2.1.

Nº	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>
	1197,67	1209,34	1221,00	1228,78
1			X	
2		0		
3			X	
4		X		
5	0			
6		0		
7			X	
8		0		
9			0	
10				X
11			0	
12				X
13			0	
14				X
15			X	
16		X		
17	0			
18		0		
19			0	
20				X
21			X	
22		0		
23			0	
24				X
25			X	
26		0		
27			X	
28		X		
29	0			
30		0		
Nível i		0	1	2
Número Ni		3	7	5

O – sem disrupção; X – com disrupção;

Para os valores da Tabela 3.15 acima e aplicando as Equações 2.7 e 2.8, do capítulo 2, foram verificados os valores apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3. 16 – Valores de U<sub>50%</sub> e desvio padrão  $\sigma$  da curva de isolamento do item 3.3.2.1.

Polaridade	+	Unidade
U <sub>0</sub> (tensão inicial)	1197,67	[kV]
$\Delta U$ (passo)	10	[kV]
U <sub>50%</sub> estimado	1221	[kV]
$\sigma$ estimado	8,82	[kV]
	0,72	%
k <sub>t</sub> (total)	1,01	---
U <sub>50%</sub>	1209	[kV]

### 3.3.2.2. Isolamento *open-gap* do CH2.

Para o arranjo na condição de teste número 4, da Tabela 2.1, foram aplicados 30 impulsos atmosféricos de tensão no contato fixo “a” do seccionador na posição aberto, e com o outro contato fixo “A” aterrado, porém com a base de polo do seccionador “F” isolada (flutuando), conforme Figura 2.9, Capítulo 2. As condições ambientes são mostradas na Tabela 3.17, e obtiveram-se os valores da Tabela 3.18.

Tabela 3. 17 – Valores da condição atmosféricas durante as verificações do item 3.3.2.2.

Condições atmosféricas e fator de correção			
P	$t_s / t_u$	H	$K_t$
kPa	°C	g/m <sup>3</sup>	---
101,3	18 / 15,5	11,79	1,009

Tabela 3. 18 – Valores dos impulsos aplicados conforme o item 3.3.1.1.

Nº	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>
	1501,63	1512,06	1522,49	1532,92	1543,34	1553,77
1					X	
2				X		
3			X			
4		X				
5	O					
6		X				
7	O					
8		O				
9			O			
10				O		
11					X	
12				X		
13			X			
14		O				
15			O			
16				X		
17			O			
18				X		
19			O			
20				O		
21					O	
22						X
23					X	
24				O		
25					X	
26				X		
27			O			
28				X		
29			O			
30				O		
Nível: i		0	1	2	3	4
Número: N		2	2	6	4	1

O – sem interrupção; X – com interrupção;

Para os valores da Tabela 3.18 acima e aplicando as Expressões 2.7 e 2.8, do capítulo 2, foram verificados os valores de  $U_{50\%}$  e desvio padrão  $\sigma$  do seccionador CH2, apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3. 19 – Valores de  $U_{50\%}$  e desvio padrão  $\sigma$  da curva de isolamento de *open-gap* do item 3.3.2.2.

Polaridade	+	Unidade
$U_0$ (tensão inicial)	1501,63	[kV]
$\Delta U$ (passo)	10,43	[kV]
$U_{50\%}$ estimado	1512,08	[kV]
$\sigma$ estimado	20,76	[kV]
	0,14	%
$k_t$	1,009	---
$U_{50\%}$	1499	[kV]

### 3.3.3 Seccionador CH3.

Para determinar a suportabilidade dielétrica e a curva característica dos isolamentos do seccionador CH3 que é do tipo SPH de 550 kV, foram feitos os ensaios de tipo e as verificações dos isolamentos do seccionador em outro laboratório de extra-alta tensão, e que foi aprovado nas verificações dielétricas normatizadas para o referido nível de isolamento. Os ensaios de tipo foram realizados conforme arranjo experimental das Figuras 3.6 e 3.7, com o sistema de medição e controle do gerador de impulso e fonte de alta tensão.

Após a conclusão dos ensaios de tipo, foi aplicado o método *up and down*, conforme feito para o CH2, com aplicações de series com 20 impulsos de tensão. Primeiramente foram aplicadas 4 séries de 20 impulsos atmosféricos no seccionador em várias posições. Posteriormente foram feitas 10 séries de 20 aplicações de impulsos de manobra no seccionador a seco. Por último, foram feitas mais 10 séries de 20 aplicações de impulsos de manobra no seccionador sob chuva. Assim foi feito o levantamento dos valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$  para a curva de suportabilidade do isolamento do seccionador CH3.

### 3.3.3.1. Impulsos atmosféricos no CH3.

As condições ambientes para execução dos ensaios com impulsos atmosféricos estão mostradas na Tabela 3.20.

Tabela 3. 20 – Valores da condição atmosférica durante a realização das verificações do item 3.3.3.1.  
Condições atmosféricas e fator de correção

P	$t_s / t_u$	H	$K_t$
kPa	°C	$g / m^3$	—
99,9	17,1/10,7	10,4	0,950

A Tabela 3.21 mostra as quatro condições em que foram feitos os ensaios para o seccionador CH3, nas medições das 4 séries de 20 aplicações de impulsos atmosféricos normalizados. Na fonte de alta tensão à frequência industrial, nos ensaios com duas fontes de tensão, foi aplicada uma tensão senoidal com uma tensão máxima de semiciclo de 315 kV<sub>máx</sub>, conforme indicado no item 2.3.

Tabela 3. 21 – Condição de ensaio durante as verificações com impulso atmosférico do item 3.3.3.1.

Nº Condição de Ensaio do CH3	Situação do seccionador	Condição de teste Tabela 2.1	Situação do diagrama da Figura 2.9			
			Impulso	Polaridade	315 kV <sub>máx</sub>	À terra
1	Fechado	1	Aa	+	---	F
2	Fechado	1	Aa	-	---	F
3	Aberto	7	a	+	A	F
4	Aberto	6	A	+	a	F

Após a execução do método *up and down* com 20 aplicações de tensão para cada condição de teste da tabela 3.21, foi utilizado as Expressões 2.7 e 2.8, do capítulo 2, similar ao procedimento anterior do seccionador CH2. A Tabela 3.22 mostra os valores de U<sub>50%</sub> e desvio padrão  $\sigma$  que serão utilizados para o levantamento das curvas de suportabilidade dos isolamentos para o seccionador CH3.

Tabela 3. 22 – Valores de U<sub>50%</sub> e  $\sigma$  para as curvas de isolamento de impulso atmosférico do item 3.3.3.1.

Nº Condição de Ensaio do CH3	Tensão inicial U <sub>0</sub> (kV)	Passo $\Delta U$ (kV)	$K_t$	$\sigma$ (kV)	U <sub>50%</sub> (kV)
1	2033	40	0,95	52,0	2085,7
2	2153	40	0,95	117,3	2263,0
3	2375	40	0,95	34,5	2431,7
4	2415	40	0,95	40,2	2467,7

### 3.3.3.2. Impulsos de manobra no CH3 a seco.

As condições ambientes para execução dos ensaios com impulsos de manobra a seco estão mostradas na Tabela 3.23.

Tabela 3. 23 - Condição atmosférica nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.2.

Condições atmosféricas e fator de correção				
Ensaio no CH3	P	$t_s / t_u$	H	$K_t$
Condição de teste	kPa	°C	$g / m^3$	—
do N° 4 a 10	98,7	17,6 / 11,2	11,3	0,984
do N° 11 a 14	98,9	18,7 / 12	11,7	0,979

A Tabela 3.24 mostra as dez condições em que foram feitos os ensaios para o seccionador CH3, nas medições de 10 séries de 20 aplicações de impulsos de manobra normalizados. Na fonte de alta tensão à frequência industrial, nos ensaios com duas fontes de tensão, foi aplicada uma tensão senoidal com uma tensão máxima de semiciclo de 450 kV<sub>máx</sub>.

Tabela 3. 24 – Condição de ensaio nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.2.

N° Condição de Ensaio do CH3	Situação do Seccionador	Condição de teste Tabela 2.1	Situação do diagrama da Figura 2.9			
			Impulso	Polaridade	450 kV <sub>máx</sub>	à terra
5	Fechado	1	Aa	+	---	F
6	Fechado	1	Aa	-	---	F
7	Aberto	3	a	+	---	AF
8	Aberto	3	a	-	---	AF
9	Aberto	2	A	+	---	aF
10	Aberto	2	A	-	---	aF
11	Aberto	7	a	+	A	---
12	Aberto	7	a	-	A	---
13	Aberto	6	A	+	a	---
14	Aberto	6	A	-	a	---

Após a execução do método *up and down* com 20 aplicações de tensão para cada condição de teste da tabela 3.24, foram utilizadas as Expressões 2.7 e 2.8, do capítulo 2, similar ao procedimento anterior do seccionador CH2. A Tabela 3.25 mostra os valores de U<sub>50%</sub> e desvio padrão  $\sigma$  que serão utilizados para o levantamento das curvas de suportabilidade dos isolamentos do seccionador CH3.

Tabela 3. 25 – Valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$  para as curvas de isolamento de impulso de manobra do item 3.3.3.2.

Nº Condição de Ensaio do CH3	Tensão inicial $U_0$ (kV)	Passo $\Delta U$ (kV)	$K_t$	$\sigma$ (kV)	$U_{50\%}$ (kV)
5	1250	60	0,984	75,8	1346,0
6	2020	60	0,984	138,6	2136,7
7	1155	60	0,984	131,4	1291,7
8	2100	60	0,984	119,3	2205,5
9	1260	60	0,984	89,2	1355,5
10	2040	60	0,984	56,4	2124,0
11	1155	70	0,979	76,0	1690,9
12	1980	70	0,979	158,9	2581,7
13	1280	70	0,979	44,1	1772,8
14	2170	70	0,979	76,0	2705,9

### 3.3.3.3. Impulsos de manobra no CH3 sob chuva.

As condições ambientais para execução dos ensaios com impulsos de manobra sob chuva estão mostradas na Tabela 3.26. Enquanto que as condições da chuva são mostradas na Tabela 3.27.

Tabela 3. 26 - Condição atmosférica nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.3.  
Condições atmosféricas e fator de correção

Ensaio no CH3	P	$t_s / t_u$	H	$K_t$
Condição de teste	kPa	°C	$g / m^3$	---
do Nº 15 a 24	98,5	17,7	13,2	0,990

Tabela 3. 27 - Condição da chuva para os impulsos de manobra do item 3.3.3.3.

Ensaio no CH3 Condição de teste	Resistividade da água $\rho$ (200C) ( $\Omega m$ )	Temperatura da água-t a (0C)	Média da comp. vertical V (mm/min)	Média da comp. Horizontal H (mm/min)
do Nº 15 a 20	99	13,2	2,2	1,3
do Nº 20 a 24	98	14,4	2,3	1,4

A Tabela 3.28 mostra as dez condições em que foram feitos os ensaios sob chuva para o seccionador CH3, nas medições de 10 series de 20 aplicações de impulsos de manobra normalizados. Na fonte de alta tensão à frequência industrial, nos ensaios com duas fontes de tensão, foi aplicada uma tensão senoidal com uma tensão máxima de semiciclo de  $450 kV_{m\acute{a}x}$ .

Tabela 3. 28 – Condição de ensaio nas verificações com impulso de manobra do item 3.3.3.3.

Nº Condição de Ensaio do CH3	Situação do Seccionador	Condição de teste Tabela 2.1	Situação do diagrama da Figura 2.9			
			Impulso	Polaridade	450 kV <sub>Max</sub>	à terra
15	Fechado	1	Aa	+	---	F
16	Fechado	1	Aa	-	---	F
17	Aberto	3	a	+	---	AF
18	Aberto	3	a	-	---	AF
19	Aberto	2	A	+	---	aF
20	Aberto	2	A	-	---	aF
21	Aberto	7	a	+	A	---
22	Aberto	7	a	-	A	---
23	Aberto	6	A	+	a	---
24	Aberto	6	A	-	a	---

Após a execução do método *up and down* com 20 aplicações de tensão para cada condição de teste da tabela 3.28, foi utilizado as Expressões 2.7 e 2.8, do capítulo 2. A Tabela 3.29 mostra os valores de  $U_{50\%}$  e desvio padrão  $\sigma$  que serão utilizados para o levantamento das curvas de suportabilidade dos isolamentos para o seccionador CH3.

Tabela 3. 29 – Valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$  para curvas de isolamento a impulso de manobra do item 3.3.3.3.

Nº Condição de Ensaio do CH3	Tensão inicial $U_0$ (kV)	Passo $\Delta U$ (kV)	$K_t$	$\sigma$ (kV)	$U_{50\%}$ (kV)
15	1305	60	0,990	60,3	1405,9
16	1385	60	0,990	90,4	1499,0
17	1210	60	0,990	71,6	1305,5
18	1295	60	0,990	105,9	1445,0
19	1270	60	0,990	145,8	1438,0
20	1570	60	0,990	192,1	1741,8
21	1540	70	0,990	170,1	1694,0
22	1630	70	0,990	156,5	1742,0
23	1710	70	0,990	60,1	1773,0
24	1430	70	0,990	218,4	1605,0

## Capítulo 4 – Resultados e análises

Os diversos ensaios feitos no Capítulo 3, junto com os estudos de fundamentação teórica do capítulo 2, estão inerentes ao processo de verificação dos isolamentos do seccionador. Assim, considerando que a curva característica de suportabilidade dielétrica de isolamento é representada por uma distribuição normal, caracterizada pelos valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$ , será feito neste capítulo uma avaliação gráfica do nível de isolamento dos seccionadores e a verificação da coordenação de isolamento para os casos estudados dos seccionadores CH1, CH2 e CH3. Posteriormente são feitos comentários gerais sobre os estudos e as avaliações, e proposto um método de verificação da coordenação de isolamento de seccionadores.

Os ensaios dielétricos de tipo normalizados que verificam os isolamentos de seccionadores não avaliam a coordenação de isolamento dos mesmos. Estes ensaios verificam o isolamento fase-terra e o isolamento de *open-gap*:  $U_{10\%} > \text{NBI}$  ou NBM (ensaio 2/15). Sem verificar se o valor em que ocorrem descargas do isolamento fase-terra está abaixo do valor mínimo de suportabilidade do isolamento de *open-gap* do seccionador. Indicando dimensionamentos de distâncias elétricas fase-terra conservativos.

Para haver coordenação de isolamento de um seccionador, é necessário que a curva característica de suportabilidade do isolamento “entre a distância de seccionamento”, com probabilidade maior que 0(zero), tenha valores de tensão suportável maiores que os valores de tensão da curva característica de suportabilidade do isolamento fase-terra, com probabilidade diferente de 1(um), em todos os pontos da curva. A diferença desses valores de tensão suportável deve ser maior que a diferença dos valores especificados em norma. Assim, conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), para um seccionador de 245 kV, o valor de  $U_{10\%}$  no isolamento de *open-gap* deve ser 100 kV maior que o valor de  $U_{10\%}$  no isolamento fase-terra.

A Figura 4.1 mostra as curvas características dos isolamentos de um seccionador que passam nos ensaios de tipo normalizados, porém não apresentam coordenação de isolamento. Em azul, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal com o valor de  $V_{50\%} = 1050$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 10$  kV, que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do NBI. A curva vermelha é uma curva de função de distribuição cumulativa normal com o valor de  $V_{50\%} = 1320$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 36$  kV, que representa os

valores da suportabilidade de isolamento fase-terra. A curva verde é uma curva de função de distribuição cumulativa normal com o valor de  $V_{50\%} = 1300$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 80$  kV, que representa os valores da suportabilidade de isolamento de *open-gap*.

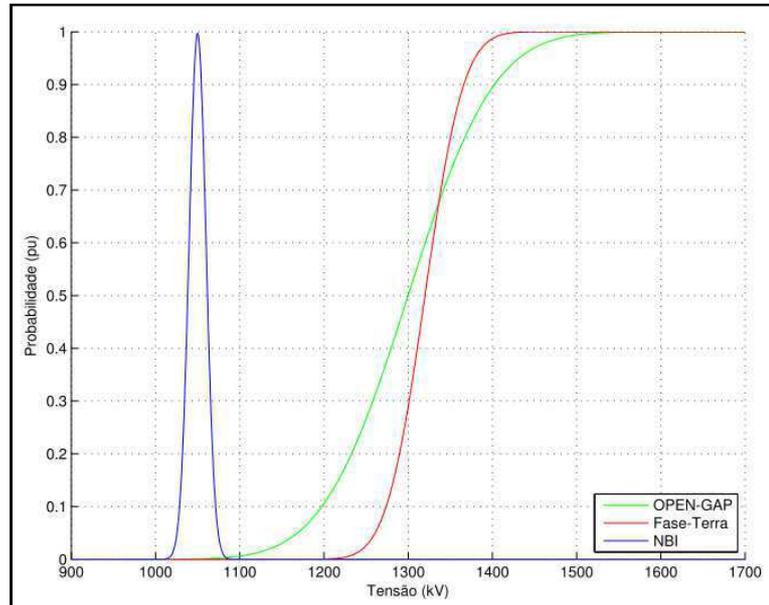


Figura 4. 1 – Curvas características de um seccionador sem coordenação de isolamento.

## 4.1 Análise do seccionador CH1

Conforme descrito no Capítulo 3, a suportabilidade dielétrica do seccionador CH1 foi comprovada nos ensaios de tipo e as tensões críticas de descarga dos isolamentos foram determinadas nas verificações dos isolamentos do seccionador.

Considerando que a curva de probabilidade quando se aplica sobretensões de manobra é uma curva normal, e considerando uma dispersão de  $\sigma = 6\%$ , conforme feito no item 3.3.1 (D'AJUZ at al, 1987).

Quando se analisam as curvas de suportabilidade de isolamento autorrecuperativo, deve-se enfatizar os valores de tensão correspondentes a: 0,13% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{0,13\%}$ ; 10% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{10\%}$ ; 50% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{50\%}$ ; 90% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{90\%}$ ; 99,8% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{99,8\%}$ .

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores de  $U_{50\%}$ ,  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,87\%}$  e  $\sigma$ , que foram obtidos durante os testes realizados no seccionador. Os valores serão utilizados nas análises de coordenação de isolamento do seccionador CH1, para os casos:

a) Seccionador a seco, na condição aberta, com aplicação de impulso de manobra, polaridade positiva, com a tensão sendo aplicada entre o contato fixo e base de polo. A base de polo e o terminal do contato móvel estavam aterrados. O ensaio foi feito com uma fonte (gerador de impulso de tensão).

b) Seccionador sob chuva, na condição aberta, com aplicação de impulso de manobra, polaridade positiva, com a tensão sendo aplicada entre o contato móvel e a base de polo. A base de polo e o terminal do contato fixo estavam aterrados. O ensaio foi feito com uma fonte (gerador de impulso de tensão).

c) Seccionador sob chuva, na condição aberta, com aplicação de impulso de manobra, polaridade positiva, e tensão na frequência industrial. Com os impulsos sendo aplicados no contato móvel. A tensão na frequência industrial foi aplicada no contato fixo. A base sempre permaneceu aterrada. O ensaio é caracterizado como de duas fontes, gerador de impulso de tensão e transformador de alta tensão.

Tabela 4. 1 – Valores de tensão e desvio padrão de curvas de isolamentos do CH1

Aplicação do método simplificado <i>up and down</i>	Impulso de manobra positivo					
	$U_{0,13\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-3\sigma$ )	$U_{10\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-1,28\sigma$ )	$U_{50\%}$ (kV)	$U_{0,90\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+1,28\sigma$ )	$U_{99,87\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+3\sigma$ )	$\sigma$ (kV) ( $\approx 0,06U_{50\%}$ )
Caso “a”	1260	1419	1537	1655	1813	92,2
Caso “b”	1220	1375	1489	1603	1757	89,3
Caso “c”	1611	1814	1965	2116	2319	117,9

Como escrito no Capítulo 2, para que ocorra a coordenação de isolamento de forma adequada a preservar a segurança das pessoas e do sistema, torna-se necessário garantir que uma eventual sobretensão na condição mais crítica ocorra entre a parte ativa e a base aterrada. Essa “condição de criticidade” deveria ser caracterizada por um único ensaio, contudo, as normas técnicas ou as especificações das concessionárias ainda não preveem esse ensaio.

Para analisar a “condição de criticidade” no ponto de vista dos ensaios previstos na norma, é necessário o estudo de coordenação de isolamento agrupando os ensaios descritos nos casos “b” e “c” acima.

Como descrito no Capítulo 3, o seccionador CH1 tem o NBM de 1175 kV. Assim, nos ensaios de tipo, para os testes entre a distância de seccionamento foram aplicadas as tensões de 900 kV, para impulso, e 450 kV na frequência industrial. A partir desses valores contidos na Tabela 4.1, pode-se fazer a análise a seguir.

O valor de tensão de  $U_{10\%}$  para o caso “b” - isolamento fase-terra sob chuva - é igual a 1375 kV. Este valor é superior ao valor máximo de sobretensão para o sistema analisado, que corresponde a 1175 kV e conseqüentemente atendendo à norma.

O valor de tensão de  $U_{10\%}$  para o caso “c” - isolamento entre contatos sob chuva - é igual a 1814 kV. Este valor é superior ao valor normalizado no ensaio de tipo, que corresponde a soma de 900 kV mais 450 kV (1350 kV) e conseqüentemente atendendo à norma.

Uma análise simplista pode ser feita adotando os valores de  $U_{50\%}$ . Assim, para o seccionador CH1, o valor de tensão de  $U_{50\%}$  para o caso “b” - isolamento fase-terra sob chuva - é igual a 1489 kV. E o valor de tensão de  $U_{50\%}$  para o caso “c” - isolamento de *open-gap* sob chuva - é igual a 1965 kV, caracterizando-se superior ao valor de tensão crítica de descarga do isolamento fase-terra sob chuva ( $U_{50\%}$ ), e, conseqüentemente promovendo uma coordenação de isolamento. No caso “b”, a norma possibilita a aplicação de 1175 kV entre fase e terra; contudo, no caso “c”, a norma exige a aplicação de 1350 kV, inferindo um valor de 175 kV para a coordenação de isolamento. O resultado dos ensaios para o seccionador CH1, na análise com os valores de  $U_{50\%}$ , resulta no valor de 476 kV para a coordenação de isolamento.

O valor de tensão de  $U_{99,87\%}$  para o caso “b” - isolamento fase-terra sob chuva - é igual a 1757 kV. E o valor de tensão de  $U_{10\%}$  para o caso “c” - isolamento de *open-gap* sob chuva - é igual a 1814 kV, caracterizando-se superior ao valor  $U_{99,87\%}$  do isolamento fase-terra sob chuva, e, conseqüentemente promovendo uma coordenação de isolamento adequada e segura.

Outra análise da coordenação de isolamento pode ser feita de forma radical em termos de segurança, a adoção da suportabilidade de  $U_{0,13\%}$  (complemento de  $U_{99,87\%}$ ). Para o seccionador CH1, o valor de tensão de  $U_{99,87\%}$  para o caso “b” - isolamento fase-terra sob chuva - é igual a 1757 kV. E o valor de tensão de  $U_{0,13\%}$  para o caso “c” - isolamento de *open-gap* sob chuva - é igual a 1611 kV, caracterizando-se 146 kV menor que o valor  $U_{99,87\%}$  do isolamento fase-terra sob chuva, e, conseqüentemente, não promovendo uma coordenação de isolamento totalmente segura.

Na Figura 4.2 é mostrada a representação gráfica das curvas de suportabilidade de isolamentos do seccionador CH1. Em azul, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal que representa os impulsos de manobra provenientes de um gerador de impulso, para verificação do isolamento fase-terra do seccionador CH1. Conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), nos ensaios de tipo são aplicados impulsos de manobra no valor de tensão de  $V_{teste} = 1175$  kV, com margem de erro aceitável de  $\pm 3\%$ . Dessa forma, considera-se o valor de  $V_{50\%} = 1175$  kV e o desvio padrão de  $3\sigma = 3\%$  de  $V_{teste}$ . A curva vermelha é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os

valores da suportabilidade de isolamento fase-terra, caso “b”, com o valor de  $V_{50\%} = 1489$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 89,3$  kV, provenientes da Tabela 4.1. A curva verde é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento de *open-gap*, caso “c”, com o valor de  $V_{50\%} = 1965$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 117,9$  kV, provenientes da Tabela 4.1.

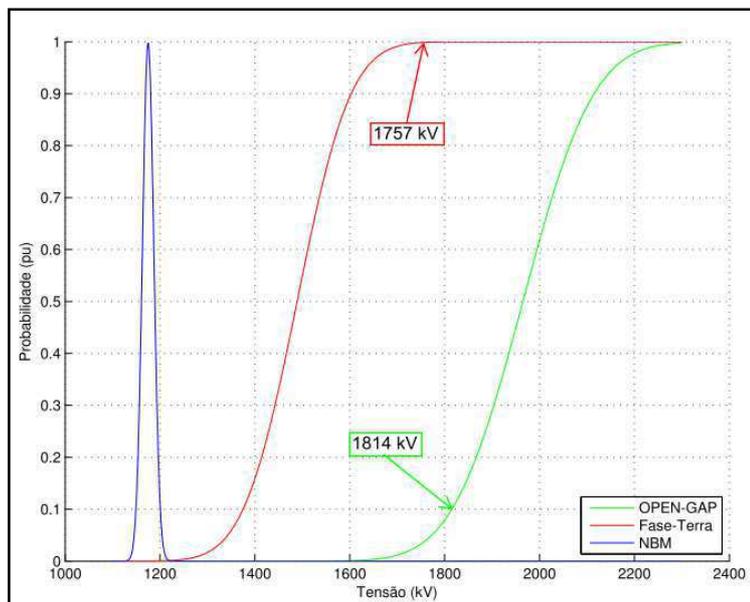


Figura 4. 2 – Avaliação da coordenação de isolamento para impulso de manobra sob chuva do CH1.

Na Figura 4.2, pode-se constatar que o valor máximo de tensão que pode ser aplicada ao seccionador CH1, não atinge a curva de suportabilidade dos isolamentos, caso “b” e caso “c”. Portanto, atendendo à norma.

Quando se analisa a coordenação de isolamento realizada pela comparação entre as curvas de suportabilidade de isolamento fase-terra, caso “b”, e suportabilidade de isolamento de *open-gap*, caso “c”, observa-se para as curvas, em quase todos os níveis de probabilidade, uma coordenação de isolamento adequada.

## 4.2 Análise do seccionador CH2

Conforme descrito no Capítulo 3, a suportabilidade dielétrica do seccionador CH2 foi comprovada nos ensaios de tipo, e a tensão crítica de descarga ( $U_{50\%}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos isolamentos do seccionador foram determinados nas verificações para construção das curvas normais de distribuição das tensões de descargas disruptivas dos isolamentos do seccionador. Os ensaios foram feitos com uma fonte (gerador de impulso de tensão).

Na Tabela 4.2 são mostrados os valores de  $U_{50\%}$ ,  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,87\%}$  e  $\sigma$ , que foram obtidos durante os testes realizados no seccionador CH2, do capítulo anterior.

Tabela 4. 2 – Valores de tensão e desvio padrão de curvas de isolamentos do CH2

Aplicação do método <i>up and down</i> de Dixon e Mood	Impulso Atmosférico Positivo					$\sigma$ (kV)
	$U_{0,13\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-3\sigma$ )	$U_{10\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-1,28\sigma$ )	$U_{50\%}$ (kV)	$U_{90\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+1,28\sigma$ )	$U_{99,87\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+3\sigma$ )	
Fechado, entre fase terra	1096	1158	1204	1250	1312	36
Entre contatos abertos	1386	1465	1524	1583	1662	46

Os valores serão utilizados nas análises da coordenação de isolamento do seccionador CH2, para os casos:

- a) Seccionador na condição aberta, com aplicação de impulso atmosférico de tensão, polaridade positiva, no contato fixo. A base do polo e o terminal do contato móvel aterrados.
- b) Seccionador na condição aberta, com aplicação de impulso atmosférico de tensão, polaridade positiva, com a tensão sendo aplicada entre o contato fixo e o terminal do contato móvel aterrado, com a base isolada.

Para analisar a “condição de criticidade” no ponto de vista do estudo de coordenação de isolamento é necessário agrupar os ensaios descritos nos casos “a” e “b” acima. A partir dos valores contidos na Tabela 4.2, pode-se fazer a seguinte análise.

O valor de tensão de  $U_{10\%}$  para o caso “a” do CH2 - isolamento fase-terra para impulso atmosférico - é igual a 1158 kV, caracterizando-se superior ao valor de tensão suportável de impulso atmosférico, que corresponde a 1050 kV, e consequentemente atendendo à norma.

O valor de tensão de  $U_{10\%}$  para o caso “b” do CH2 - isolamento entre contatos para impulso atmosférico - é igual a 1465 kV, caracterizando-se superior ao valor normalizado no ensaio de tipo, que corresponde a 1200 kV, e consequentemente atendendo à norma.

Uma análise simplista pode ser feita adotando os valores de  $U_{50\%}$ . Assim, para o seccionador CH2, o valor de tensão de  $U_{50\%}$  para o caso “a” - isolamento fase-terra - é igual a 1204 kV. E o valor de tensão de  $U_{50\%}$  para o caso “b” - isolamento de *open-gap* - é igual a 1524 kV. Caracterizando superior ao valor de  $U_{50\%}$  de tensão disruptiva fase-terra, e consequentemente promovendo uma coordenação de isolamento. Para o caso “a” a norma possibilita a aplicação de 850 kV, 950 kV e 1050 kV entre fase e terra, e no caso “b” a norma possibilita a aplicação de 950 kV, 1050 kV e 1200 kV entre os contatos, respectivamente, inferindo um valor de 100 kV e 150 kV para a coordenação de isolamento. O resultado dos

ensaios para o seccionador CH2, na análise com os valores de  $U_{50\%}$ , resulta no valor de 320 kV para a coordenação de isolamento, maior que os valores indicados pela norma.

Uma análise um pouco mais crítica adotando os valores de  $U_{10\%}$  e  $U_{90\%}$ , de tensão disruptiva a impulso atmosférico, polaridade positiva. Assim, para o seccionador CH2, o valor de tensão de  $U_{90\%}$  para o caso “a” - isolamento fase-terra - é igual a 1250 kV, e o valor de tensão de  $U_{10\%}$  para o caso “b” - isolamento de *open-gap* - é igual a 1465 kV, caracterizando-se superior ao valor de  $U_{90\%}$  fase-terra, e, conseqüentemente, promovendo uma coordenação de isolamento adequada e segura. Nesta análise com valores de  $U_{10\%}$  e  $U_{90\%}$ , o resultado mostrou o valor de 215 kV para a coordenação de isolamento, que é maior do que 150 kV indicado pela norma.

Outra análise da coordenação de isolamento pode ser feita de forma radical em termos de segurança, adotando a suportabilidade de  $U_{0,13\%}$  e seu complemento de  $U_{99,87\%}$ . Para a seccionador CH2, o valor de tensão de  $U_{99,87\%}$  para o caso “a” - isolamento fase-terra - é igual a 1312 kV. O valor de tensão de  $U_{0,13\%}$  para o caso “b” - isolamento entre contatos - é igual a 1386 kV, caracterizando-se maior que o valor de  $U_{99,8\%}$ , do isolamento fase-terra verificado, e, conseqüentemente, em coordenação de isolamento.

Nesta análise com valores de  $U_{0,13\%}$  e  $U_{99,87\%}$ , o resultado dos ensaios mostrou o valor de 74 kV de segurança para a coordenação de isolamento. Relacionando com o maior valor de 150 kV e assumindo que as curvas de distribuição cumulativa normal representasse esses isolamentos fase-terra e de *open-gap* do seccionador CH2. Tem-se uma coordenação de isolamento para impulso de tensão atmosférico, polaridade positiva, de, aproximadamente, 50% do valor indicado pela norma. Todavia com probabilidade praticamente inexistente de ruptura no isolamento de *open-gap*.

Na Figura 4.3 é mostrada a representação gráfica das curvas de suportabilidade de isolamentos do seccionador CH2. Em azul, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do isolamento fase-terra do seccionador CH2. Conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), nos ensaios de tipo o valor de tensão de  $V_{teste} = 1050$  kV, com margem de erro aceitável de  $\pm 3\%$ . Dessa forma, considera-se o valor de  $V_{50\%} = 1050$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 10$  kV. A curva vermelha é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento fase-terra, caso “a”, com o valor de  $V_{50\%} = 1204$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 36$  kV, provenientes da Tabela 4.2. A curva verde é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da

suportabilidade de isolamento de *open-gap*, caso “b”, com o valor de  $V_{50\%} = 1524$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 46$  kV, provenientes da Tabela 4.2.

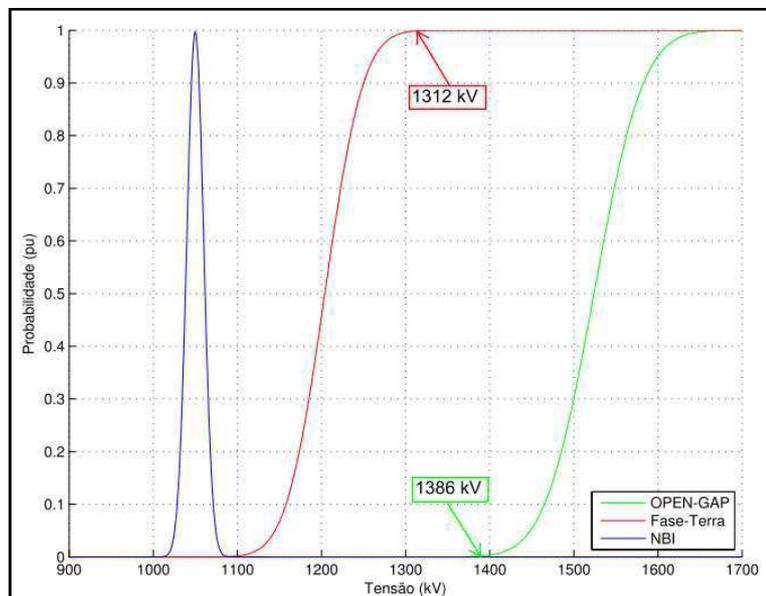


Figura 4. 3 – Avaliação da coordenação de isolamento para impulso atmosférico do CH2.

Na Figura 4.3, pode-se constatar que o valor de 1050 kV não atinge a curva de suportabilidade de isolamento do seccionador CH2, caso “a” nem tampouco do caso “b”. Portanto, atendendo à norma.

Quando se analisa a coordenação de isolamento pela comparação entre as curvas de suportabilidade de isolamento caso “a”, e suportabilidade de isolamento caso “b”, observa-se que as curvas, em todos os níveis de probabilidade, apresentam uma coordenação de isolamento adequada e segura.

### 4.3 Análise do seccionador CH3

Conforme descrito no Capítulo 3, a suportabilidade dielétrica do seccionador CH3 foi comprovada nos ensaios de tipo, e a tensão crítica de descarga ( $U_{50\%}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos isolamentos do seccionador foram determinados nas verificações para construção das curvas normal de distribuição cumulativa das tensões de descargas disruptivas dos isolamentos do seccionador.

### 4.3.1 Suportabilidade a impulso atmosférico

Na Tabela 4.3 são mostrados os valores de  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{50\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,8\%}$  e  $\sigma$ , que foram obtidos durante os testes realizados no seccionador CH3 para a polaridade positiva de impulso atmosférico, nas condições de ensaios 1 e 3 mostradas nas Tabelas 3.20 e 3.21, cujos valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$  foram provenientes da Tabela 3.22, para as respectivas condições de ensaios.

Tabela 4. 3 - Valores de tensão de curvas de isolamentos para impulso atmosférico do CH3

Nº condição de ensaio do seccionador CH3	Impulso atmosférico polaridade positiva a seco					
	$U_{0,13\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-3\sigma$ )	$U_{10\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-1,28\sigma$ )	$U_{50\%}$ (kV)	$U_{90\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+1,28\sigma$ )	$U_{99,87\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+3\sigma$ )	$\sigma$ (kV)
1	1929	2018	2085	2151	2241	52
3	2326	2386	2431	2476	2536	35

Para a polaridade positiva de impulso atmosférico no seccionador CH3, os valores de tensão de  $U_{10\%}$  contidos nas condições de ensaio Nº 1 e 3, da Tabela 4.3, são 2018 kV e 2386 kV, para os isolamentos fase-terra e *open-gap*, respectivamente. Esses valores são maiores que o valor de tensão suportável de impulso atmosférico fase-terra e “entre a distância de seccionamento”, que corresponde a 1550 kV e 1865 kV (1550 kV + 315 kV), respectivamente, e consequentemente atendendo ao NBI da norma.

Para uma análise simplista da coordenação de isolamento para a “condição de criticidade” que se adotam os valores de  $U_{50\%}$ , é necessária a comparação dos ensaios descritos nas condições de ensaios Nº 1 e 3 da Tabela 4.3. Assim, para o seccionador CH3, o valor de tensão de 2085 kV, para a condição Nº 1 do isolamento fase-terra, é menor que 2431 kV, para a condição Nº 3 do isolamento “entre a distância de seccionamento”. O resultado dos ensaios para o seccionador CH3, na análise com os valores de  $U_{50\%}$ , resulta no valor de 346 kV, que é maior que o valor de 315 kV indicado pela norma, e, consequentemente, promovendo uma coordenação de isolamento.

Outra análise da coordenação de isolamento para a “condição de criticidade” que se adotam os valores de  $U_{10\%}$ . Assim, para o seccionador CH3, o valor de tensão de 2018 kV, para a condição Nº 1 do isolamento fase-terra, é menor que 2386 kV, para a condição Nº 3 do isolamento “entre a distância de seccionamento”. O resultado dos ensaios para o seccionador CH3, na análise com os valores de  $U_{10\%}$ , resulta no valor de 368 kV, que é maior que o valor de 315 kV indicado pela norma, e, consequentemente, promovendo uma coordenação de isolamento.

Uma análise um pouco mais crítica adotando os valores de  $U_{90\%}$  do isolamento fase-terra e  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap*. Assim, para a tensão de impulso atmosférico, polaridade positiva do seccionador CH3, o valor de tensão de  $U_{90\%}$  para a condição de ensaio N° 1 - isolamento fase-terra - é igual a 2151 kV, e o valor de tensão de  $U_{10\%}$  na condição de ensaio N° 3 - isolamento “entre a distância de seccionamento” - é igual a 2386 kV. Nesta análise, o resultado dos ensaios mostrou a diferença no valor de tensão de 235 kV para a coordenação de isolamento de, aproximadamente, 75% do valor indicado pela norma, 315 kV. Todavia com pouca probabilidade de disrupção no isolamento de *open-gap*.

Para uma análise de forma radical da coordenação de isolamento para a “condição de criticidade” que se adotam os valores de  $U_{99,87\%}$  do isolamento fase-terra e  $U_{0,13\%}$  do isolamento de *open-gap*. Assim, para a tensão de impulso atmosférico, polaridade positiva do seccionador CH3, o valor de tensão de  $U_{99,87\%}$  para a condição de ensaio N° 1 - isolamento fase-terra - é igual a 2241 kV, e o valor de tensão de  $U_{0,13\%}$  a condição de ensaio N° 3 - isolamento “entre a distância de seccionamento” - é igual 2326 kV. Nesta análise, o resultado dos ensaios mostrou a diferença no valor de tensão de 85 kV para a coordenação de isolamento de, aproximadamente, 27% do valor indicado pela norma, 315 kV. Todavia com probabilidade praticamente inexistente de disrupção no isolamento de *open-gap*.

Na Figura 4.4 é mostrada a representação gráfica das curvas de suportabilidade de isolamentos do seccionador CH3, para a tensão de impulso atmosférico, polaridade positiva. Em azul, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do isolamento fase-terra. Conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), considera-se o valor de  $V_{50\%} = 1550$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 15$  kV, significando o erro aceitável de  $\pm 3\%$ . Em magenta, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do isolamento “entre a distância de seccionamento”. Conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), considera-se o valor de  $V_{50\%} = 1550$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 15$  kV ( $3\sigma = \pm 3\%$ , erro aceitável), mais o valor de 315 kV<sub>máx</sub>, da frequência industrial aplicada no terminal oposto. A curva vermelha é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento fase-terra para a condição de ensaio N° 1, com o valor de  $V_{50\%} = 2085$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 52$  kV, provenientes da Tabela 4.3. A curva verde é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento de

*open-gap* para a condição de ensaio N° 3, com o valor de  $V_{50\%} = 2431$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 35$  kV, provenientes da Tabela 4.3.

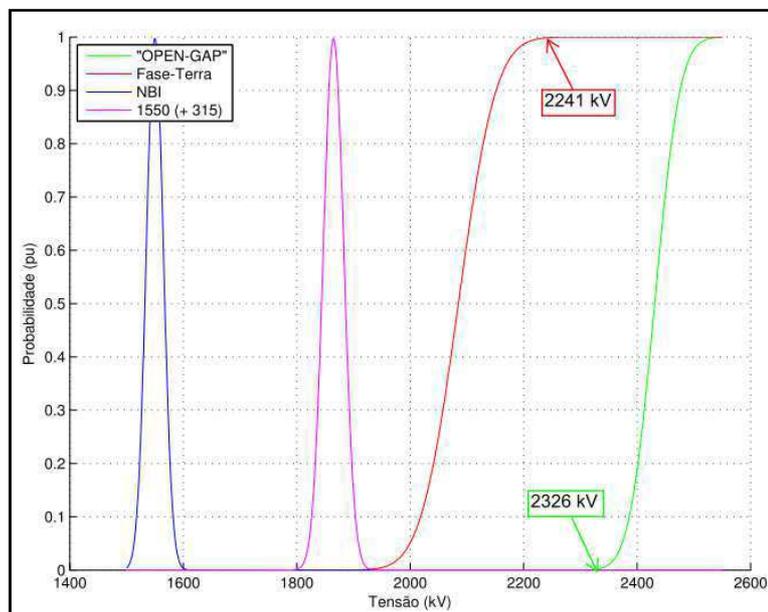


Figura 4. 4 – Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso atmosférico.

### 4.3.2 Suportabilidade a impulso de manobra a seco

Na Tabela 4.4 são mostrados os valores  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{50\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,87\%}$  e o desvio padrão, que foram obtidos durante os testes realizados no seccionador CH3 para a polaridade positiva de impulso de manobra a seco, nas condições de ensaios mostradas nas Tabelas 3.23 e 3.24, cujos valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$  foram provenientes da Tabela 3.25, para as respectivas condições de ensaios.

Tabela 4. 4 - Valores de tensão de curvas de isolamentos para impulso de manobra a seco do CH3

N° condição de ensaio do seccionador CH3	Impulso de manobra a seco, polaridade positiva					
	$U_{0,13\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-3\sigma$ )	$U_{10\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-1,28\sigma$ )	$U_{50\%}$ (kV)	$U_{90\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+1,28\sigma$ )	$U_{99,87\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+3\sigma$ )	$\sigma$ (kV)
7	899	1124	1292	1460	1685	131
11	1463	1594	1691	1788	1919	76

Para a polaridade positiva de impulso de manobra a seco no seccionador CH3, o valor de tensão de  $U_{10\%}$  do isolamento fase-terra contidos nas condições de ensaio N° 7, da Tabela 4.4, é 1124 kV. Como o valor de tensão suportável de impulso de manobra do isolamento fase-terra normalizado é 1175 kV, indica que o seccionador esta no limiar de aprovação do ensaio normalizado pois a diferença é menor que o desvio padrão. Correndo um

risco de não ser aprovado no ensaio de tensão suportável de impulso de manobra. Para o valor de tensão de  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap*, contido na condição de ensaio N° 11, da Tabela 4.4, é 1594 kV. Como o valor de tensão suportável de impulso de manobra do isolamento “entre a distância de seccionamento” normalizado é 900 kV + 450 kV, indicando que o valor de  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap* é maior que o valor normalizado, e conseqüentemente atendendo à norma.

Fazendo a análise com valores de tensão de  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{50\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,87\%}$  dos isolamentos fase-terra e de *open-gap* para a polaridade positiva de impulso de manobra a seco no seccionador CH3, contidos nas condições de ensaio N° 7 e 11 da Tabela 4.4, conforme feito anteriormente para impulso atmosférico. Na Tabela 4.5 tem-se uma análise da coordenação de isolamento para as “condições de criticidade” simples -  $U_{50\%}$ , simples -  $U_{10\%}$ , crítica e radical, que se adotam os valores de:  $U_{50\%}$ ;  $U_{10\%}$ ;  $U_{90\%}$  e  $U_{10\%}$ ;  $U_{99,87\%}$  e  $U_{0,13\%}$ , respectivamente. Na última coluna da Tabela 4.5 é mostrado o resultado da coordenação de isolamento para impulso de manobra a seco.

Tabela 4. 5 - Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra a seco.

“condição de criticidade”	Valor de tensão de impulso de manobra a seco do CH3				
	curva de isolamento / N° condição de ensaio		Análise da coordenação de isolamento		
	fase-terra (kV) “condição 7”	<i>open-gap</i> (kV) “condição 11”	Diferença (kV) OG - FT	% Aprovação da Norma (175 kV)	Resultado
Simple $U_{50\%} - U_{50\%}$	1292	1691	399	228 %	SIM
Simple $U_{10\%} - U_{10\%}$	1124	1594	470	268 %	SIM
Crítica $U_{10\%} - U_{90\%}$	1460	1594	134	77 %	SIM
Radical $U_{0,13\%} - U_{99,87\%}$	1685	1463	-222	-126 %	NÃO

Na Tabela 4.5, para a “condição de criticidade” que se adotam os valores de  $U_{90\%}$  do isolamento fase-terra e  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap*, o resultado dos ensaios mostrou a diferença no valor de tensão de 134 kV para a polaridade positiva de impulso de manobra a seco no seccionador CH3. Indicando a coordenação de isolamento de, aproximadamente, 77% do valor indicado pela norma. Todavia com pouca probabilidade de disrupção no isolamento de *open-gap*.

Na análise da coordenação de isolamento para a “condição de criticidade” radical na Tabela 4.5, que se adotam os valores de  $U_{99,87\%}$  do isolamento fase-terra e  $U_{0,13\%}$  do isolamento de *open-gap*, o resultado dos ensaios mostrou a diferença no valor de tensão de – 222 kV. Indicando que nesta “condição de criticidade” o seccionador CH3 não está

promovendo uma coordenação de isolamento para a polaridade positiva de impulso de manobra a seco.

Na Figura 4.5 é mostrada a representação gráfica das curvas de suportabilidade de isolamento do seccionador CH3 para a polaridade positiva de impulso de manobra a seco. Em azul, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal com o valor de  $V_{50\%} = 1175$  kV e o valor de desvio padrão de  $\sigma = 11$  kV, que representa os impulsos atmosféricos aplicados com o erro aceitável de  $\pm 3\%$  para verificação do isolamento fase-terra. Em magenta, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal com o valor de  $V_{50\%} = 1350$  kV e o valor de desvio padrão de  $\sigma = 12$  kV, que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do isolamento “entre a distância de seccionamento”. Conforme norma brasileira (ABNT NBR IEC 60694, 2006), considera-se o valor de 900 kV com um erro aceitável  $\pm 3\%$ , mais o valor de  $450$  kV<sub>máx</sub>, da frequência industrial aplicada no terminal oposto. A curva vermelha é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento fase-terra para a condição de ensaio N° 7, com o valor de  $V_{50\%} = 1292$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 131$  kV, provenientes da Tabela 4.4. A curva verde é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento de *open-gap* para a condição de ensaio N° 11, com o valor de  $V_{50\%} = 1691$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 76$  kV, provenientes da Tabela 4.4.

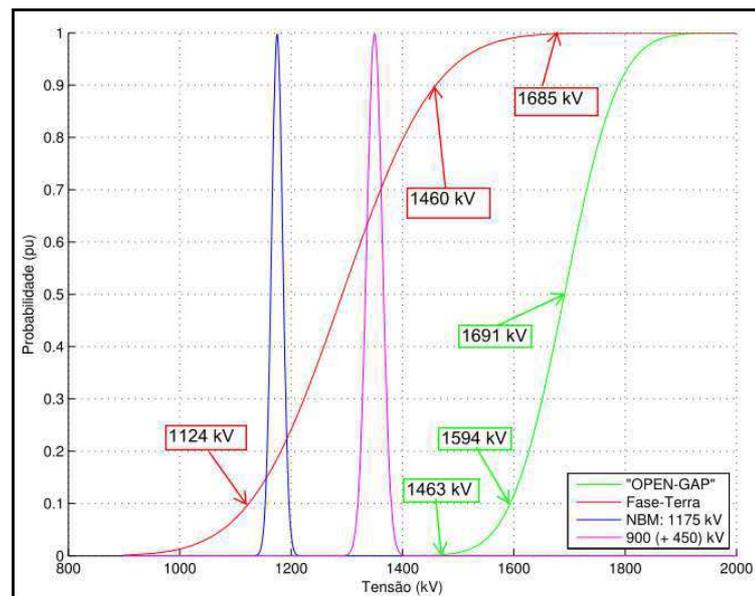


Figura 4. 5 – Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra a seco.

### 4.3.3 Suportabilidade a impulso de manobra sob chuva

Na Tabela 4.6 são mostrados os valores  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{50\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,87\%}$  e o desvio padrão, que foram obtidos durante os testes realizados no seccionador CH3 para a polaridade positiva de impulso de manobra sob chuva, nas condições de ensaios mostradas nas Tabelas 3.26, 3.27 e 3.28, cujos valores de  $U_{50\%}$  e  $\sigma$  foram provenientes da Tabela 3.29, para as respectivas condições de ensaios.

Tabela 4. 6 - Valores de tensão de curvas de isolamentos para impulso de manobra sob chuva do CH3.

Nº condição de ensaio do seccionador CH3	Impulso de manobra positivo sob chuva					
	$U_{0,13\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-3\sigma$ )	$U_{10\%}$ (kV) ( $U_{50\%}-1,28\sigma$ )	$U_{50\%}$ (kV)	$U_{90\%}$ (kV) $U_{50\%}+1,28\sigma$	$U_{99,87\%}$ (kV) ( $U_{50\%}+3\sigma$ )	$\sigma$ (kV)
17	1089	1213	1305	1397	1521	72
21	1184	1476	1694	1912	2204	170

Fazendo a análise com valores de tensão de  $U_{0,13\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{50\%}$ ,  $U_{90\%}$ ,  $U_{99,87\%}$  dos isolamentos fase-terra e de *open-gap* para a polaridade positiva de impulso de manobra sob chuva no seccionador CH3, contidos nas condições de ensaio N° 17 e 21 da Tabela 4.5, conforme feito anteriormente para a condição a seco. Tem-se uma análise da coordenação de isolamento para as “condições de criticidade” simples -  $U_{50\%}$ , simples -  $U_{10\%}$ , crítica e radical, que se adotam os valores de:  $U_{50\%}$ ,  $U_{10\%}$ ,  $U_{10\%}$  e  $U_{90\%}$ ,  $U_{0,13\%}$  e  $U_{99,87\%}$ , respectivamente, mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4. 7 - Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra sob chuva.

“condição de criticidade”	Valor de tensão de impulso de manobra sob chuva do CH3				
	curva de isolamento / Nº condição de ensaio		Análise da coordenação de isolamento		
	fase-terra (kV) “condição 17”	<i>open-gap</i> (kV) “condição 21”	Diferença (kV) <i>OP</i> - <i>FT</i>	% Aprovação da Norma (175 kV)	Resultado
Simple $U_{50\%} - U_{50\%}$	1305	1694	389	222 %	SIM
Simple $U_{10\%} - U_{10\%}$	1213	1476	263	150 %	SIM
Crítica $U_{10\%} - U_{90\%}$	1397	1476	79	45%	SIM
Radical $U_{0,13} - U_{99,87\%}$	1521	1184	- 377	- 215 %	NÃO

Na Tabela 4.7, na “condição de criticidade” adotando os valores de  $U_{90\%}$ , que é 1397 kV, na condição de ensaio N° 17 - isolamento fase-terra, e o valor de tensão de  $U_{10\%}$ , que é igual a 1476 kV, na condição de ensaio N° 21 - isolamento “entre a distância de seccionamento”. Apesar de ter um valor de tensão menor que 175 kV inferido pela norma IEC

(ABNT NBR IEC 60060-1, 2013), considera-se em coordenação de isolamento por ter uma baixa probabilidade de falha no isolamento de *open-gap*.

Na Figura 4.6 é mostrada a representação gráfica das curvas de suportabilidade de isolamento do seccionador CH3 para a polaridade positiva de impulso de manobra sob chuva. Em azul, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal com o valor de  $V_{50\%} = 1175$  kV e o valor de desvio padrão de  $\sigma = 11$  kV, que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do isolamento fase-terra. Em magenta, tem-se uma curva de função densidade de probabilidade normal com o valor de  $V_{50\%} = 1350$  kV e o valor de desvio padrão de  $\sigma = 12$  kV, que representa os impulsos atmosféricos aplicados para verificação do isolamento “entre a distância de seccionamento”. A curva vermelha é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento fase-terra para a condição de ensaio N° 17, com o valor de  $V_{50\%} = 1305$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 72$  kV, provenientes da Tabela 4.6. A curva verde é uma curva de função de distribuição cumulativa normal que representa os valores da suportabilidade de isolamento de *open-gap* para a condição de ensaio N° 21, com o valor de  $V_{50\%} = 1694$  kV e o desvio padrão de  $\sigma = 170$  kV, provenientes da Tabela 4.6.

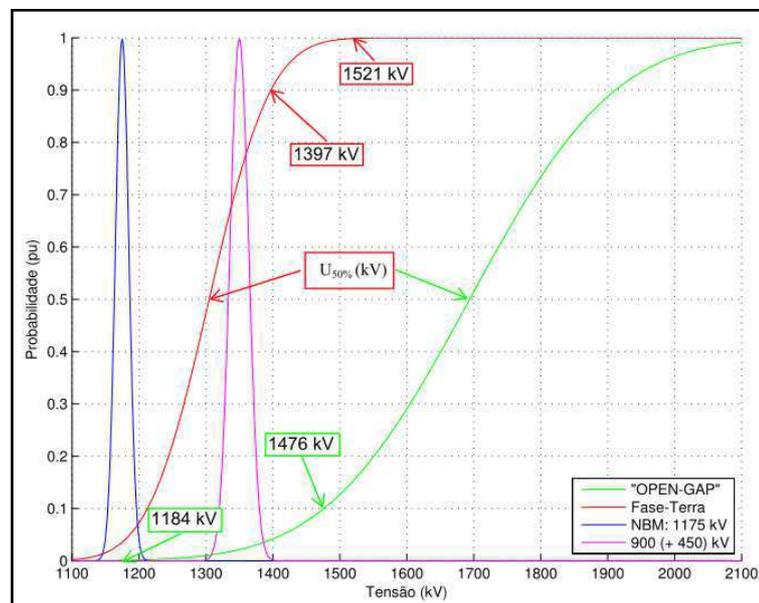


Figura 4. 6 – Avaliação da coordenação de isolamento do CH3 para impulso de manobra sob chuva.

## 4.4 Comentários gerais

No desenvolvimento desta dissertação, foram mostrados seccionadores e suas características de isolamentos, a metodologia para realização de ensaios dielétricos de tipo, a estatística para avaliação do isolamento dos materiais e equipamentos, os conceitos e os métodos de coordenação de isolamento. Posteriormente foi feito um levantamento de materiais e métodos para as verificações da coordenação de isolamento, através dos levantamentos de curvas características dos isolamentos dos seccionadores, considerando a tensão crítica de descarga e o desvio padrão. Aplicando impulsos de tensão que qualificam a suportabilidade dos isolamentos de um seccionador, pode-se verificar a coordenação de isolamento entre as suas distâncias dielétricas.

Os resultados constataram a coordenação de isolamento para três tipos de seccionadores, utilizando como base o método direto da apresentação de gráficos com curvas que refletem o comportamento da suportabilidade dielétrica dos isolamentos. Excetuando as chaves de aterramento, pode ser generalizado para os demais tipos de seccionadores isolados a ar, visto serem as características de isolamento dependentes do ar e da superfície do isolador de que são compostos todos os tipos, possibilitando o conhecimento dos pontos em que há risco de falta de coordenação de isolamento no seccionador.

Este estudo indica que as especificações de seccionadores de alta tensão necessitam inserir verificações nos ensaios de tipo que comprovem a coordenação de isolamento.

Normalmente a condição mais crítica, para ensaios a seco, é para impulsos de polaridade positiva. Para ensaios sob chuva, devem também ser considerados os impulsos de polaridade negativa.

Quando se analisam as curvas de suportabilidade de isolamento autorrecuperativo, deve-se enfatizar os valores de tensão correspondentes a: 0,135% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{0,135\%}$ ; 10% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{10\%}$ ; 50% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{50\%}$ ; 90% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{90\%}$ ; 99,865% probabilidade de ocorrência de disrupção,  $U_{99,865\%}$ .

Os valores de impulso de tensão acima de  $U_{99,865\%}$  são chamados de tensão de impulso de descarga disruptiva do isolamento e os valores abaixo de  $U_{0,135\%}$  são definidos como tensão de impulso suportável do isolamento.

Além dos aspectos aleatórios envolvidos na probabilidade de falha do isolamento durante a realização dos experimentos, as condições atmosféricas devem sempre ser levadas

em consideração. As sobretensões reais são diferentes dos impulsos de laboratório usados para a determinação das curvas características de isolamento, elas também apresentam caráter estatístico, sendo impossível avaliar o efeito diferenciado de cada onda na suportabilidade dos intervalos.

Um aspecto importante nos cálculos estatísticos da curva dos isolamentos é o desvio-padrão de suportabilidade, pois sua influência nos resultados é considerável e sua determinação é imprecisa, principalmente para formas de onda não convencionais.

Observou-se que a verificação da coordenação de isolamento de seccionador contribui positivamente na segurança física dos colaboradores do SEP – Sistema Elétrico de Potência, além de manter a perfeita isolação dos diversos circuitos e equipamentos necessários à operação do SEP. Torna-se necessário garantir que uma eventual sobretensão, na condição mais crítica, ocorra entre a parte ativa e a base aterrada, e nunca entre a distância de seccionamento do seccionador.

É importante a criação de projetos de seccionadores que apresentem a correta função de coordenação de isolamento, como também é relevante a definição de um ensaio padronizado que verifique e certifique a existência de coordenação de isolamento. Há mister de trabalhos práticos laboratoriais e estatísticos que visem à determinação confiável do risco de falha dessa coordenação de isolamento em ensaios de tipo, principalmente para ondas com tempo de frente longas e impulsos com ressaltos, precisando de testes específicos.

Todavia, necessita-se definir os critérios de análise para a determinação da coordenação das suportabilidades dos intervalos isolantes do seccionador. Dessa forma, são apresentadas a seguir as “condições de criticidade” que os futuros ensaios de coordenação de isolamento do seccionador deverão representar em sua execução, considerando um desvio padrão de 6% do valor  $U_{50\%}$  e uma curva de distribuição cumulativa normal para impulsos de manobra.

Na Figura 4.7 é mostrada a análise gráfica da verificação das curvas de isolamento de um seccionador de 550 kV para a coordenação de isolamento no ponto de vista da “condição de criticidade: radical”. Em que o valor  $U_{0,13\%}$  do isolamento de *open-gap* deve ser maior que o valor  $U_{99,87\%}$  do isolamento fase-terra, além de ter o valor  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap* maior que o solicitado por norma.

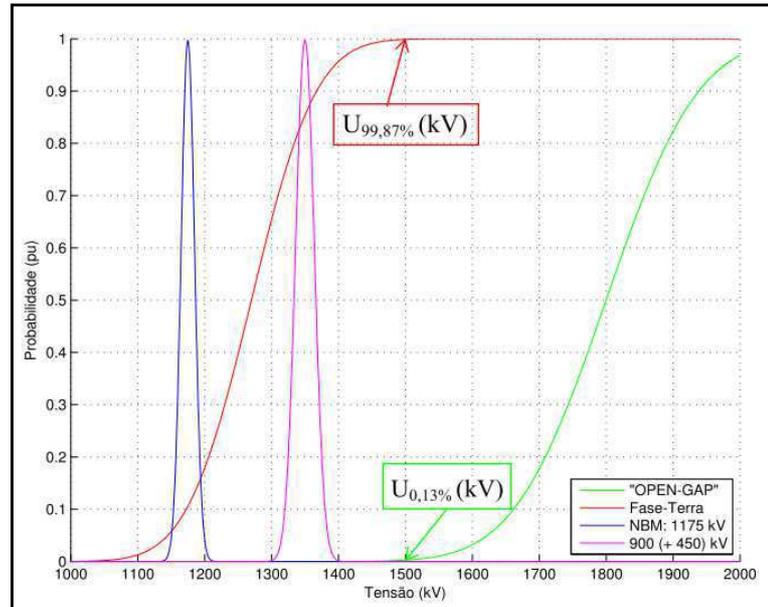


Figura 4. 7 – Análise gráfica de coordenação de isolamento - “condição de criticidade: radical”.

Na Figura 4.8 é mostrada a análise gráfica da verificação das curvas de isolamento de um seccionador de 550 kV para a coordenação de isolamento no ponto de vista da “condição de criticidade: crítica”. Em que o valor  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap* deve ser maior que o valor  $U_{90\%}$  do isolamento fase-terra, além de ter o valor  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap* maior que o solicitado por norma.

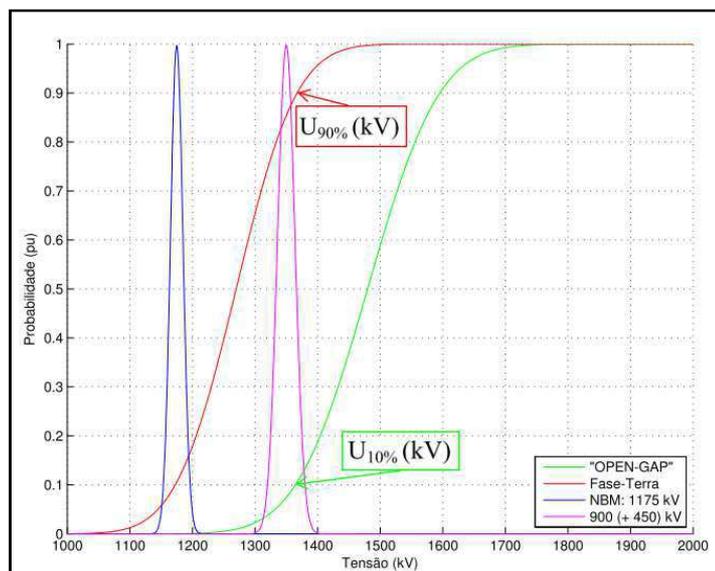


Figura 4. 8 – Análise gráfica de coordenação de isolamento - “condição de criticidade: crítica”.

Na Figura 4.9 é mostrada a análise gráfica da verificação das curvas de isolamento de um seccionador de 550 kV para a coordenação de isolamento no ponto de vista da “condição de criticidade: simples”. Em que o valor  $U_{10\%}$  do isolamento fase-terra deve ter uma tensão  $\Delta V_{norma}$  (175 kV), menor que o valor  $U_{10\%}$  do isolamento de *open-gap*. Este valor de  $U_{10\%}$  de isolamento de *open-gap* e fase-terra é o já solicitado pela norma brasileira. Todavia não são comparados entre si.

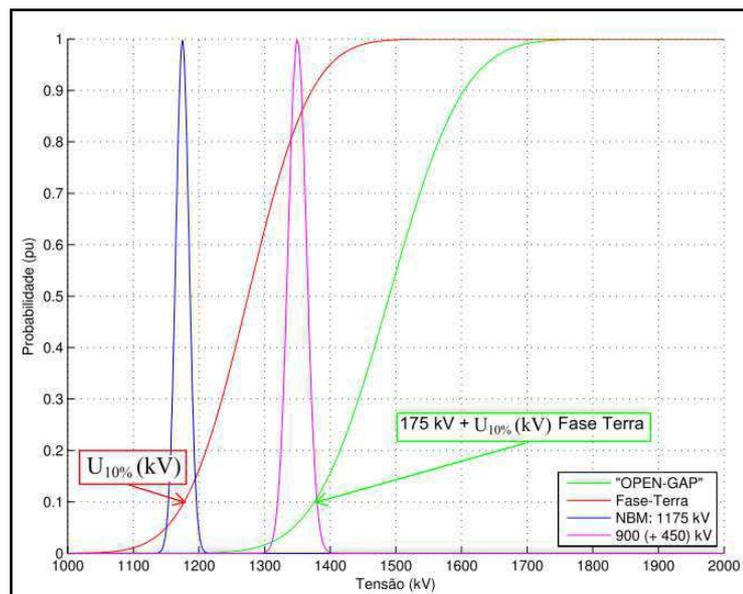


Figura 4.9 – Análise gráfica de coordenação de isolamento - “condição de criticidade: simples”.

Deve ser observado que, se aumentar o valor de  $\Delta V_{norma}$  (175 kV) ao valor  $U_{50\%}$  do isolamento fase-terra para se obter o valor  $U_{50\%}$  do isolamento de *open-gap*, pode-se ter uma distância elétrica de isolamento de *open-gap* abaixo do valor “entre contatos de seccionamento” indicado pela norma brasileira,  $900 \text{ kV}_{pico} + 450 \text{ kV}_{máx}$  (ABNT NBR IEC 62271-102, 2006), e o projeto do seccionador estará correndo um risco de não passar no teste de tipo dielétrico.

Assim, a “condição de criticidade” que traz a real segurança eliminando o risco de não haver descarga no isolamento de *open-gap* de um seccionador é a “condição de criticidade: radical”. Uma vez que a “condição de criticidade: simples” leva à insegurança quanto à garantia de não haver descarga no isolamento de *open-gap* de um seccionador.

Devido à dificuldade na realização de experimentos específicos e à pequena quantidade de trabalhos publicados sobre a coordenação de isolamento de seccionadores, não há formas confiáveis de escolha de um valor adequado. Não obstante, o valor da tensão crítica

de descarga e do desvio-padrão propositadamente pessimista, para surtos com tempo de frente longo, demonstra a importância e a necessidade de maiores investigações práticas, sendo necessário maior número de aplicações de impulso para a obtenção de consistência estatística dos valores representativos.

O método de ensaio utilizado para verificação da coordenação de isolamento do seccionador, através do levantamento das curvas características da rigidez dielétrica dos isolamentos entre contatos e entre as partes ativas e terra do seccionador aberto, nos trará a verificação completa desta coordenação. Todavia expõe todo o projeto dielétrico do seccionador e terá uma quantidade maior de impulsos a serem aplicados para este ensaio.

# Capítulo 5 – Conclusão

## 5.1 Conclusões

Ao longo desta dissertação, os objetivos foram atingidos. Através de estudos teóricos e experimentais dos isolamentos de seccionadores isolados a ar, foi investigada a coordenação de isolamento em três seccionadores de alta e extra-alta tensão.

O estudo das normas da ABNT e a análise dos ensaios dielétricos de tipo de seccionadores indicaram que os testes normalizados não verificam a coordenação de isolamento entre as distâncias dielétricas de *open-gap* e fase-terra dos seccionadores.

Os resultados das análises das curvas características de suportabilidade dos isolamentos mostraram que as “condições de criticidade”, para avaliação da coordenação de isolamento de um seccionador, dependem de quais pontos nas curvas estejam sendo analisados.

O procedimento proposto de verificação da coordenação de isolamento em seccionadores utiliza como base a comparação direta das curvas normais de suportabilidade dos isolamentos, obtidas pelo método *up and down* e, para melhorar a eficácia do procedimento, é necessário ter um maior número de aplicações de impulso, para dar consistência estatística aos valores de desvio padrão.

Conclui-se que, para contribuir positivamente na segurança física das pessoas no SEP, é necessária a elaboração de um teste padronizado nos ensaios dielétricos de tipo das normas de seccionadores que verifique a existência da coordenação de isolamento desses equipamentos.

## 5.2 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, é possível destacar os seguintes itens:

- Desenvolvimento de modelos matemáticos de estimação da suportabilidade baseados em processos físicos e observações experimentais, para ampliar a

compreensão do comportamento dos isolamentos, auxiliando no cálculo da probabilidade de falha com ondas de formas mais diversas;

- Aplicação de técnicas de processamento de sinais para análise de campo elétrico na geometria da parte ativa dos seccionadores, ajudando a ampliar a compreensão do comportamento dos isolamentos, a fim de se obter o aperfeiçoamento do projeto de seccionadores com a coordenação de isolamento eficiente;
- Avaliação econômica dos projetos de seccionadores de extra-alta tensão, considerando o impacto na redução de custos com materiais isolantes e condutores na fabricação, além de estruturas e fundações na sua aplicação;
- Análise estatística dos tipos de testes que verificam o nível de tensão suportável de isolamento, para definição de qual teste melhor se aplica na verificação da coordenação de isolamento.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDROV, G. N.; GERASIMOV, Y. A. Switching and lightning surge dielectric strength of UHV insulating suspension sets. Tokyo, 1991 (p. 335-337).

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60694:** Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta tensão e mecanismos de comando. Rio de Janeiro, Dez-2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 62271-102:** Equipamentos de alta tensão – Parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento, Dez, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6936:** Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Rio de Janeiro, 1992.

CARRARA, G. and DELLERA, L. Accuracy of an extended up-and-down method in statistical testing of insulation. *Electra* N° 23, 1972 (p. 159-175).

CARRARA, G. and DELLERA, L. Switching surges insulation coordination: switches, "anomalous" sparkovers, and possible generalization. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 85, set/1966 (p. 996-1007).

CARRARA, G. and HAUSCHILD, W. Statistical evaluation of dielectric test results. *Electra* N° 133, 1990 (p. 109-131).

CARRARA, G.; DELLERA, L.; SARTORIO, G. Switching surges with very long fronts (above 1500  $\mu$ s): effect of front shape on discharge voltage. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 89. Mar/1970 (p. 453-456).

CARRARA, G.; THIONE, L. "Switching Surge Strength of Large Air Gaps: A Physical Approach." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 95, n. 2, p. 512-524, mar./abr. 1976.

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO - CHESF. **ET-DSE-665 mar/2012** – Especificação técnica – Secionadores e chaves de aterramento – 550 kV, 245 kV, 145 kV e 72,5 kV. Recife, 2012.

CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES - CIGRÉ. Working Group - 33.03. Evaluation of the switching impulse strength of external insulation. Electra, n. 94, Paris, mai/1984 (p. 77-95).

D'AJUZ, A. et al. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro: Furnas, 1987.

D'AJUZ, A. et al: Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense, 1985.

DIXON, W. J.; MASSEY F. J. Introduction to statistical analysis, McGraw Hill, New York, 1969

DIXON, W. J.; MOOD, A.M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data. Journey of American Statistical Association. 1984 (p. 109-126)

FRONTIN, S. O. et al: Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas.(p. 477-529) Brasília: Teixeira, 2013.

GALLET, G. et al. – "General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 94, nº 6, nov./dez. 1975, p. 1989-1993.

HARADA, T.; AIHARA, Y.; AOSHIMA, Y. Influence of switching impulse wave shape on flashover voltages of air gaps. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 92, mai./jun., 1973 (p. 1085-1093).

HAUSCHILD, W.; MOSCH, W. Statistical techniques for high-voltage engineering. IEE Power Series N° 13, Peter Peregrinus Ltd. London, 1992.

HILEMAN, A. R. Insulation Strength Characteristics. Insulation Coordination for Power Systems. New York: Marcel Dekker, 1999. p. 31-87.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1313.1:** Standard for Insulation Coordination - Definitions, Principles, and Rules. New York, 1996.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **IEC-60071-1:** Insulation coordination. Part 1: Terms, Definitions, Principles and rules. Geneva, 1993.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **IEC-60071-2:** Insulation coordination. Part 2: application guide. Geneva, 1996.

KIND, D.; FESER, K. High-Voltage Test Techniques, SBA Publications. New Delhi, 1999.

KOUNO, T; OIKAWA, T. Standard deviation of flashover probability. J.I.E.E. (Japan) 87 (1967) 8, (p. 84-89).

KUCERA, J. Confidence limits of the 50-% flashover voltage in the up-and-down method. Acta Technica CSAV 17, 1972 (p.61-72)

LLOYD, K. J.; ZAFFANELLA, L. E. - Insulation for Switching Surges. Em: LAFOREST, J. J.: Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above. 2<sup>a</sup> ed. Palo Alto: EPRI, 1982. p. 503-544.

MENEMENLIS, C.; ISAKSSON, K. The front shape of switching impulses and its effect on breakdown Parameters. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 93, set./out.,1974 (p. 1380-1389).

PARIS, L.; CORTINA, R. Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. 87, n. 4, p. 947-957, abr. 1968.

PARIS, L. Influence of Air Gap Characteristics on Line-to-Ground Switching Surge Strength. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. 86, n. 8, p. 936-947, ago. 1967.

WATANABE, Y. Switching Surge Flashover Characteristics of Extremely Long Air Gaps. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. 86, n. 8, p. 933-936, ago. 1967.