

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**JORGE ANDRÉ MENEGHEL JITSUKAWA**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO  
DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A AR**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO  
DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A AR**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JORGE ANDRÉ MENEGHEL JITSUKAWA

## **COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A AR**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Marcos Telló, CEEE

Doutor pela Universidade Federal de Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2010.

## **AGRADECIMENTOS**

A toda a família.

Ao professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pela atenção e compreensão.

Ao meu amigo professor Marcos Telló, pela ajuda e disposição.

Aos colegas e amigos.

À Universidade e demais professores.

## **RESUMO**

O objetivo desse trabalho é apresentar os aspectos básicos relacionados ao estudo de coordenação de isolamento em sistemas elétricos de potência. Por meio da utilização do programa computacional ATP, os passos envolvidos modelagem de transitórios elétricos caracterizados por frentes rápidas de onda são descritos. É realizada uma análise acerca dos impactos causados por descargas atmosféricas em uma subestação isolada a ar.

**Palavras-chaves: Sobreensões, Transitórios, ATP, Modelagem, Surtos Atmosféricos, Subestações Isoladas a Ar, Coordenação de Isolamento.**

## **ABSTRACT**

The aim of this paper is to present the basic aspects related to the study of insulation coordination in power systems. Through the use of the software ATP, the steps involved in modeling electrical transients characterized by fast front waves are described. An analysis is made about the impacts caused by lightning in an air-insulated substation.

**Keywords: Overvoltages, Transients, ATP, Modeling, Lightning Surges, Air-Insulated Substations, Insulation Coordination.**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE ENERGIA.....</b>	<b>15</b>
2.1	<b>Introdução .....</b>	<b>15</b>
2.2	<b>Sobretensões .....</b>	<b>15</b>
2.2.1	<b>Sobretensões Atmosféricas.....</b>	<b>16</b>
2.2.2	<b>Sobretensões de Manobra .....</b>	<b>18</b>
2.2.3	<b>Sobretensões Temporárias.....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS DE CONTROLE DE SOBRETENSÕES.....</b>	<b>21</b>
3.1	<b>Introdução .....</b>	<b>21</b>
3.2	<b>Blindagem Contra Descargas Atmosféricas.....</b>	<b>21</b>
3.3	<b>Resistores de Pré-Inserção .....</b>	<b>22</b>
3.4	<b>Modificações na Configuração do Sistema.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DOS ISOLAMENTOS .....</b>	<b>24</b>
4.1	<b>Introdução .....</b>	<b>24</b>
4.2	<b>Classificação dos Isolamentos.....</b>	<b>24</b>
4.3	<b>Suportabilidade e Ensaios Padronizados .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>PRINCÍPIOS BÁSICOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO .....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>30</b>
6.1	<b>Introdução .....</b>	<b>30</b>
6.2	<b>Ocorrências .....</b>	<b>31</b>
6.3	<b>Simulação Computacional .....</b>	<b>34</b>
6.4	<b>Modelagem .....</b>	<b>35</b>
6.4.1	<b>Linhas de Distribuição e de Subtransmissão .....</b>	<b>36</b>
6.4.2	<b>Barramentos e Conexões entre Equipamentos .....</b>	<b>37</b>
6.4.3	<b>Disjuntores e Chaves Seccionadoras.....</b>	<b>37</b>
6.4.4	<b>Transformadores .....</b>	<b>38</b>
6.4.5	<b>Banco de Capacitores .....</b>	<b>39</b>
6.4.6	<b>Reator .....</b>	<b>39</b>
6.4.7	<b>Pára-Raios .....</b>	<b>39</b>
6.4.8	<b>Isoladores e Aterramento.....</b>	<b>41</b>
6.4.9	<b>Surto Atmosférico.....</b>	<b>41</b>
6.5	<b>Procedimentos .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
7.1	<b>Introdução .....</b>	<b>45</b>
7.2	<b>Disjuntores .....</b>	<b>45</b>
7.3	<b>Pára-Raios .....</b>	<b>47</b>
7.4	<b>Transformador de Força .....</b>	<b>49</b>
	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sobretensões em Sistemas de Extra Alta Tensão (EAT) [4].	16
Figura 2: Descargas Atmosféricas.	17
Figura 3: Exemplo típico de Sobretensão Atmosférica [3].	18
Figura 4: Exemplo de Sobretensão de Manobra [3].	19
Figura 5: Exemplo de Sobretensão Temporária [3].	20
Figura 6: Arranjo elétrico de um disjuntor com resistor de pré-inserção [5].	22
Figura 7: Características e ensaios padronizados para tensões em baixa frequência [13].	27
Figura 8: Características e ensaios padronizados de sobretensões transitórias [13].	27
Figura 9: Subestação Porto Alegre 16.	30
Figura 10: Diagrama unifilar operacional da SE PAL 16.	31
Figura 11: Disjuntores avariados [15].	32
Figura 12: Número admissível de operações de um disjuntor. [15].	34
Figura 13: Representação de disjuntores e chaves seccionadoras.	38
Figura 14: Comparação do erro simulado para distintos modelos de pára-raios [23].	40
Figura 15: Representação dos pára-raios (modelo IEEE) e equivalente trifásico modelado.	41
Figura 16: Probabilidade da magnitude da corrente do raio [27].	42
Figura 17: Forma de onda da corrente.	43
Figura 18: Sobretensões simuladas no primeiro disjuntor.	46
Figura 19: Sobretensões simuladas no quarto disjuntor.	47
Figura 20: Sobretensões simuladas no primeiro pára-raios.	48
Figura 21: Sobretensões simuladas no quarto pára-raios.	48
Figura 22: Sobretensões sobre o TF com surto aplicado na LD conectada ao AL 1.	49
Figura 23: Sobretensões sobre o TF com surto aplicado na LD conectada ao AL 4.	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Alimentador
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BARR	Barramento
C	Capacitância
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
DJ	Disjuntor
EAT	Extra Alta Tensão
H	Henry
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
L	Indutância
LD	Linha de Distribuição
NBI	Nível Básico de Isolamento
NBR	Norma Brasileira
NIM	Nível de Impulso de Manobra
p.u.	Por Unidade
SE	Subestação
TC	Transformador de Corrente
TCTRT	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória

TF	Transformador de Força
TP	Transformador de Potencial
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
PAL	Porto Alegre
R	Resistência
SF6	Hexafluoreto de enxofre
s	segundos
SECC	Chave Seccionadora
V	Volt

## 1 INTRODUÇÃO

O planejamento de um sistema elétrico de potência requer a execução de uma série de estudos a fim de determinar a alternativa de transmissão mais adequada para a ampliação e a expansão do sistema. Tais estudos compreendem a análise de fluxo de potência – para a determinação das correntes nominais dos equipamentos; o estudo de curto-circuito – para a determinação da suportabilidade ao curto-circuito e a capacidade de interrupção dos disjuntores; a análise de estabilidade; e o estudo de transitórios eletromagnéticos – fenômenos transitórios envolvendo variações súbitas de tensão e corrente.

A confiabilidade de um sistema elétrico de potência está condicionada à ocorrência de surtos e à probabilidade de ruptura de isolamentos. Dessa forma, o propósito do estudo de transitórios eletromagnéticos é o de certificar-se de que não ocorram falhas de isolamento em linhas e subestações por meio da correta coordenação de isolamento entre os equipamentos e os dispositivos de proteção. Além disso, o estudo em questão fornece informações sobre possíveis falhas no sistema antes de sua ocorrência, assim como subsídios para compreensão de suas causas e os possíveis meios de prevenção.

O processo de coordenação de isolamento pode ser definido como o conjunto de procedimentos utilizados – principalmente para a especificação de equipamentos – que tem por objetivo fundamental a redução da probabilidade de danos aos equipamentos e interrupções do fornecimento de energia a um nível econômico e operacionalmente aceitável, tendo em vista as solicitações que podem ocorrer no sistema e as características dos dispositivos de proteção.

Dessa forma, para se alcançar um desempenho satisfatório na coordenação de isolamento de linhas de transmissão ou subestações, faz-se necessário um amplo entendimento de características específicas do sistema, tais como solicitações dielétricas,

suportabilidade do isolamento, dispositivos e arranjos de proteção aplicáveis, além do desempenho aceitável e dos custos globais envolvidos.

É importante ressaltar que o avanço tecnológico dos dispositivos de proteção e a evolução no sistema de aterramento contribuem de forma significativa para a redução dos níveis básicos de isolamento, mantendo, desse modo, os conceitos de coordenação de isolamento sob constante avaliação. Comitês de padronização buscam, continuamente, coordenar as necessidades dos usuários com a capacidade dos fabricantes, tendo-se sempre em vista uma margem entre os níveis de tensão esperados e as capacidades nominais dos equipamentos, de forma a assegurar-lhes vida útil longa e disponibilidade.

O objetivo desse trabalho é apresentar os principais aspectos envolvidos na coordenação de isolamento de subestações isoladas a ar, de modo que o conteúdo foi dividido em sete capítulos.

O presente capítulo destina-se a uma breve introdução dos princípios básicos de coordenação de isolamento, bem como seu objetivo em projetos de linhas de transmissão e subestações.

O capítulo 2 é dedicado aos distúrbios elétricos que podem ocorrer em um sistema de potência, sobretudo o fenômeno de sobretensão. O conhecimento das características de cada uma das categorias de sobretensões serve como ponto de partida para a elaboração de projetos bem sucedidos.

O capítulo 3 aborda, de forma sucinta, os métodos básicos de controle de sobretensão. Embora as sobretensões não possam ser evitadas, valores menos prejudiciais podem ser obtidos com a aplicação de determinados métodos.

O capítulo 4 é reservado para as características e os aspectos fundamentais referentes aos isolamentos, necessários para a correta compreensão dos métodos utilizados na

coordenação de isolamento. As solicitações elétricas são apresentadas de forma padronizada, juntamente com os respectivos ensaios no qual um isolamento é submetido.

O capítulo 5 descreve, brevemente, os métodos de coordenação de isolamento utilizados em projetos de linhas de transmissão e subestações. A escolha do método a ser utilizado depende fundamentalmente do tipo de isolamento e do nível de tensão em questão.

O capítulo 6 apresenta um estudo de caso envolvendo uma subestação isolada a ar. Dentre as hipóteses levantadas, propõe-se uma análise computacional com o objetivo de determinar se o problema ocorrido foi decorrente da falha de coordenação de isolamento. São descritos os passos necessários para a realização da modelagem do problema.

A avaliação dos resultados, oriundos da simulação realizada, é realizada no capítulo 7. Possíveis causas e conseqüências são analisadas.

## **2 DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE ENERGIA**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Os sistemas elétricos de potência devem ser projetados para suportar as solicitações extremas de tensão e corrente, embora operem em regime permanente durante grande parte do tempo.

O estudo de sobretensões é de fundamental importância para a coordenação de isolamento, pois fornece informações utilizadas para adaptar as características de suportabilidade de isolamentos aos esforços a que, possivelmente, serão submetidos.

Por outro lado, as sobrecorrentes não possuem a mesma importância na coordenação de isolamento e não serão abordadas. Seu estudo ajuda na determinação dos esforços térmicos e mecânicos nos equipamentos e barramentos de uma subestação e na possibilidade de sensibilização de determinados esquemas de proteção.

### **2.2 SOBRETENSÕES**

Sobretensões são distúrbios que ocorrem sobre a tensão nominal do sistema de energia elétrica, entre fase e terra ou entre fases, em determinadas situações. Podem ser definidas como tensões transitórias, variáveis com o tempo, cujo valor máximo é superior ao valor de crista das tensões máximas de operação do sistema. Caracterizam-se em dois tipos: sobretensões externas e sobretensões internas. A diferença entre ambas, no entanto, depende apenas da localização dos eventos que as causaram.

As sobretensões externas são originadas fora do sistema considerado, sendo sua principal fonte as descargas atmosféricas. As sobretensões internas, em contrapartida, são causadas por eventos dentro do sistema em si, como, por exemplo, manobra de disjuntores ou curtos-circuitos.

Tradicionalmente, no entanto, as sobretensões são classificadas quanto à sua origem em sobretensões atmosféricas, sobretensões de manobra e sobretensões temporárias [1] [2] [3] [4]. Além da origem do fenômeno, a diferença entre as três categorias está na amplitude, na duração e no grau de amortecimento da forma de onda. A figura 1 representa de forma comparativa as características dos três tipos de sobretensão em relação à amplitude e ao tempo de duração.

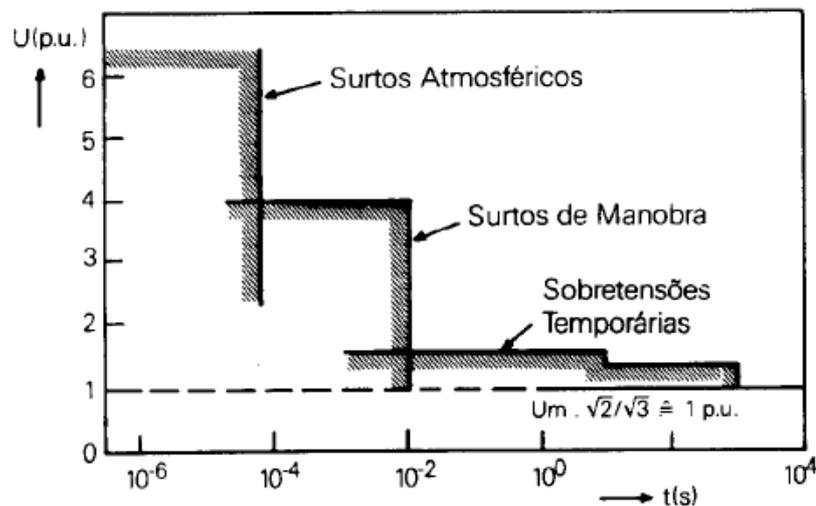


Figura 1: Sobretensões em Sistemas de Extra Alta Tensão (EAT) [4].

Os conceitos básicos envolvidos na modelagem matemática de cada um dos três tipos de sobretensões, anteriormente classificadas, não fazem parte da presente abordagem, podendo ser encontradas em [2] [4] [5] [6] e [7].

### 2.2.1 SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

Sobretensões atmosféricas são causadas pela incidência de descargas elétricas atmosféricas, em um determinado ponto do sistema. A incidência dessa descarga pode acontecer diretamente sobre o equipamento (caso atinja uma subestação), sobre as linhas de transmissão ou, até mesmo, de forma indireta – por indução. Caso a descarga incida

diretamente uma determinada linha de transmissão, pode dar origem a surtos de tensão que se propagam ao longo da mesma, indo de encontro aos equipamentos das subestações. A figura 2 apresenta a ocorrência de um surto atmosférico nas proximidades de linhas de transmissão.



Figura 2: Descargas Atmosféricas.

As conseqüências causadas por surtos atmosféricos podem ser térmicas – como, por exemplo, incêndios e explosões, mecânicas – devido às forças eletrodinâmicas exercidas nos condutores paralelos – ou, ainda, por meio de interferência eletromagnética – resultando no mau funcionamento de sistemas de controle, monitoração e comunicação. Além disso, graves danos podem ser causados aos equipamentos, como o rompimento do dielétrico ou a diminuição da vida útil por estresse repetitivo. Situações perigosas para seres vivos podem surgir, além da redução na continuidade dos serviços prestados devido a interrupções.

As sobretensões atmosféricas são caracterizadas por uma frente de onda rápida, da ordem de poucos a dezenas de microssegundos. A figura 3 mostra um exemplo típico de uma sobretensão atmosférica obtida em simulação, no terminal de um transformador.

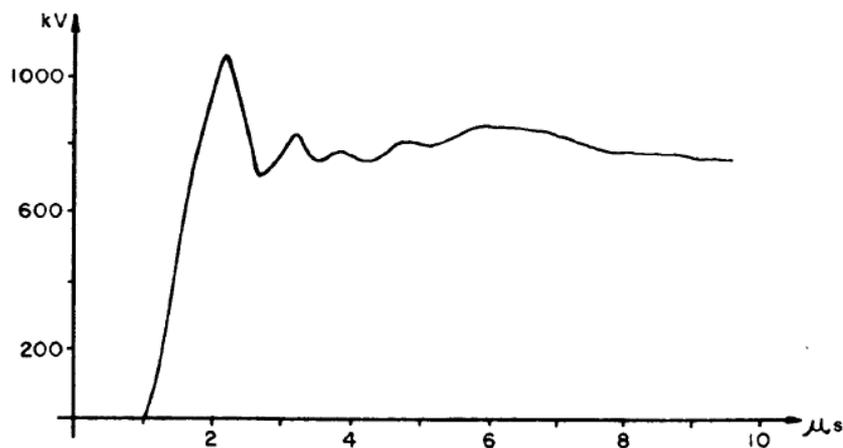


Figura 3: Exemplo típico de Sobretensão Atmosférica [3].

O surto atmosférico pode ser classificado, ainda, por critérios que distinguem sua direção e polaridade. Assim, podem ter sentido ascendente quando a descarga piloto segue da terra para a nuvem e descendente quando ocorre movimento inverso. A polaridade é dita positiva quando a descarga ocorre a partir da parte positivamente carregada da nuvem e negativa quando da parte negativamente carregada. A detalhada descrição do fenômeno pode ser encontrada em [4] e [8].

### 2.2.2 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Sobretensões de manobra são originadas a partir de mudanças bruscas na configuração do sistema, causadas por chaveamento de equipamentos ou pela ocorrência de curtos-circuitos. Os principais eventos que provocam esse tipo de sobretensão são a energização de transformadores, rejeição de carga, energização e religamento de linhas de transmissão e eliminação de faltas.

Possuem forma de onda de impulso ou irregular e são, em geral, altamente amortecidas e de curta duração, caracterizadas por uma frente de onda da ordem de dezenas a centenas de microssegundos. Sobretensões de manobra tornam-se importantes em níveis elevados de transmissão, acima de 245 kV [9] [10].

Uma importante característica é o aspecto probabilístico, uma vez que o exato instante das operações de fechamento ou abertura de chaves – ou da ocorrência de faltas – não pode ser determinado de maneira prévia. Assim, os sistemas são projetados considerando a probabilidade de ocorrência das sobretensões e sua distribuição no sistema, além da relação custo-benefício.

A determinação das sobretensões de manobra é usualmente realizada através de programas computacionais devido à complexidade dos cálculos envolvidos. A amplitude e a duração das sobretensões dependem dos parâmetros, da configuração e das condições em que o sistema se encontra no exato momento da manobra. Por isso, a mesma operação – efetuada em um mesmo sistema, mas em momentos distintos – pode resultar em valores diferentes de sobretensão.

A figura 4 apresenta um exemplo típico de sobretensão de manobra oscilatória, para uma simulação de rejeição de carga no sistema.

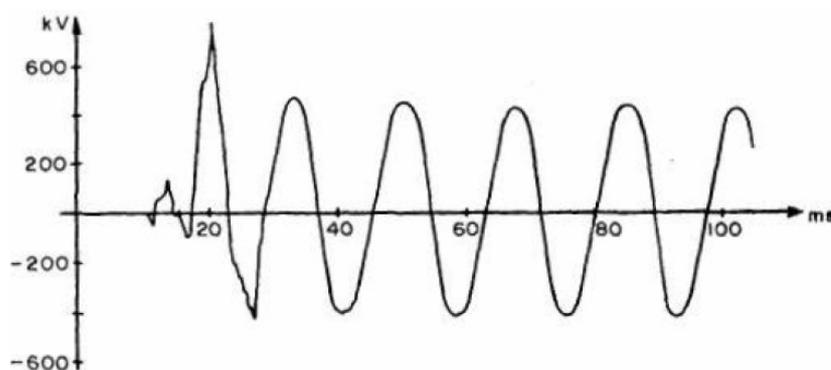


Figura 4: Exemplo de Sobretensão de Manobra [3].

### 2.2.3 SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

Também conhecidas como sobretensões sustentadas, as sobretensões temporárias são caracterizadas, principalmente, por sua longa duração – superiores a dezenas de milissegundos – e reduzidos picos de amplitude – em geral, inferiores a 1,5 p.u.. Ocorrem após o surgimento de uma sobretensão com frente de onda lenta decorrente de manobras, faltas, fenômenos não lineares (como, por exemplo, a ferorrressonância) e efeito Ferranti.

Em alguns casos podem apresentar constantes de tempo não amortecidas, necessitando de avaliações no seu comportamento temporal. Persistem no sistema até que o mesmo seja modificado ou que seja eliminada a causa que a originou. Os equipamentos a elas submetidos terão que ser especificados de modo a suportá-las por muito tempo.

A figura 5 mostra um exemplo típico de sobretensão temporária, obtida através de simulação de rejeição de carga.

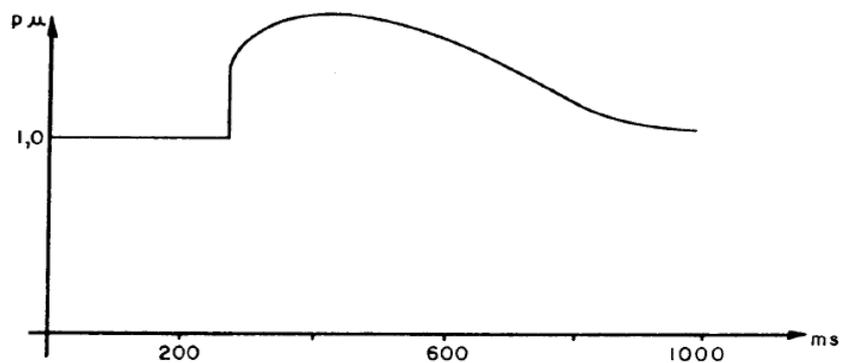


Figura 5: Exemplo de Sobretensão Temporária [3].

### **3 MÉTODOS DE CONTROLE DE SOBRETENSÕES**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Embora as sobretensões não possam ser evitadas em sistemas de potência, assim como sua total supressão ser uma operação extremamente difícil, valores menos prejudiciais são obtidos com a aplicação de métodos de controle. Tais métodos possuem o objetivo de limitar a magnitude das sobretensões a valores compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos por meio do desvio do excesso de tensão, que poderia provocar danos à instalação.

Existem diversas formas de controle de sobretensões, sendo os métodos e dispositivos mais utilizados a blindagem de linhas de transmissão e subestações contra descargas atmosféricas – através de cabos pára-raios e pára-raios, os resistores de pré-inserção e as modificações na configuração do sistema.

Aspectos como eficácia, custo e simplicidade de implementação são critérios determinantes na escolha do mecanismo a ser adotado. Além disso, deve-se considerar que cada tipo de sobretensão é dependente das características dos equipamentos usados, da configuração do sistema e dos seus critérios operativos. A seguir, são apresentados, de forma sucinta, os principais métodos de controle de sobretensões. Maiores detalhes podem ser encontrados em [4] e [5].

#### **3.2 BLINDAGEM CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

A blindagem de subestações e de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas constitui-se na maneira mais eficaz de controle de sobretensão.

A proteção é obtida por meio da utilização de pára-raios, cabos pára-raios e hastes de proteção. O método empregado no projeto é denominado método eletrogeométrico.

### 3.3 RESISTORES DE PRÉ-INSERÇÃO

A instalação de resistores de pré-inserção junto à câmara do disjuntor consiste em um dos meios mais efetivos de redução das sobretensões causadas por manobras decorrentes da energização e do religamento de linhas de transmissão. A figura 6 apresenta o modelo elétrico que representa o funcionamento de um disjuntor com resistor de pré-inserção.

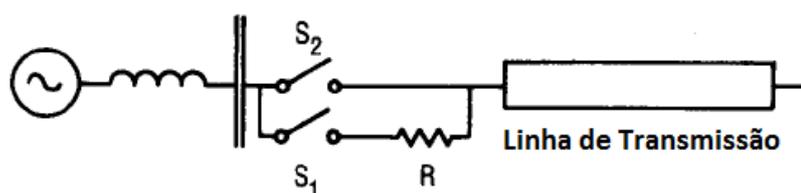


Figura 6: Arranjo elétrico de um disjuntor com resistor de pré-inserção [5].

A inserção do resistor é simulada através do fechamento da chave  $S_1$  mantendo a chave  $S_2$  aberta, em um primeiro instante. O resistor em série à linha se comporta como um divisor de tensão, restringindo a tensão efetiva sobre a linha. Curto-circuitando o resistor, através do fechamento da chave  $S_2$ , surge um transitório correspondente à queda de tensão instantânea do resistor que é passada à linha. Quanto maior for o valor do resistor, menor será a sobretensão no primeiro estágio e maior será a sobretensão no segundo estágio [4] [5] [6] [11].

### 3.4 MODIFICAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A redução dos valores de sobretensão decorrentes de operações de manobra é possível através de mudanças na configuração do sistema. Deve-se salientar que cada mudança possui prós e contras, e que a escolha deve ser determinada por critérios operativos e financeiros.

A forma de redução mais simples consiste no seccionamento de linhas de transmissão longa, por meio da instalação de disjuntores intermediários. A sobretensão produzida pelo chaveamento de uma linha curta é menor que em uma linha longa.

Outra modificação advém da instalação de reatores em derivação e da aplicação de reatores de compensação, visto que reduzem o efeito Ferranti e diminuem as sobretensões de manobra. O efeito Ferranti faz com que a tensão aumente ao longo da linha de transmissão e, na ausência de compensação reativa, torna a tensão de regime no final da linha superior a do início.

Uma solução relativamente complexa e menos utilizada é obtida através da imposição de restrições ao chaveamento de disjuntores, não permitindo que operem ao menos que determinadas condições sejam satisfeitas. Um exemplo consiste no fechamento sincronizado de disjuntores, com os contatos sendo fechados no instante em que cada fase passar por zero.

As sobretensões atmosféricas podem ser reduzidas com a diminuição da resistência de pé de torre. Outras formas de controle de sobretensão por meio de modificações na configuração do sistema podem ser encontradas em [4] [5] e [11].

## **4 CARACTERÍSTICAS DOS ISOLAMENTOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Os isolamentos podem ser definidos como sendo os materiais utilizados para suportar a tensão do sistema. Abrangem os elementos isolantes sólidos, líquidos e gasosos – além dos espaçamentos no ar. Possuem um comportamento que depende do tipo de esforço elétrico aplicado.

A falha do isolamento possui como principal característica o aspecto estatístico relacionado ao seu comportamento. Ou seja, a tensão de ruptura do meio isolante pode variar de teste para teste, quando os mesmos testes são realizados em amostras isolantes idênticas. A variação nos resultados pode ocorrer devido à relação existente entre a tensão de ruptura e o gradiente de campo elétrico no dielétrico [1] [7].

### **4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ISOLAMENTOS**

Os isolamentos podem ser classificados de acordo com a finalidade a que se destinam – como, por exemplo, para o uso externo ou interno – e quanto à exposição a intempéries, tais como umidade, poluição, entre outros.

No entanto, sob o ponto de vista de projeto, os isolamentos possuem uma característica de maior importância, que se configura na capacidade de recuperação da rigidez dielétrica após a ocorrência de uma descarga. Os isolamentos são, dessa forma, classificados como isolamento auto-recuperante ou isolamento não auto-recuperante.

O isolamento auto-recuperante – também chamado de isolamento auto-regenerativo – recompõe suas propriedades dielétricas após a interrupção. Essas propriedades são recuperadas pela própria renovação do meio dielétrico, como, por exemplo, o isolamento em ar, no caso de isoladores em linhas de transmissão.

O isolamento não auto-recuperante – também chamado de isolamento não-regenerativo – não possui a capacidade de recuperação de sua rigidez elétrica. Ocorrendo uma descarga, haverá danificação total ou parcial do isolamento. Os equipamentos mais importantes de uma subestação são constituídos desse tipo de isolamento, principalmente em sua parte interna, como nos transformadores de força e nos reatores.

### **4.3 SUPORTABILIDADE E ENSAIOS PADRONIZADOS**

A suportabilidade dos meios isolantes é a propriedade de uma isolação de se opor a descargas disruptivas. Em outras palavras, é a maior tensão que um isolamento pode ser submetido sem que ocorra a disrupção do meio.

Visando assegurar o desempenho satisfatório dos equipamentos que compõem os sistemas de potência, o comportamento do isolamento é testado em laboratório através de ensaios dielétricos. Para tanto, comitês de estudo padronizaram ensaios para cada tipo de solicitação elétrica e definiram uma classificação para as sobretensões distinta da apresentada no capítulo 2, visto que certos fenômenos podem resultar em sobretensões que se enquadram em uma ou outra classe. Como exemplo, pode-se citar o caso da ocorrência de um surto atmosférico que, por meio de um transformador, pode produzir, no lado do secundário, ondas similares as sobretensões de manobra.

Dessa forma, a norma brasileira *NBR 6939/1999 – Coordenação de Isolamento – Procedimento 10 – Projeto de Revisão da NBR 6939/1987* [12], em conformidade com a norma internacional *IEC 60071-1 Insulation Coordination Part 1: Definitions, Principles and Rules* [9], classifica os esforços elétricos a que os equipamentos estarão submetidos de acordo com a magnitude, o tempo de duração e o grau de amortecimento da tensão ou sobretensão, ao invés da localização de sua ocorrência. Essas solicitações são definidas como:

- *Tensão contínua (frequência industrial)* – tensão com valor eficaz constante, continuamente aplicada a qualquer arranjo isolante;
- *Sobretensão temporária* – sobretensão de frequência industrial de duração relativamente longa, fracamente amortecida ou não amortecida;
- *Sobretensão transitória* – sobretensão de curta duração, oscilatória ou não, em geral bastante amortecida. É caracterizada de acordo com o período correspondente entre o valor mínimo até o valor máximo da tensão (tempo de subida) e o período correspondente entre o valor máximo da tensão até o seu valor final (tempo de descida). O tempo de subida e o tempo de descida são chamados de frente de onda e cauda, respectivamente. As sobretensões transitórias são classificadas, desse modo, como sendo de frente lenta, de frente rápida ou, ainda, de frente muito rápida.
- *Sobretensão combinada* – consiste de duas ou mais componentes de tensão, simultaneamente aplicadas entre cada um dos terminais bifásicos de um isolamento fase-fase ou isolamento e terra. É classificada a partir da componente de valor de pico mais elevado.

As figuras 7 e 8 apresentam as principais características das solicitações elétricas padronizadas, bem como a comparação com seus respectivos ensaios, também normalizados.

BAIXA FREQUÊNCIA		
Tipo	Tensão Permanente	Sobretensão Temporária
Forma da Onda		
Intervalo de Tempo	$f = 50$ ou $60$ Hz $T_t \geq 3600$ s	$10 < f < 500$ Hz $0,03 \leq T_t \leq 3600$ s
Intervalo de Tempo Padronizado (Ensaio)	$f = 50$ ou $60$ Hz $T_t$ Não definido	$48 \leq f \leq 62$ Hz $T_t = 60$ s
Tipo de Ensaio	Não definido	Freqüência Industrial de Curta Duração

Figura 7: Características e ensaios padronizados para tensões em baixa freqüência [13].

SOBRETENSÃO TRANSITÓRIA			
Tipo	Frente Lenta	Frente Rápida	Frente Muito Rápida
Forma da Onda			
Intervalo de Tempo	$20 < T_p < 5000$ $\mu$ s $T_2 \leq 20$ ms	$0,1 < T_1 < 20$ $\mu$ s $T_2 \leq 300$ $\mu$ s	$3 < T_f < 100$ ns $T_t \leq 3$ ms
Intervalo de Tempo Padronizado (Ensaio)	$T_p = 250$ $\mu$ s $T_2 = 2500$ $\mu$ s	$T_1 = 1,2$ $\mu$ s $T_2 = 50$ $\mu$ s	Não definido
Tipo de Ensaio	Impulso de Manobra	Impulso Atmosférico	

Figura 8: Características e ensaios padronizados de sobretensões transitórias [13].

Os ensaios padronizados são bons indicadores da suportabilidade dos isolamentos ante as solicitações da rede elétrica. Contudo, em determinados casos, é necessário avaliar o

comportamento do isolamento diante de solicitações não padronizadas, uma vez que as sobretensões reais possuem um comportamento no tempo distinto dos valores normalizados.

Os equipamentos elétricos caracterizam-se por possuir níveis de isolamento padronizados, ditados pela sua tensão nominal de operação e denominados Nível Básico de Isolamento (NBI) e Nível de Impulso de Manobra (NIM).

O NBI é o nível que estabelece a suportabilidade do equipamento em relação às sobretensões de origem externa enquanto que o NIM é o nível que estabelece a suportabilidade para as sobretensões de origem interna.

## 5 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

Existem dois métodos no qual é possível a realização da coordenação de isolamento em função das sobretensões. Tais métodos são chamados de método convencional e de método estatístico.

Também denominado método determinístico, o método convencional tem seu uso apropriado para isolamentos não auto-regenerativos devido ao desconhecimento acerca do risco de falha envolvido. É recomendado para níveis de tensão inferiores a 245 kV [9]. O nível de isolamento é definido adicionando-se uma margem de segurança ao nível de proteção do dispositivo, determinado para solicitação máxima. O nível de segurança, recomendado em [14], é alcançado por meio de um fator mínimo de 1,20.

O método estatístico é baseado na seleção dos níveis de isolamento através de um determinado risco de falha selecionado, levando-se em consideração a natureza estatística das sobretensões e da suportabilidade do dielétrico. Para a aplicação desse método, as grandezas devem ter suas distribuições estatísticas determinadas, identificando-se a natureza, as magnitudes e a probabilidade de ocorrências das sobretensões, bem como as características de suportabilidade do isolamento e as características climáticas da região da instalação. A sua utilização é limitada aos isolamentos auto-regenerativos e para tensões acima de 245 kV.

De forma geral, a aplicação da coordenação de isolamento em subestações isoladas a ar consiste na seleção e na especificação dos níveis básicos de isolamento de todos os equipamentos da subestação.

Embora os surtos de manobra devam ser considerados, são os surtos atmosféricos que impõem os maiores níveis de tensão, fazendo-se necessária uma avaliação detalhada de surtos incidentes, considerando-se a magnitude, forma e probabilidade de ocorrência.

Atenção especial deve ser dada às distâncias de isolamento entre fases e a terra, a quantidade, localização e de pára-raios.

## 6 ESTUDO DE CASO

### 6.1 INTRODUÇÃO

Com objetivo de apresentar os procedimentos relacionados a estudos de coordenação de isolamento, um caso real envolvendo uma subestação isolada a ar é analisado. A subestação em questão é a Subestação Porto Alegre 16 (SE PAL 16), localizada na Rua Comendador Aroldo Strut, na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

A SE PAL 16 pertence à Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e é visualizada na figura 9.



Figura 9: Subestação Porto Alegre 16.

Essa subestação é composta por um transformador de três enrolamentos, ligação estrela–delta–estrela aterrada, relação de transformação 69/13,8, potência nominal de 42 MVA, sendo alimentada por duas linhas de subtransmissão de tensão 69 kV. Possui um banco

de capacitores de 7,2 MVar e fornece energia elétrica por meio de oito módulos alimentadores, a um nível de tensão de 13,8 kV. O diagrama unifilar operacional da SE PAL 16 é visualizado na figura 10.

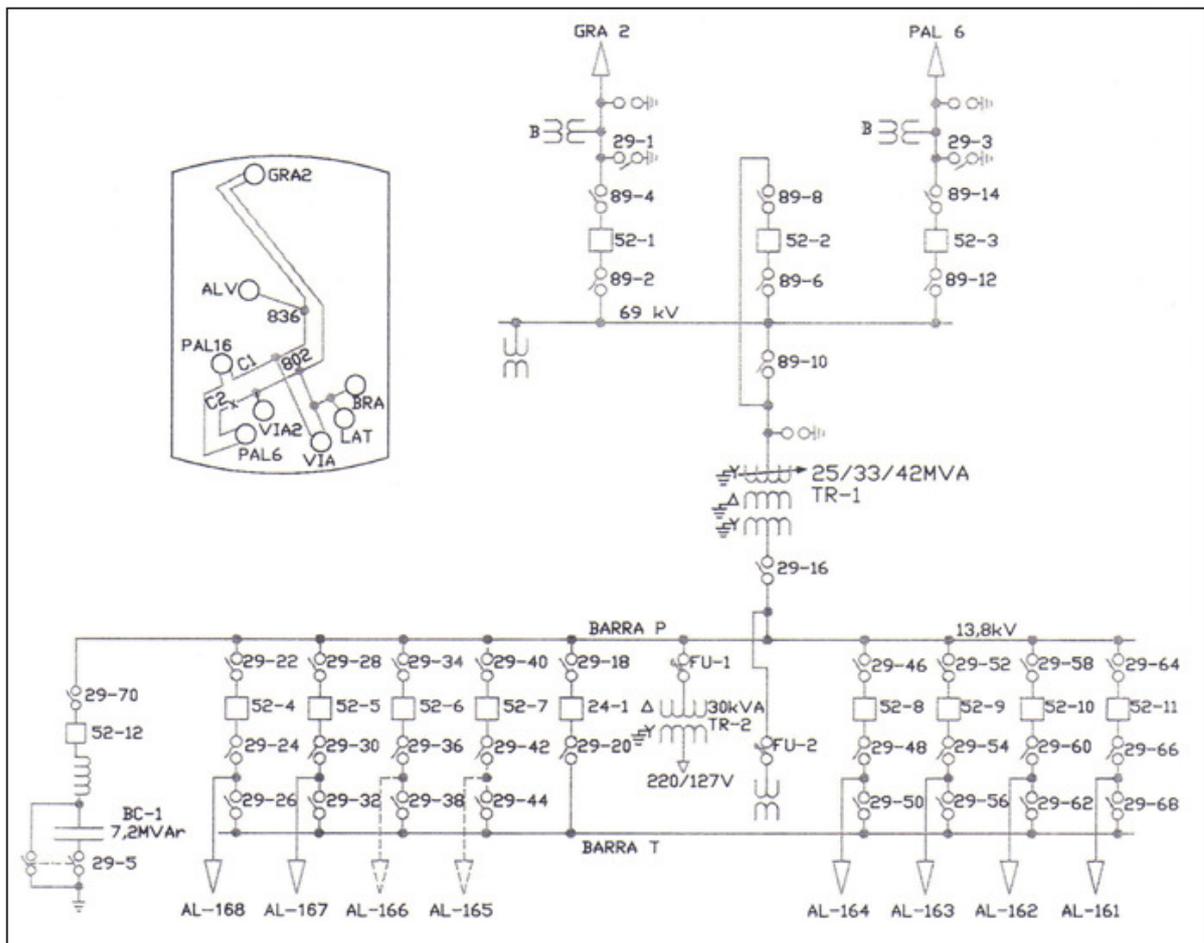


Figura 10: Diagrama unifilar operacional da SE PAL 16.

## 6.2 OCORRÊNCIAS

De acordo com [15], verificou-se a ocorrência de uma sucessão de explosões de disjuntores envolvendo os módulos alimentadores de números um e quatro (AL 1 e AL 4) da subestação. Tais ocorrências foram registradas em um curto intervalo de tempo – aproximadamente cinco anos.

Alguns dos disjuntores avariados podem ser visualizados na figura 11.

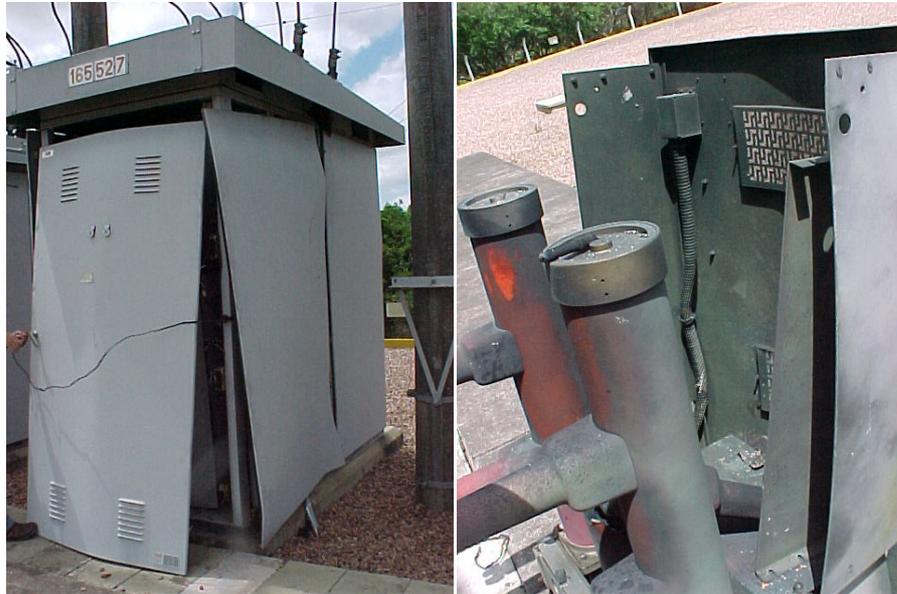


Figura 11: Disjuntores avariados [15].

A explosão de disjuntores ocorre quando as tensões suportáveis pelo mesmo são excedidas, sendo relacionada a falhas no equipamento e solicitações impostas pelo sistema elétrico de potência.

As falhas associadas ao equipamento possuem origem na fabricação, manutenção ou superação do disjuntor, podendo ser ocasionadas por [15]:

- Desgaste dos contatos do disjuntor – tendo como consequência o sobreaquecimento e a eventual explosão, dependendo do caso;
- Comprometimento do isolamento – causando descargas elétricas e podendo provocar a explosão do disjuntor. Tem como origem a contaminação, a baixa pressão e a existência de umidade, no meio dielétrico. Em disjuntores a hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), a integridade do dielétrico também pode ser comprometida quando resíduos químicos oriundos da decomposição do gás –

resultado de arcos produzidos durante operações – aderem à superfície interna da câmara do disjuntor. A ausência de manutenção regular impede a detecção de descargas elétricas internas e, em consequência, podem resultar na explosão do equipamento;

- Falha no mecanismo de operação e controle – resultando na falha de atuação do disjuntor – causando, por exemplo, retardo na abertura de uma das fases sob condição de defeito.

Dentre as falhas associadas ao sistema elétrico de potência, convém destacar a superação do equipamento, podendo ser causada por:

- Corrente de carga – ocorre quando o valor da corrente de carga supera a corrente nominal do disjuntor;
- Corrente de curto circuito – ocorre quando o valor da corrente de curto-circuito trifásico supera a capacidade de interrupção simétrica do disjuntor;
- Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) - tensão que surge entre os terminais de um pólo do disjuntor, durante a eliminação de uma falta. É caracterizada por um valor de pico e uma taxa de crescimento da tensão (TCTRT) entre os seus terminais e a terra. Os valores da TRT dependem das características elétricas da topologia da rede, da potência de curto circuito, do nível de tensão do sistema, da magnitude da corrente de falta e de sua localização;
- Corrente de corte “*current chopping*” – Correntes de baixo valor podem ser produzidas por falhas para a terra, acarretando em corte de corrente e sobretensões bastante elevadas – devido à reignição do arco elétrico no interior

da câmara do disjuntor. Essas correntes tendem a ser indutivas e de valor de até 10 A.

- Número permitido de operações de chaveamento do disjuntor.

A figura 12 apresenta um ábaco, com finalidade ilustrativa, indicando a área de atuação de um disjuntor considerando o número admissível de operações de chaveamento em função da corrente de curto-circuito.

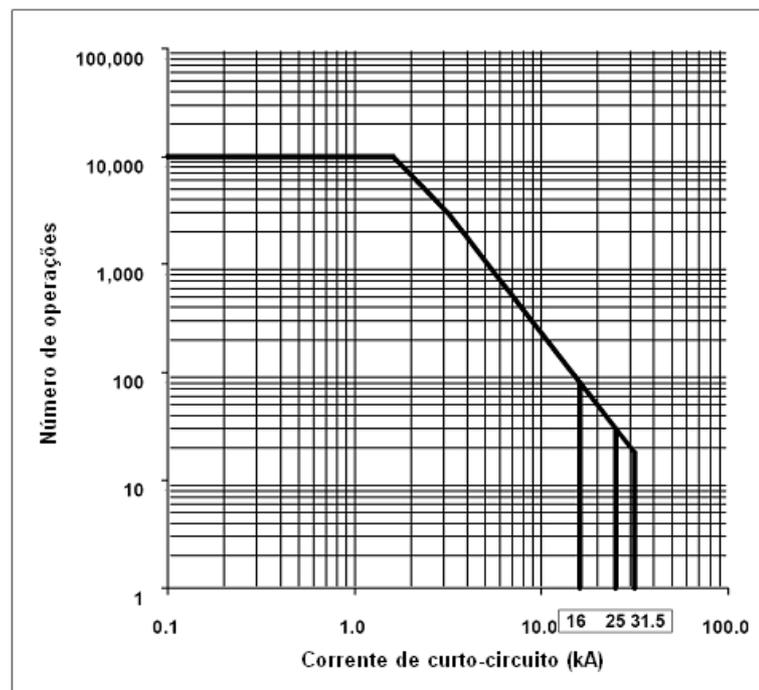


Figura 12: Número admissível de operações de um disjuntor. [15]

### 6.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o objetivo de determinar se a explosão de disjuntores da SE PAL 16 foi causada por falha de coordenação de isolamento, foram realizadas simulações através do programa computacional *Alternative Transients Program (ATP)*.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por meio de um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos, e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados [16] [17].

Através do programa ATP, é possível a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, entre outros.

Perante os recursos oferecidos pelo ATP, o programa requer do usuário conhecimentos específicos sobre o assunto e técnicas apropriadas para o desenvolvimento e incorporação de novos modelos, o que confere determinada complexidade quanto à sua utilização.

Ainda, o ATP possui um módulo gráfico (denominado ATPDraw [18]) que permite a montagem gráfica de circuitos elétricos, reduzindo os esforços e o tempo despendido com programação. A representação dos componentes foi realizada como o auxílio do ATPDraw.

Quanto ao estudo de coordenação de isolamento desenvolvido, trata-se de um estudo de sobretensões atmosféricas. Basicamente, descargas atmosféricas aplicadas sobre a linha de distribuição, na saída dos módulos alimentadores que apresentaram problema, foram simuladas. Os valores de sobretensão obtidos por meio da simulação foram comparados com o nível básico de isolamento dos disjuntores.

#### **6.4 MODELAGEM**

Visando a obtenção de resultados precisos em simulações computacionais, a representação dos componentes que compõe a subestação deve ser feita de forma apropriada para a faixa de frequências apresentada pelos transitórios a serem analisados.

A precisão dos resultados varia de acordo com o grau de detalhamento envolvido na representação da subestação. Contudo, a fidelidade absoluta na representação dos elementos que constituem a subestação torna-se difícil, em alguns casos, devido ao elevado número de componentes encontrados no interior da mesma. Desse modo, visando o preenchimento dos requisitos necessários para a realização das simulações, certas simplificações passam a ser admitidas – como, por exemplo, a representação de alguns componentes por meio de parâmetros concentrados. Tais simplificações, apesar de conservativas, demonstraram-se apropriadas, sendo confirmadas pela prática. [19] [20]

Por se tratar de um estudo envolvendo sobretensões atmosféricas, caracterizados por transitórios de frentes rápidas de onda, os elementos foram representados para a faixa de frequências que varia de 10 *kHz* a 3 *MHz*. Os itens a seguir descrevem, de forma sucinta, o modelo adotado para cada componente considerado na realização da simulação. Na ausência de informação, valores típicos encontrados na literatura foram utilizados.

#### **6.4.1 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO E DE SUBTRANSMISSÃO**

As linhas ligadas à subestação foram representadas por meio do modelo J. Marti, disponível no software ATP. Esse modelo provê um comportamento apropriado para as linhas, fornecendo maior precisão nos resultados, pois leva em consideração a natureza distributiva dos parâmetros e sua resposta à variação da frequência [16] [17] [21]. Seu uso é limitado ao intervalo de tempo em que os cálculos são realizados nas simulações (*time step*).

Aspectos relacionados às linhas, tais como altura, comprimento do vão, flecha, espaçamento entre fases e resistência dos condutores foram levados em consideração. O condutor utilizado na modelagem das linhas de distribuição é de alumínio, do tipo *Tulip*, enquanto que, nas linhas de subtransmissão o cabo de cobertura usado é de aço, do tipo *HS* bitola 3/8", e os cabos que compõem as fases são de alumínio, do tipo *Cosmos*.

As torres de subtransmissão foram representadas como sendo linhas sem perdas e com parâmetros constantes. Devido ao estudo considerar a incidência direta de descargas atmosféricas sobre as fases da linha (não sendo, portanto, considerado o fenômeno de *backflashover*), a impedância de surto da torre foi representada por uma impedância média, calculada por meio da *equação 1*. Nessa equação,  $h$  corresponde ao valor da altura da torre e  $r$  ao raio da base da torre. O valor obtido foi de  $172,666 \Omega$ . Assume-se velocidade de propagação de  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

$$Z = 60 \ln \frac{h\sqrt{2}}{r} \quad (1)$$

Valores referentes à resistividade média do solo, resistência da malha de aterramento da subestação, bem como a resistência de pé da torre, foram fornecida pela CEEE, e encontram-se nos Anexos B e C. O vão considerado para as linhas de distribuição foi de  $50 \text{ m}$ .

#### **6.4.2 BARRAMENTOS E CONEXÕES ENTRE EQUIPAMENTOS**

Devido aos pequenos trechos envolvidos (comprimentos inferiores a  $6 \text{ m}$ ), os cabos que interligam os equipamentos da subestação foram representados por uma indutância concentrada no valor de  $1 \mu\text{H}/\text{m}$ , conforme sugerido em [19] [20].

Os barramentos da subestação foram divididos em pequenos trechos e descritos por meio do modelo J. Marti. Os condutores utilizados e as respectivas características elétricas, bem como informações adicionais, encontram-se no Anexo B.

#### **6.4.3 DISJUNTORES E CHAVES SECCIONADORAS**

Os disjuntores e as chaves seccionadoras foram modelados por meio de chaves ideais, com fechamento e abertura controlados por tempo, especificado pelo usuário. Foram

consideradas as capacitâncias de fuga entre os contatos e entre os contatos e a terra. Devido à falta de informação, valores típicos foram utilizados, baseados em [20].

A figura 13 mostra a representação utilizada, com os respectivos valores escolhidos. O arco elétrico não foi modelado. Modelos de arco podem ser encontrados em [19] e [22].

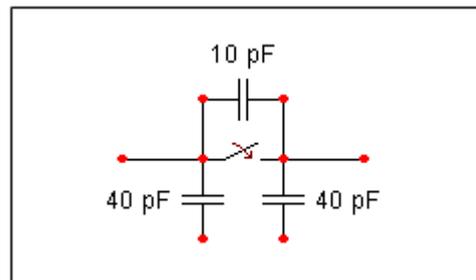


Figura 13: Representação de disjuntores e chaves seccionadoras.

#### 6.4.4 TRANSFORMADORES

Em estudos envolvendo transitórios de frentes rápidas de onda, a modelagem dos transformadores pode ser realizada de duas maneiras. A primeira consiste em uma abordagem rigorosa, que requer a determinação da matriz de impedâncias do transformador, dependente da frequência, a fim de usá-la para calcular os parâmetros de um modelo. Essa matriz é calculada a partir da estrutura interna do transformador ou a partir de medidas realizadas em testes [19].

A segunda consiste em uma abordagem simplificada, em que o transformador é representado pelo valor correspondente a sua capacitância para a terra. Esta descrição pode ser adotada quando se deseja calcular a tensão do transformador para a terra, ou quando se quer representar o efeito correspondente a tensão transferida de um enrolamento a outro [19] [20].

Diante da ausência de dados, optou-se por utilizar a abordagem simplificada na representação dos transformadores. O valor da capacitância utilizado para o transformador de força foi de  $1 \text{ nF}$  [19].

O mesmo procedimento foi adotado na representação dos demais transformadores. As capacitâncias adotadas na modelagem do transformador de potencial (TP) e do transformador de corrente (TC) foram de  $1300 \text{ pF}$  e  $800 \text{ pF}$ , respectivamente. Já o para o transformador de serviços auxiliares, utilizou-se  $200 \text{ pF}$  [7].

#### 6.4.5 BANCO DE CAPACITORES

O banco de capacitores foi representado por três capacitâncias equivalentes, uma para cada da fase. A capacitância equivalente foi obtida através dos valores nominais do banco de capacitores (potência reativa nominal de  $7,2 \text{ MVAR}$  e tensão nominal de  $13,8 \text{ kV}$ ) e com o auxílio das equações 2 e 3. Nessas equações,  $X_c$  representa a reatância equivalente do capacitor;  $V$  a tensão nominal, entre fases;  $Q$  a potência reativa nominal do banco de capacitores;  $f$  a frequência de operação do sistema; e  $C_{eq}$  a capacitância equivalente.

$$X_c = \frac{V^2}{Q} \quad (2)$$

$$C_{eq} = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (3)$$

O valor calculado foi de  $100,287 \text{ }\mu\text{F}$ .

#### 6.4.6 REATOR

O reator ligado em série ao banco de capacitores foi representado por meio de uma indutância concentrada no valor de  $40 \text{ mH}$  (informação obtida junto à CEEE).

#### 6.4.7 PÁRA-RAIOS

Os pára-raios possuem um comportamento elétrico não-linear, dependente da frequência. A modelagem adequada de suas características dinâmicas é de fundamental importância para estudos envolvendo coordenação de isolamento. Existem diversos modelos que representam esse comportamento.

Em geral, os diferentes modelos apresentam resultados satisfatórios. A figura 14 expõe o erro percentual de alguns desses modelos, proveniente de um estudo realizado [23] que comparou a resposta de simulações computacionais com dados obtidos por testes, em pára-raios de 400 kV.

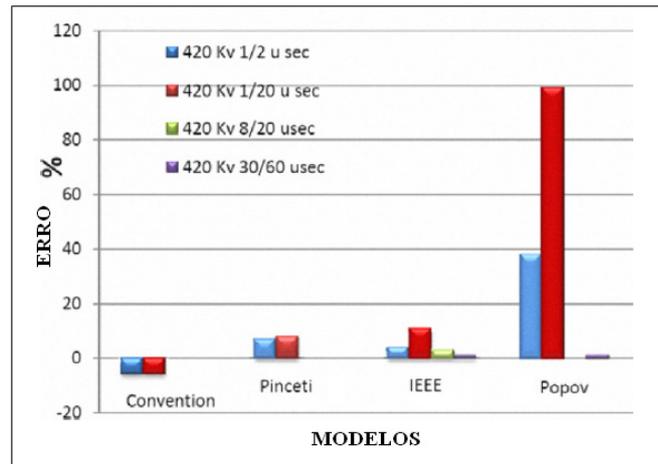


Figura 14: Comparação do erro simulado para distintos modelos de pára-raios [23].

Os pára-raios que compõem a SE PAL 16 são do tipo de óxido de zinco (ZnO) e sua representação foi feita através do modelo proposto pelo *Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos* (IEEE) [24]. O modelo é visualizado na figura 15. Os valores correspondentes aos elementos lineares foram obtidos com o auxílio das equações 4, 5, 6, 7 e 8. Nessas equações,  $n$  denota o número de colunas paralelas do pára-raios, enquanto que a variável  $d$  corresponde à altura, em metros. Dados retirados do catálogo do fabricante [25] foram utilizados. Os valores calculados encontram-se no Anexo D.

$$L_0 = 0,2 \frac{d}{n} \quad (4)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} \quad (5)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} \quad (6)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} \quad (7)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} \quad (8)$$

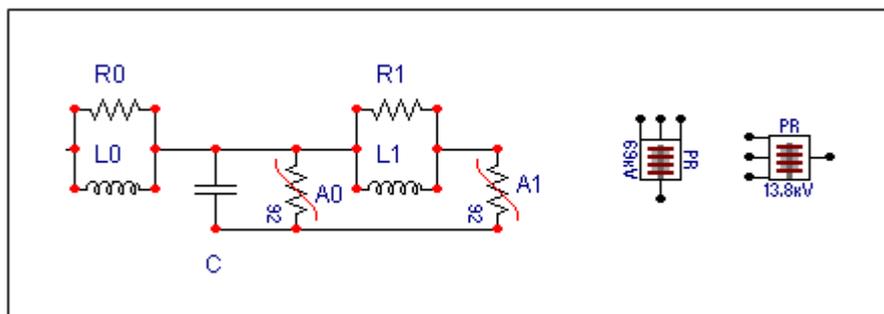


Figura 15: Representação dos para-raios (modelo IEEE) e equivalente trifásico modelado.

#### 6.4.8 ISOLADORES E ATERRAMENTO

A representação dos isoladores é feita através de capacitâncias concentradas. Valores típicos de  $60 \text{ pF}$  foram utilizados [20].

Quanto à malha de aterramento da subestação e a resistência de aterramento de pé das torres, a modelagem ocorreu por meio de um resistor, com valor correspondente as respectivas resistências equivalentes. Apesar da impedância de aterramento variar com a frequência – podendo assumir valores superiores àqueles medidos em regime permanente – e seu valor não ser o mesmo para toda a extensão da malha – no caso da subestação – tal simplificação foi adotada, pois não há consenso na aplicabilidade prática das diferentes abordagens existentes, interpretação dos resultados e validação dos modelos [26]. Os valores das resistências foram fornecidos pela CEEE, sendo de  $0,909 \Omega$  e  $15 \Omega$ , para a malha de aterramento da subestação e o pé das torres, respectivamente.

#### 6.4.9 SURTO ATMOSFÉRICO

A representação do surto atmosférico foi realizada através do modelo *Heidler*, disponível no programa ATP. Esse modelo possibilita o ajuste do tempo de frente de onda e do tempo de cauda, além da amplitude de tensão e corrente.

O surto foi representado por uma fonte de corrente, sendo aplicado em distâncias distintas. Devido à falta de dados referentes às intensidades das descargas atmosféricas ocorridas na região em que a subestação está localizada, o valor da magnitude da corrente foi extraído da figura 16 [27]. Essa figura apresenta a distribuição aproximada para a magnitude da corrente de descarga direta dos raios. Descargas de polaridade negativa são de interesse, visto que a incidência de descargas positivas é um evento de baixíssima probabilidade de ocorrência [4] [20]. Adotou-se 17 kA como sendo o valor de pico da corrente, pois, de acordo com a curva, 50 % das descargas registradas excedem essa importância. Desse modo, tem-se a representação do caso que corresponde a 50 % da ocorrência dos surtos. A figura 17 mostra a forma de onda obtida para a corrente, considerando valores normalizados para os tempos de frente de onda e de cauda (1,2 e 50  $\mu$ s, respectivamente).

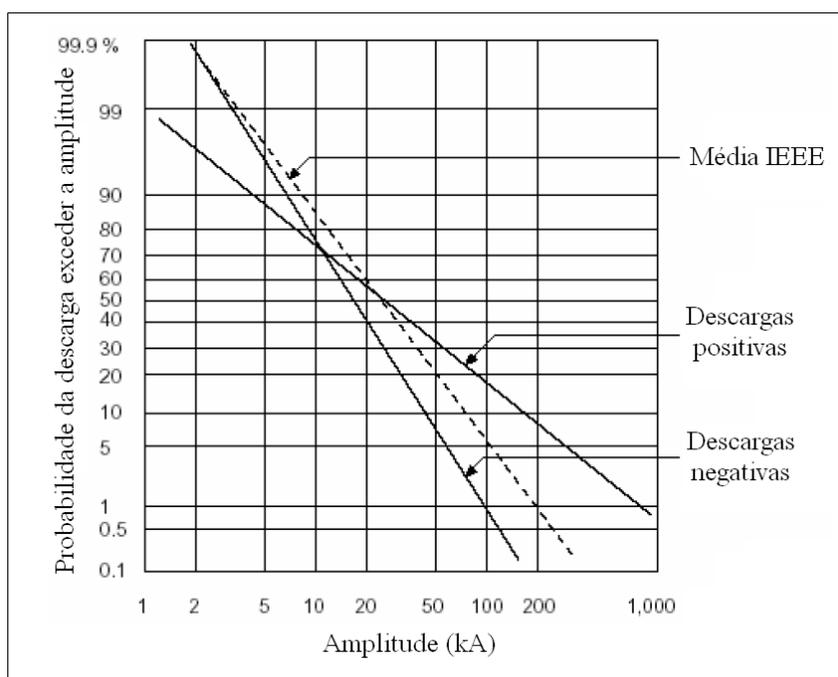


Figura 16: Probabilidade da magnitude da corrente do raio [27].

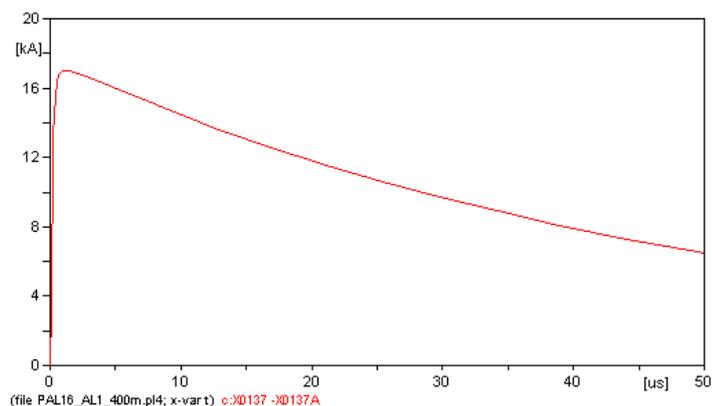


Figura 17: Forma de onda da corrente.

É possível, ainda, representar o surto atmosférico por meio de uma fonte de tensão. O valor máximo de sobretensão que atinge a subestação é limitado pela tensão de ruptura do isolamento da cadeia de isoladores [28]. Por essa razão, a amplitude da fonte de tensão deve ser equivalente ao valor da suportabilidade da cadeia de isoladores, para ondas de polaridades negativas. O valor que corresponde a essa imposição para os isoladores de  $13,8 \text{ kV}$  é de  $110 \text{ kV}$ .

## 6.5 PROCEDIMENTOS

Inicialmente, os componentes e as discontinuidades que compõem a subestação foram minuciosamente estudados e modelados, da forma mais adequada. Com a finalidade de facilitar a representação elétrica, a subestação foi dividida em seções e modelada por meio de blocos, podendo ser visualizados no Anexo A.

A fim de evitar reflexões indesejadas de onda nas extremidades das linhas, o método adotado foi acrescentar 3 km de linha em cada terminação [29]. Dessa forma, evita-se o surgimento de sobretensões não realistas.

A tensão pré-falta – representada por uma fonte ideal de tensão, localizada junto às linhas de subtransmissão de  $69 \text{ kV}$  – foi ajustada levando-se em consideração o pior caso. Tal

fato deve-se ao caráter aleatório do instante em que as descargas atmosféricas incidem sobre as linhas.

Por não ter importância em estudos de transitórios de frente rápida de onda [19], a representação equivalente do restante da rede não foi realizada.

Considerando a alta eficácia que a blindagem existente na subestação proporciona, foi descartada a hipótese de incidência de raios diretamente sobre a instalação [4] [20]. Os surtos atmosféricos foram aplicados sobre as linhas de distribuição, ligadas aos alimentadores que apresentaram defeito. Foram escolhidas distâncias para a simulação da queda dos raios, com a condição de que não fossem muito pequenas – pois, nesse caso, as descargas provavelmente seriam atraídas pela blindagem da subestação, tornando inútil a simulação – tampouco muito grandes – não superiores a 2 km, pois, desse modo, a onda sofreria grande atenuação.

As cargas ligadas aos alimentadores acabaram sendo excluídas, pois as ondas por elas refletidas sofrem atenuação através da linha, não contribuindo com a máxima tensão verificada. Demais partes da subestação – tais como: banco de capacitores, módulo de serviços auxiliares, entre outros – foram mantidos em operação, pois contribuem com o aumento da tensão.

Por reduzir o pico das sobretensões geradas entre 5 a 20%, o efeito corona foi ignorado [20].

Após a implementação dos procedimentos descritos, a simulação foi realizada. Foram efetuadas medições de tensão sobre os disjuntores e os pára-raios instalados junto aos módulos alimentadores que apresentaram problema. Adicionalmente, o transformador de força foi estudado.

Com a finalidade de investigar a possibilidade de falha de coordenação de isolamento – por meio da especificação dos equipamentos – e de posse dos níveis de tensão averiguados no interior da subestação, efetuou-se a comparação das sobretensões com NBI dos aparatos.

## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 7.1 INTRODUÇÃO

Os itens subseqüentes apresentam a comparação do NBI dos equipamentos com a máxima tensão simulada, por meio do perfil lateral das sobretensões.

Por tratar-se de uma subestação que possui níveis de tensão inferiores a 245 kV, o método determinístico deve ser utilizado na especificação dos equipamentos. Como a norma brasileira *NBR 8186 – Guia de Aplicação de Coordenação de Isolamento - Procedimento* recomenda a utilização de um fator mínimo de segurança de 20% para a proteção dos equipamentos contra surtos atmosféricos, foi calculada a máxima tensão admissível sobre o equipamento em análise. A margem de proteção foi representada nos gráficos através de faixas de cores amarela (para NBI de 95 kV) e cinza (para NBI de 125 kV).

O surto foi injetado sobre a linha de distribuição, ligada ao alimentador em estudo, a 200, 400, 800 e 1600 m de distância da subestação.

### 7.2 DISJUNTORES

Os valores referentes ao NBI dos dois últimos disjuntores que explodiram eram de 95 e 125 kV [15]. Considerando-se a margem de segurança, os máximos valores de tensão – na qual os disjuntores possam estar submetidos – são de 76 e 100 kV, respectivamente.

As figuras 18 e 19 apresentam o perfil lateral das sobretensões simuladas nos disjuntores instalados junto ao módulo do primeiro e do quarto alimentador, com o surto sendo aplicado na correspondente linha de distribuição.

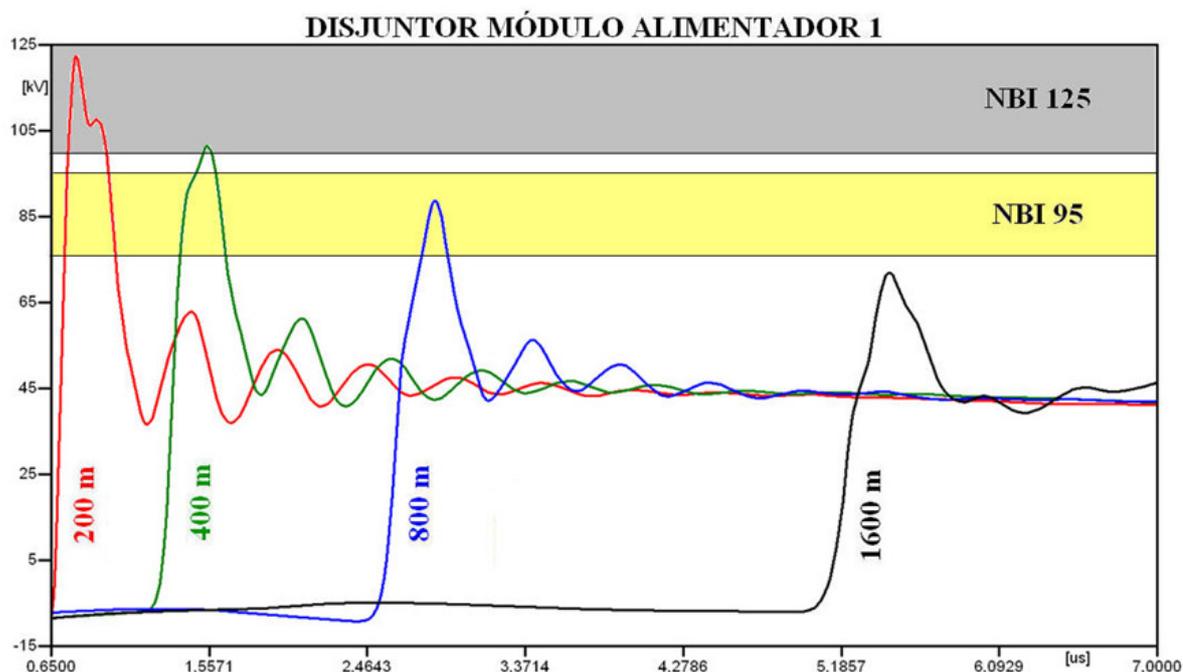


Figura 18: Sobretensões simuladas no primeiro disjuntor.

Conforme o esperado, maiores níveis de tensão foram constatados quando a incidência de descargas atmosféricas ocorre o mais próximo da subestação. Quanto maior à distância, maior será a atenuação causada pela linha e, conseqüentemente, menor a sobretensão que chega a subestação.

Observando-se a figura 18, constata-se a existência da possibilidade de explosão do disjuntor de NBI de 95 kV. Apenas sobretensões originadas de surtos que ocorrerem a distâncias superiores de, aproximadamente, 1600 m da subestação estarão dentro dos critérios estabelecidos.

Em relação ao disjuntor de NBI de 125 kV, a falha está condicionada a ocorrência de surtos à distância máxima de 400 m da subestação.

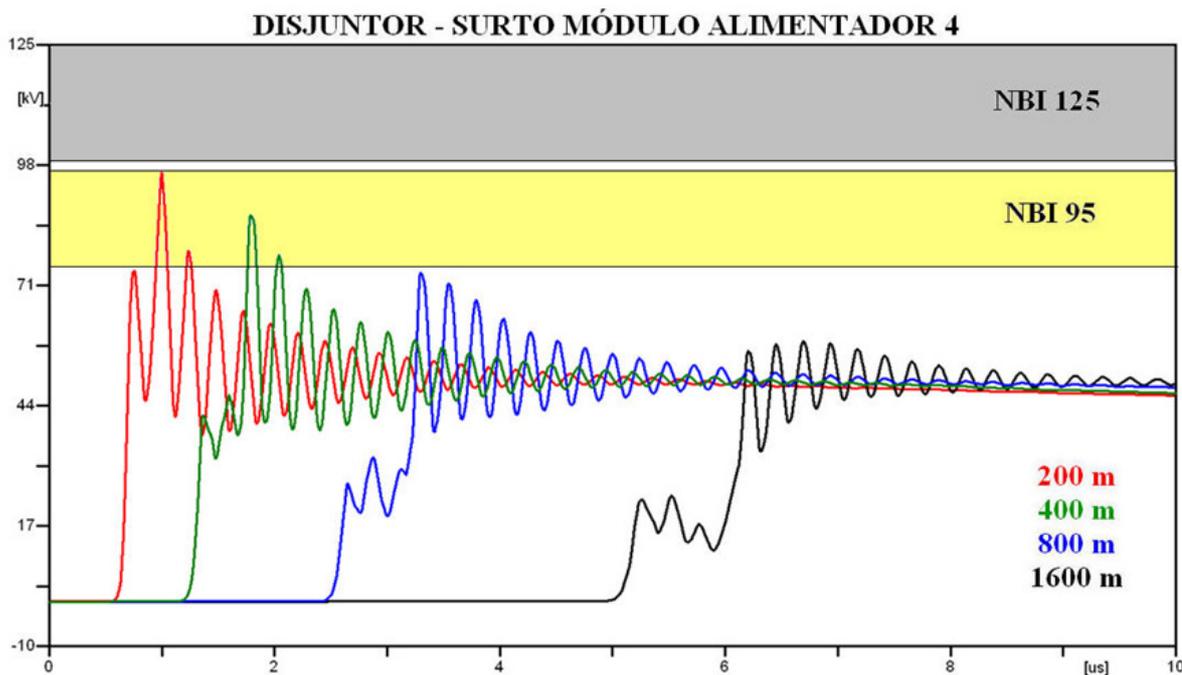


Figura 19: Sobretensões simuladas no quarto disjuntor.

Analisando-se a figura 19, constata-se que existe possibilidade de explosão do disjuntor de NBI de 95 kV, para os raios que caírem sobre a linha de distribuição a distâncias inferiores de, aproximadamente, 800 m da subestação.

Quanto ao disjuntor de NBI de 125 kV, não existe possibilidade de explosão, pois as sobretensões simuladas encontram-se abaixo do limite inferior da margem de proteção.

### 7.3 PÁRA-RAIOS

Análise semelhante é feita aos pára-raios e demais equipamentos. Por possuírem NBI de 125 kV, a máxima tensão admissível sobre os pára-raios instalados junto aos módulos alimentadores é de 100 kV. As figuras 20 e 21 apresentam o perfil lateral das sobretensões quando o surto é aplicado na linha de distribuição ligada aos módulos alimentadores um e quatro, respectivamente.

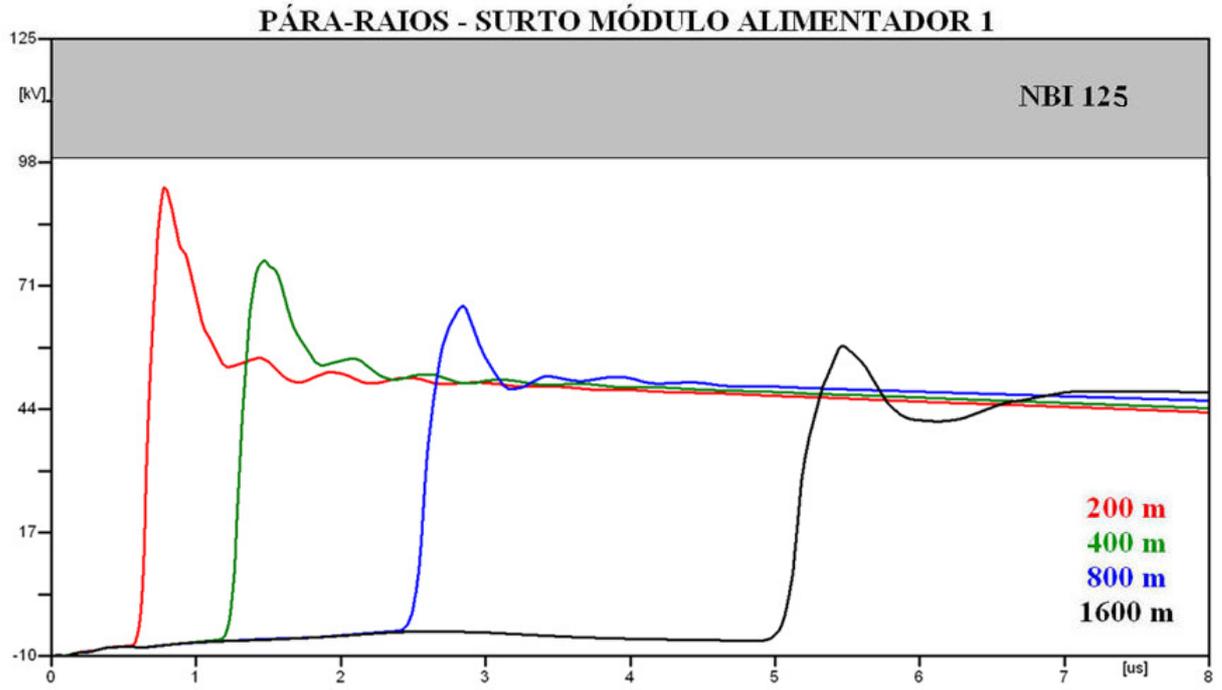


Figura 20: Sobretensões simuladas no primeiro pára-raios.

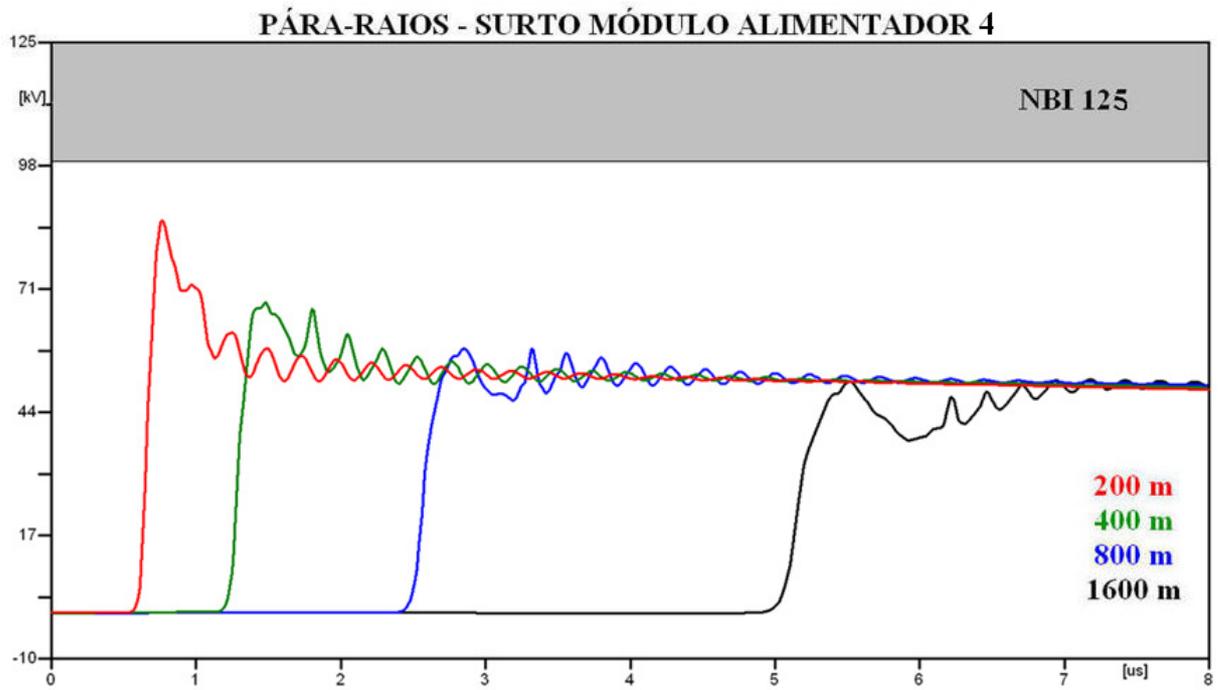


Figura 21: Sobretensões simuladas no quarto pára-raios.

Conforme pode ser constatado nas figuras 20 e 21, os pára-raios atendem aos requisitos de proteção e não serão afetados por descargas atmosféricas que incidam sobre a linha de distribuição.

#### 7.4 TRANSFORMADOR DE FORÇA

Tipicamente, o enrolamento de 15 kV de um transformador de força possui um NBI de 95 kV. Dessa forma, a suportabilidade máxima do transformador está limitada ao valor de 76 kV. As figuras 22 e 23 apresentam o perfil lateral das sobretensões simuladas sobre o transformador, quando o surto é aplicado na linha de distribuição conectada aos módulos alimentadores um e quatro, respectivamente.

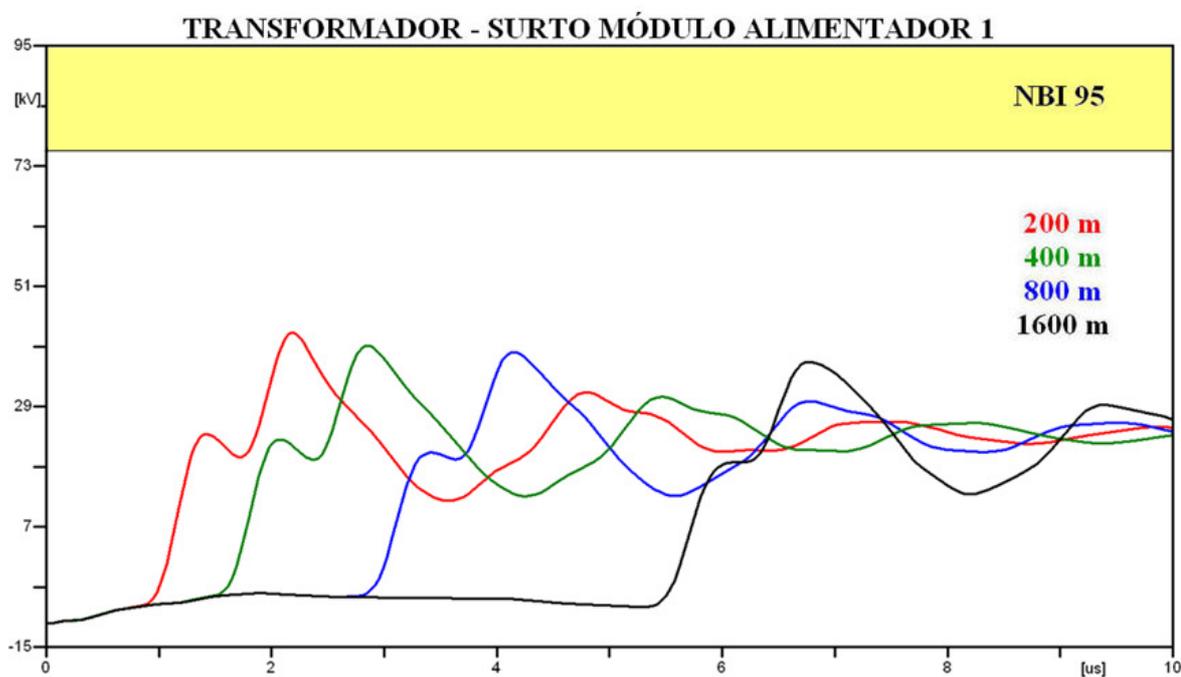


Figura 22: Sobretensões sobre o TF com surto aplicado na LD conectada ao AL 1.

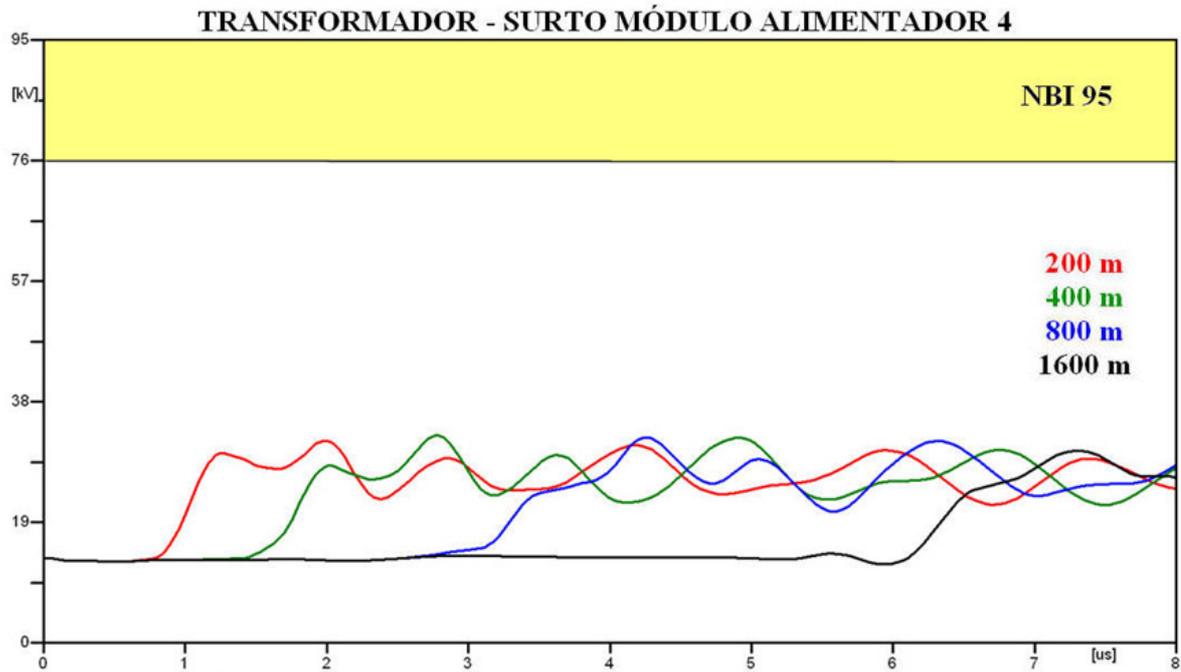


Figura 23: Sobretensões sobre o TF com surto aplicado na LD conectada ao AL 4.

Do mesmo modo que ocorre com os pára-raios, o transformador de força atende aos requisitos de proteção e não há possibilidade de ser avariado por surtos que incidam sobre a linha de distribuição, de acordo com as figuras de números 20 e 21.

## CONCLUSÃO

A coordenação de isolamento é um instrumento de avaliação da suportabilidade dos equipamentos de uma subestação frente aos distúrbios elétricos a que estão submetidos. Sua importância é indiscutível, promovendo a confiabilidade e a continuidade dos serviços de fornecimento de energia elétrica.

O correto dimensionamento da proteção possui impacto financeiro direto para os proprietários do investimento, além de maior confiabilidade para o sistema. Por meio da correta modelagem do sistema e auxílio computacional, é possível obter os requisitos necessários à elaboração de estudos de coordenação de isolamento.

O estudo apresentado no capítulo 6 visou quantificar os níveis de sobretensão a que podem estar sujeitos alguns dos equipamentos instalados em uma subestação isolada a ar. O estudo de sobretensão pode fornecer antecipadamente informações de possíveis falhas, além de suas respectivas causas e conseqüências.

Os resultados obtidos por meio da simulação computacional apontam que a falha de disjuntores de NBI de 95 *kV* pode ter sido ocasionada devido à falha de coordenação de isolamento. A hipótese é válida considerando-se surtos atmosféricos incidentes às linhas de distribuição às distâncias máximas de, aproximadamente, 1600 *m* e 800 *m* da subestação, para o primeiro e o quarto módulo alimentador.

Em relação ao disjuntor de NBI de 125 *kV*, a falha está limitada ao primeiro módulo alimentador e a queda de raios sobre a linha de distribuição ocorrendo a distâncias inferiores a 400 *m* da subestação.

Visto que os pára-raios e o transformador não apresentaram problema em nenhuma das situações simuladas, solução pode ser obtida através da:

- Especificação de disjuntores de NBI mais elevado, onde estudos adicionais devem ser realizados;

- Substituição dos pára-raios com a finalidade da redução da sobretensão constatada sobre os disjuntores. Também requer a realização de estudos complementares;
- Modificação do layout da subestação, pois os maiores níveis de tensão encontrados ocorreram no primeiro módulo alimentador. Esse módulo está localizado próximo ao banco de capacitores, provável causa da elevada tensão averiguada.

No entanto, outros estudos se fazem necessários, a fim de comprovar os resultados estabelecidos nesse trabalho. Deve-se considerar que:

- A representação dos equipamentos foi feita adotando-se critérios conservativos. Na ausência de dados, optou-se pela utilização de valores elevados, disponíveis na literatura, acarretando, certamente, em sobretensões mais elevadas;
- As simulações foram executadas tendo-se em vista o pior cenário, a fim da obtenção dos mais altos níveis de tensão no interior da subestação;
- O efeito corona, que reduz o valor de crista da tensão, não foi representado;
- Disjuntores foram avariados no quarto módulo alimentador, mesmo que – de acordo com as simulações – a possibilidade de falha do disjuntor de NBI de 125 kV seja inexistente;
- Disjuntores possuem características peculiares (descritas no capítulo 6). Desse modo, a explosão de disjuntores pode estar relacionada a outros tipos de sobretensões, como, por exemplo, sobretensão de manobra.

Como sugestão para futuros trabalhos, propõe-se a realização de estudos específicos sobre disjuntores, tais como o estudo de tensão de restabelecimento transitória (TRT), taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT) e o estudo de corrente de corte (*chopper*). Tais estudos envolvem transitórios de frentes lentas de onda e, por necessitarem de uma abordagem distinta da simulação realizada, acabaram não sendo incluídas nesse trabalho.

**REFERÊNCIAS**

- [1] HEDMAN, D. E. **Coordenação de Isolamento**. Santa Maria: UFSM, 1979.
- [2] ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [3] D'AJUS, A. et. al. **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão**. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985.
- [4] D'AJUS, A. et. al. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**. Niterói: Eduff, 1987.
- [5] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above**. 2. ed. Palo Alto, 1982.
- [6] ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [7] GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [8] HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. Boca Raton: Newness, 1999.
- [9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Insulation Coordination – Part 1: Definitions, Principles and Rules**. IEC International Standard 60071-1, 1993.
- [10] BAYLISS, C.; HARDY, B. **Transmission and Distribution Electrical Engineering**. 3. ed. Great Britain: CRC Press, 2007.
- [11] NUNES, R. R. **Coordenação de Isolamento para Transitórios de Manobra Considerando a Forma de Onda das Sobretensões**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6939/1999 – Coordenação de Isolamento – Procedimento 10 – Projeto de revisão da NBR 6939/1987**. 1999.
- [13] FULCHIRON, D. **Overvoltages and Insulation Coordination in MV and HV**. Lyon: Cahier Technique Merlin Gerin n° 151, 1995.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8186 – Guia de Aplicação de Coordenação de Isolamento - Procedimento**. 1983.
- [15] TELLÓ, M. **SE PAL 16 – Análise das Ocorrências (Explosão Disjuntores AL's 1 & 4, Setor 15 kV)**. Relatório Interno CEEE. Porto Alegre, 2009.
- [16] RULE BOOK. **Alternative Transient Program**. Comitê Argentino de Usuários de EMTP – ATP.
- [17] BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book**. Oregon, 1987.
- [18] PRINLER, L. HOIDALEN, H. K. **ATPDRAW User's Manual**. Version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP. Trondheim, August, 2002.
- [19] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Insulation Co-ordination – Part 4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Electrical Networks**. IEC Technical Report 60071-4. Geneve, 2004.
- [20] IMECE, A. F. et. al. **Modeling Guidelines for Fast Front Transients**. Report Prepared by the Fast Front Transient Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, December, 1997.
- [21] MARTINEZ, J. A.; GUSTAVSEN, B; DURBAK, D. **Parameter Determination for Modeling System Transients – Part I: Overhead Lines**. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, NO. 3, pp. 2038-2044, July, 2005.
- [22] MARTINEZ, J. A.; MAHSEREDJIAN, J.; KHODABAKHCHIAN, B. **Parameter Determination for Modeling System Transients – Part VI: Circuit Breakers**. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, NO. 3, pp. 2079-2085, July, 2005.

- [23] ZADEH, M. K.; ABNIKI, H.; AKMAL, A. A. S. **The Modeling of Metal-Oxide Surge Arrester Applied to Improve Surge Protection.** 2<sup>nd</sup> International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, 2009.
- [24] MARTINEZ, J. A.; DURBAK, D. W. **Parameter Determination for Modeling System Transients – Part V: Surge Arresters.** IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, NO. 3, pp. 2073-2078, July, 2005.
- [25] SIEMENS. **Pára-Raios em Porcelana 3EP.** Catálogo. Disponível em: [www.siemens.com/arrester-download](http://www.siemens.com/arrester-download)
- [26] GRCEV, L.; ARNAUTOVSKI-TOSEVA, V. **Grounding Systems Modeling for High Frequencies and Transients: Some Fundamental Considerations.** IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna , June, 2003.
- [27] NOBLAT, B. de M. **Lightning and HV Electrical Installationsde.** Cahier Technique Merlin Gerin n° 168, June 1994.
- [28] FONSECA, L. A. de C.; DA SILVA, P. T.; ALVES; F. R. **Verificação dos Pára-Raios dos Transformadores de Serviços Auxiliares 69-13,8 kV.** XIII Encuentro Regional Ibero Americano de CIGRÉ, Puerto Iguazú, 2009.
- [29] MARTÍNEZ, V. M.; UZCÁTEGUI, E. A.; JIMÉNEZ, P. R. **Study of Lightning Overvoltages in Valcor-Guanta II 230 kV Overhead Transmission Line.** IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America. Venezuela, 2006.
- [30] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Insulation Coordination – Part 2: Application Guide.** IEC International Standard 60071-2 – 3. ed. Geneve, 1996.
- [31] CARVALHO, F. M. S.; AZEVEDO, R. M.; VAISMAN, R. **Determinação de Sobretensões Transitórias de Alta Freqüência em Subestações E.A.T. Isoladas a Ar Visando a Análise de Falhas de Transformadores de Potência.** XIII Encuentro Regional Ibero Americano de CIGRÉ, Puerto Iguazú, 2009.
- [32] NOWAK, W.; TARKO, R. **Computer Modelling and Analysis of Lightning Surges in HV Substations due to Shielding Failure.** IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 25, NO. 2, pp. 1138-1145, April, 2010.

- [33] GUSTAVSEN, B; MARTINEZ, J. A.; DURBAK, D. **Parameter Determination for Modeling System Transients – Part II: Insulated Cables.** IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, NO. 3, pp. 2045-2050, July, 2005.
  
- [34] NAKADA, K. et. al. **Energy Absorption of Surge Arresters on Power Distribution Lines due to Direct Lightning Strokes – Effects of an Overhead Ground Wire and Installation Position of Surge Arresters.** IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 12, NO. 4, pp. 1779-1785, October, 1997.
  
- [35] SARAIVA, E. et. al. **Considerações Sobre Modelagens e Resultados de Estudos dos Impactos de Descargas Atmosféricas em ETD's.** IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna , June, 2003.
  
- [36] CHRISTODOULOU, C. A. et. al. **Parameters' optimisation for surge arrester circuit models.** IET Science, Measurement and Technology, September, 2009.