

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

**UM ESTUDO DE CASO SOBRE O IMPACTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
EM UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA DE 230kV**

Por

Leonardo Araújo de Medeiros

Prof. Ivan José da Silva Lopes

(Orientador)

Belo Horizonte, Março/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica

Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica

**UM ESTUDO DE CASO SOBRE O IMPACTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
EM UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA DE 230kV**

Leonardo Araújo de Medeiros

Orientador: Ivan José da Silva Lopes

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários a obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Belo Horizonte, Março/2012

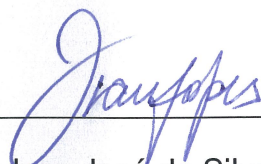
**UM ESTUDO DE CASO SOBRE O IMPACTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
EM UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA DE 230KV**

Leonardo Araújo de Medeiros

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários a obtenção do *Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica*.

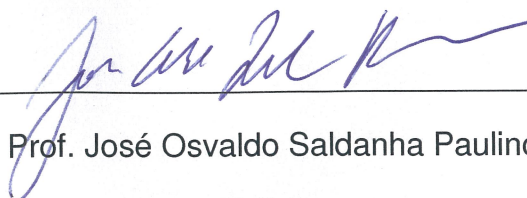
Aprovada em 22 de março de 2012.

Por:



Prof. Ivan José da Silva Lopes

(Orientador)



Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

(Relator)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida esposa Lélia Chaves, por me dar todo apoio necessário para o desenvolvimento deste trabalho, dando-me forças nos momentos em que estava desencorajado e me incentivando nos momentos em que estava motivado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ser a base de todas as minhas conquistas;

A minha esposa Lélia, por acreditar e confiar em minhas escolhas;

Aos meus pais Elionai e Goreth, por terem me dado todo apoio necessário para o desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus queridos irmãos, Rodrigo e Emanuelle, que apesar da distância sempre torceram por mim;

Ao professor Ivan, pela disposição e orientação no transcorrer do trabalho;

Aos colegas do curso e amigos;

Aos demais professores do curso de Qualidade de Energia Elétrica.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar os impactos de uma descarga atmosférica em uma subestação de 230kV, por meio de simulações realizadas no *software* ATP. Foi observada a atuação dos para-raios em diversos cenários, definindo-se a melhor solução para quantidade e localização desses equipamentos de proteção. Os resultados deste estudo indicam que o para-raios é um equipamento de proteção eficiente na redução dos impactos negativos ocasionados devido às descargas atmosféricas. Além disso, verificou-se que o aumento do número de para-raios em uma subestação diminui os níveis de sobretensão aplicada nos equipamentos instalados.

Palavras-Chave: Descargas atmosféricas; para-raios; sobretensões; ATP; Modelagem.

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate lightning performance of 230kV substation using ATP software simulations. It was observed the performance of surge arresters in different situations and the best solution of quantity and siting for those equipments. The results show that surge arresters are efficient protection equipments in reducing negative impacts on substations caused by lightning surges. Besides that, it was observed that a greater quantity of surge arresters decreases overvoltages in the substation's electrical equipments.

Key-words: lightning surges; surge arresters; overvoltage; ATP; modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Descargas Atmosféricas Típicas.....	4
Figura 2 - Descargas Atmosféricas Típicas.....	5
Figura 3 – Representação da amplitude da tensão e sobretensão em um sistema elétrico versus a duração desta sobretensão ($1p.u. = \sqrt{2} \cdot U_s / \sqrt{3}$) [07].....	8
Figura 4 – Curva característica tensão-corrente de um para-raios de óxido metálico típico, conectado entre fase e terra num sistema 420kV [07].....	10
Figura 5 – Seção transversal de uma unidade do para-raios óxido metálico com invólucro de porcelana [07].	12
Figura 6 – Resistores óxido metálicos [07].....	12
Figura 7 – Diferenças nas formas de tensão e amplitude em diferentes locais de uma subestação [08]	13
Figura 8 – Configuração simplificada da subestação.	17
Figura 9 – Curva não linear do para-raios.....	18
Figura 10 - Para-raios adquirido para o Projeto	18
Figura 11 – Disjuntor SF6 de Alta Tensão.	20
Figura 12 – Modelo do Sistema no ATP.....	23
Figura 13 – Sobretensões simuladas – Subestação sem proteção de para-raios	24
Figura 14 – Oscilação de Tensão no Transformador – Cenário 2.....	25
Figura 15 – Oscilação de Tensão no Barramento da Subestação – Cenário 3.....	26
Figura 16 – Sobretensões simuladas – Cenário 4.....	27
Figura 17 – Sobretensões simuladas – Cenário 5.....	27
Figura 18 – Sobretensões simuladas – Cenário 6.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apresentação dos resultados da simulação computacional.....	29
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

Pág.

Página

Cap.

Capítulo

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NOS	Operador Nacional do Sistema
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBI	Nível Básico de Isolamento
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
IEC	International Electrotechnical Commission
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	1
1.2	MOTIVAÇÃO DO ESTUDO.....	2
2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	4
2.1	RAIOS	5
2.2	OCORRÊNCIA DE DESCARGAS NA TERRA.....	6
2.3	INTERAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS COM OS SISTEMAS ELÉTRICOS.....	7
3	PARA-RAIOS	8
3.1	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PARA-RAIOS DE ÓXIDO METÁLICO.....	11
4	ESTUDO DE CASO	13
4.1	PREMISSAS	14
4.2	DADOS DO SISTEMA ESTUDADO E DOS EQUIPAMENTOS.....	16
4.2.1	PARA-RAIOS.....	17
4.2.2	DISJUNTORES, CHAVES SECCIONADORAS, TP's E TC's.....	19
4.2.3	BARRAMENTOS E LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	20
4.2.4	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	21
4.2.5	FONTE DE SURTO	22
4.2.6	CIRCUITO MODELADO NO ATP.....	22
4.3	IDENTIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS	23
4.4	RESULTADOS ENCONTRADOS	24
4.4.1	CENÁRIO 1	24
4.4.2	CENÁRIO 2	25
4.4.3	CENÁRIO 3	25
4.4.4	CENÁRIO 4	26
4.4.5	CENÁRIO 5	27
4.4.6	CENÁRIO 6	28
5	CONCLUSÃO.....	29
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 INTRODUÇÃO

1.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tem como principal objetivo definir as diversas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores [01].

A Qualidade de Energia Elétrica pode ser entendida como a forma que a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores [01]. Essa forma de recebimento da energia elétrica possui características de continuidade e conformidade com determinados parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor, como das cargas elétricas. Alguns destes parâmetros são descritos a seguir:

- Flutuações de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Desequilíbrio de sistemas trifásicos;
- Transitórios rápidos.

Devido ao crescimento acentuado da economia do país nos últimos anos e a decorrente reformulação do setor elétrico, tem-se aumentado a preocupação com os níveis de Qualidade de Energia Elétrica, item fundamental para suportar a produção do país. Dessa forma, os consumidores preferem adquirir a energia que apresenta os melhores parâmetros de qualidade ao custo mais baixo possível. Nesse cenário, as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas, tanto pelas agências reguladoras (ANEEL), como pelo próprio mercado, a apresentar detalhes sobre as condições de operação e eventos ocorridos que afetam os consumidores [01].

Alguns problemas que afetam os consumidores de energia elétrica auxiliam o entendimento da qualidade de energia elétrica. Esses problemas podem ser desde incômodos visuais até interferências em equipamentos eletrônicos mais sensíveis. Os incômodos visuais ocorrem devido à má regulação da tensão. Já interferências em equipamentos ocorrem ou devido a interrupções no fornecimento de energia, ou por fenômenos de alta frequência.

Atualmente, a dependência dos consumidores às condições de operação do sistema de energia elétrica atinge os níveis de carga domésticas, comerciais e

industriais. Podem-se listar algumas das dificuldades geradas aos consumidores nas interrupções de energia elétrica [01]:

- Perda de produtos perecíveis;
- Paralisação de serviços em escritórios;
- Problemas no trânsito devido à perda da sinalização;
- Desligamento de fornos de indústrias;
- Paralisação de atividades essenciais em hospitais.

Além dos problemas relacionados à interrupção do fornecimento, a não conformidade da energia fornecida aos requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica pode causar diversos efeitos, os quais podem ser citados [01]:

- Sobreaquecimento de máquinas elétricas devido a harmônicas;
- Vibrações de motores devido a desequilíbrios;
- Variações luminosas devido a flutuações de tensão;
- Perdas de equipamentos devido a sobretensões;
- Oscilações de potência sustentadas entre as cargas e a rede durante a operação de cargas não lineares e variáveis;
- Interrupções momentâneas de tensão.

Uma vez conhecida a definição da Qualidade de Energia Elétrica, bem como alguns dos problemas gerados pela falta desta, faz-se necessária uma análise aprofundada de uma das consequências relacionadas à falha no fornecimento da energia elétrica. Neste trabalho, serão abordadas as sobretensões geradas em uma subestação de 230kV devido a descargas atmosféricas, como descrito a seguir (item 1.2).

1.2 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

Em um sistema elétrico em operação, nos deparamos invariavelmente com a indesejável possibilidade de falhas. Algumas destas relacionadas com sobretensões devido a descargas atmosféricas e sobrecorrentes advindas de faltas e sobrecargas. Além disso, pode haver problemas de falhas de isolamento, atos de vandalismos, operação indevida e manutenção inadequada.

Como abordagem principal deste trabalho, observa-se que a descarga atmosférica é um fenômeno que produz um dos níveis mais elevados de sobretensão nas subestações [9]. Essas descargas podem atingir a linha de

transmissão, ocasionando efeitos nas subestações adjacentes. Por causa disso, o impacto de tais descargas representa um dos mais importantes esforços elétricos que os equipamentos presentes em uma subestação têm que suportar [06]. Apesar de o fenômeno da descarga durar um intervalo de tempo curto, da ordem de algumas centenas de microssegundos, suas consequências são os inconvenientes desligamentos traduzidos em:

- Prejuízos com a falta de energia para o consumidor;
- Prejuízos para a imagem e custos de reparos para a empresa durante o período de tempo utilizado para sanar a irregularidade, retomada de produção e danos em equipamentos associados;
- Eventuais penalizações por transgressão a indicadores de qualidade;
- Dentre outros.

Para entendimento dos problemas e suas possíveis soluções, são realizados diversos estudos de engenharia, envolvendo a coordenação de isolamento, sobretensões, sensibilidade da proteção e confiabilidade, além de ações concretas, como aquisição de equipamentos com características adequadas, coordenação de ajustes e proteção.

Com o objetivo de minimizar o número de falhas no sistema elétrico e os possíveis danos nos equipamentos, são utilizados alguns métodos, tais como blindagem das linhas de transmissão através de cabos guarda para as descargas atmosféricas ou resistores de pré-inserção em disjuntores de alta tensão contra sobretensões advindas de manobras. Entretanto, para a finalidade de proteção contra sobretensões, o para-raios mostra-se o mais adequado e confiável. Os surtos atmosféricos, mesmo limitados pelos para-raios, propagam-se pelo interior da subestação e são refletidos, devido as diferentes impedâncias presentes em uma subestação. Dessa forma, conforme as características dos cabos e dos barramentos que conectam o transformador à rede aérea, os efeitos da descarga podem ter sua intensidade aumentada por reflexões internas e superar o limite do Nível Básico de Isolamento (NBI) do equipamento.

Diante do exposto acima, faz-se necessária uma análise sobre os impactos de descargas atmosféricas em uma subestação para a correta adequação dos níveis básicos de isolamento dos equipamentos e dos para-raios encarregados de protegê-los. Este trabalho tem como objetivo avaliar uma subestação de 230kV real, que

está sendo ampliada. O estudo avaliará se os níveis básicos de isolamentos dos equipamentos adquiridos para a ampliação da subestação em estudo são aceitáveis, e como deve ser feita a instalação dos para-raios encarregados de protegê-los (quantidade e melhor localização).

Neste capítulo inicial foi definido o conceito de Qualidade de Energia Elétrica, as consequências de sua falta para os consumidores, além da motivação e objetivos deste trabalho. No capítulo seguinte, será abordado o tema de descargas atmosféricas: suas causas, ocorrência na Terra e interação com os sistemas elétricos.

2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Descargas atmosféricas são descargas elétricas de grande extensão e de grande intensidade, que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de nuvens. A descarga inicia quando o campo elétrico produzido por essas cargas excede a capacidade isolante, também conhecida como rigidez dielétrica do ar, em um dado local na atmosfera, que pode ser dentro da nuvem ou próximo ao solo. Quebrada a rigidez, tem início um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas. Existem diversos tipos de descargas, classificadas em função do local onde se originam e do local onde terminam [15].

As descargas atmosféricas podem ocorrer da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, dentro da nuvem, da nuvem para um ponto qualquer na atmosfera (denominados descargas no ar) ou entre nuvens.



Figura 1 - Descargas Atmosféricas Típicas

De todos os tipos de descargas, as que ocorrem entre as nuvens são as mais frequentes, em parte devido ao fato de a capacidade isolante do ar diminuir com a altura, em função da diminuição da densidade do ar, em parte devido às regiões de cargas opostas dentro da nuvem estarem mais próximas que no caso dos outros relâmpagos.

2.1 RAIOS

As descargas nuvem-solo, também denominadas raios, são as mais estudadas devido ao seu caráter destrutivo [15]. Esse tipo de descarga pode ser dividido em dois tipos ou polaridades, definidas em função do sinal da carga efetiva transferida da nuvem ao solo: negativas e positivas.

Os raios negativos, globalmente cerca de 90% dos raios, transferem cargas negativas (elétrons) de uma região carregada negativamente dentro da nuvem para o solo. Os raios positivos, cerca de 10%, transferem cargas positivas de uma região carregada positivamente dentro da nuvem para o solo (na realidade, elétrons são transportados do solo para a nuvem).



Figura 2 - Descargas Atmosféricas Típicas

Os raios duram, em média, em torno de um quarto de segundo, embora valores que variam de um décimo de segundo a dois segundos tenham sido registrados [15]. Durante esse período, os raios percorrem na atmosfera trajetórias

com comprimentos que variam desde alguns quilômetros até algumas dezenas de quilômetros.

Por sua vez, a corrente elétrica sofre grandes variações desde algumas centenas de ampères até centenas de quiloampères. A corrente flui em um canal com um diâmetro de poucos centímetros, denominado canal do relâmpago, onde a temperatura atinge valores máximos tão elevados quanto algumas dezenas de milhares de graus e a pressão, valores de dezenas de atmosferas.

Embora o raio pareça uma descarga contínua para o olho humano, na verdade, em geral, ele é formado de múltiplas descargas, denominadas descargas de retorno [15], que se sucedem em intervalos de tempo muito curtos.

2.2 OCORRÊNCIA DE DESCARGAS NA TERRA

Cerca de 50 a 100 descargas ocorrem no mundo a cada segundo, o que equivale a cerca de 5 a 10 milhões por dia, ou cerca de 1 a 3 bilhões por ano [11]. Apesar do fato de que a maior parte da superfície de nosso planeta está coberta por água, menos de 10% do total de descargas ocorrem nos oceanos. Isso acontece devido à dificuldade destes responderem às variações de temperatura ao longo do dia, ao relevo menos acidentado e à menor concentração de aerossóis comparada à superfície dos continentes. As descargas ocorrem predominantemente no verão, por causa do maior aquecimento solar, embora possam ocorrer em qualquer período do ano.

As observações de satélite confirmam que a maioria das descargas ocorre sobre os continentes e em regiões tropicais. De um modo geral, sabe-se que as principais regiões de ocorrência de descargas são:

- Hemisfério Norte: região central da África, sul da Ásia e região sul dos Estados Unidos;
- Hemisfério Sul: Brasil (exceto região nordeste), região norte da Argentina, sul da África, ilha de Madagascar, Indonésia e região norte da Austrália.

O Brasil, devido a sua grande extensão territorial e ao fato de estar próximo do equador geográfico, é um dos países de maior ocorrência de descargas no mundo. Estima-se, com base em dados de satélite, que cerca de 60 milhões de descargas nuvem-solo atinjam o solo brasileiro por ano, ou seja, cerca de duas

descargas por segundo. Isso equivale a uma média de aproximadamente sete descargas por quilômetro quadrado por ano [11].

Estudos recentes têm mostrado que a ocorrência de descargas tem aumentado significativamente sobre grandes áreas urbanas em relação às áreas vizinhas. Acredita-se que esse efeito esteja relacionado ao maior grau de poluição sobre essas regiões e ao fenômeno conhecido como "ilha de calor", aquecimento provocado pela alteração do tipo de solo, presença de prédios e elementos que alteram a temperatura local.

2.3 INTERAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS COM OS SISTEMAS ELÉTRICOS

As descargas atmosféricas são responsáveis por um grande número de desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além da queima de um número considerável de transformadores de distribuição. No Brasil, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição são provocados por raios, sendo o número de transformadores queimados por raios em torno de 40% [11].

Há três possibilidades de interação de descargas atmosféricas com linhas de transmissão e subestações elétricas, ocasionando interrupções no fornecimento de eletricidade. São elas:

- Descarga atingindo alguma estrutura da vizinhança: esse tipo de interação é importante apenas para redes de distribuição de energia;
- Descarga atinge diretamente uma das fases (Falha de Blindagem): O desligamento da linha pode ocorrer em caso de ruptura do isolamento pelo mecanismo de "flashover" e a sustentação do arco elétrico estabelecido entre o condutor e a parte aterrada. Trata-se da principal causa de interrupção para linhas com tensão de operação acima de 230kV. O aumento da altura dos condutores, o maior espaçamento entre fases e os vãos mais longos, típicos nestas linhas, são fatores que ajudam a aumentar a probabilidade de falha por tais mecanismos.
- Descarga atinge alguma parte aterrada do sistema (*Back-flashover*): principal mecanismo de desligamento de linhas de tensão nominal até 230kV está relacionado à incidência de descargas nos cabos para-raios. Ao incidir sobre

o cabo, a onda de corrente promove um surto de sobretensão que se propaga na linha. Quando tal surto chega à torre, este pode ser capaz de romper o isolamento da linha, através do estabelecimento de um arco elétrico de contornamento do isolador que separa a fase da parte metálica da torre.

Neste capítulo foi abordada a formação das descargas atmosféricas e alguns dados sobre a ocorrência destas descargas na Terra. Além disso, foram identificadas as principais formas de interação das descargas com os sistemas elétricos. O próximo capítulo irá apresentar as características de um dos equipamentos mais eficientes na proteção do sistema elétrico contra as sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas: o para-raios.

3 PARA-RAIOS

O para-raios é um equipamento fundamental para a coordenação de isolamento em um sistema de fornecimento de energia elétrica. Essa definição é apresentada claramente na Figura 3 [07].

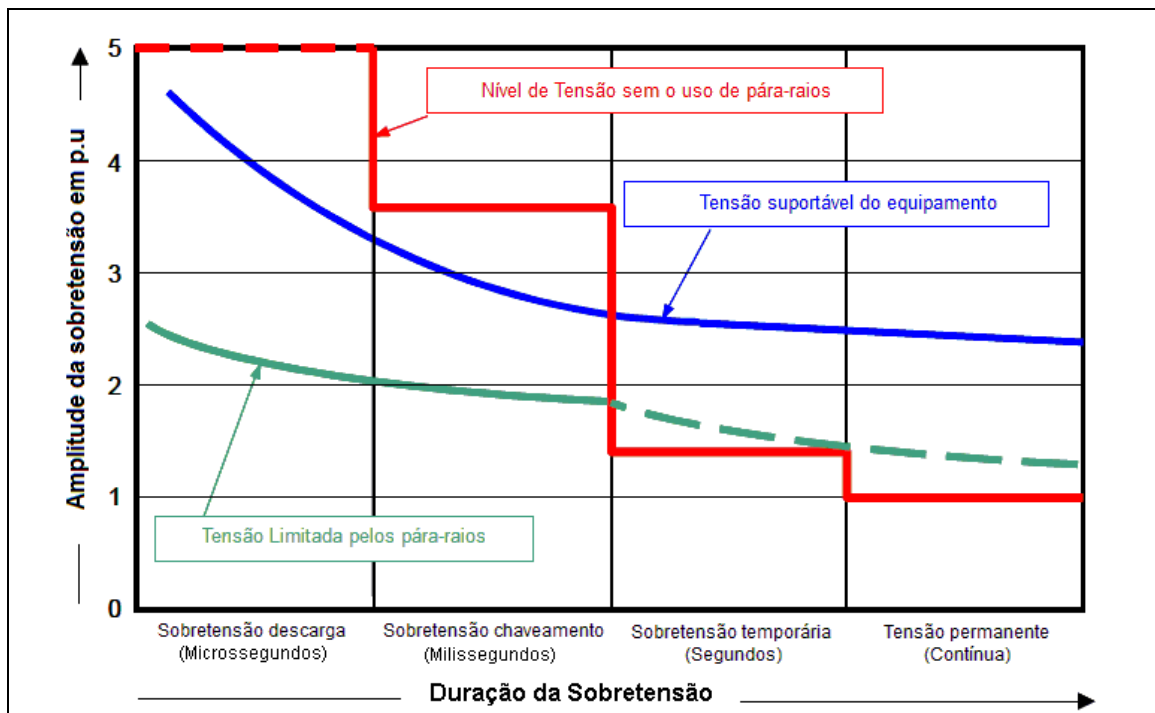


Figura 3 – Representação da amplitude da tensão e sobretensão em um sistema elétrico versus a duração desta sobretensão ($1 p.u. = \sqrt{2} \cdot U_s / \sqrt{3}$) [07].

No eixo do tempo do gráfico apresentado na Figura 3 há uma divisão geral nas seguintes faixas:

- Sobretensão de descarga (Microssegundos): Sobretensão transitória causada quando uma descarga atinge diretamente um condutor de linha aérea, o cabo de proteção ou uma torre. Ainda pode ser originado pela indução causada pelas altas correntes de descarga quando estas atingem linhas vizinhas ou torres de metais próximos ao sistema analisado. O tempo considerado é de apenas alguns microssegundos, com duração total entre $10\mu\text{s}$ e $100\mu\text{s}$.
- Sobretensão de chaveamento (Milissegundos): Sobretensão transitória causado pelo fenômeno resultante de uma operação de chaveamento ou de faltas no sistema (falta a terra, chaveamento indutivo ou capacitivo, rejeição de carga, etc.).
- Sobretensão temporária (Segundos): Sobretensão que pode ocorrer por uma duração de décimos de segundo até poucos segundos, como resultado de operações de chaveamento ou falhas no sistema.
- Tensão permanente (contínua): tensão de operação contínua do sistema.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 3, observa-se que os níveis de sobretensão causados pelas descargas ou por chaveamento no sistema são mais elevados que os níveis básicos de isolamento dos equipamentos elétricos. Neste ponto, os para-raios intervêm. Durante a operação, o para-raios garante que a tensão dos terminais dos equipamentos elétricos protegidos irá ficar abaixo da tensão suportável deste equipamento. É importante destacar que o para-raios tem como função proteger os equipamentos tanto em caso de uma descarga atmosférica como em caso de sobretensões geradas devido a chaveamentos no sistema elétrico.

Nas instalações elétricas atuais ainda é possível encontrar um grande número de para-raios de carboneto de silício. Entretanto, a grande parte dos para-raios instalados atualmente é fabricada com um óxido metálico, sem *gaps*, contendo resistores de óxido metálico. A característica distintiva de um resistor de óxido-metálico é sua curva tensão-corrente não linear. Quando as tensões aplicadas no para-raios estão dentro da faixa do equipamento, ele pode ser considerado um isolador. Entretanto, se é aplicada uma sobretensão elevada no equipamento protegido pelo para-raios (caso de uma descarga ou chaveamento da rede), a

tensão resultante nos terminais do para-raios permanecerá baixa o suficiente para proteger o isolamento do dispositivo associado dos efeitos das sobretensões.

Na Figura 4, é ilustrado um exemplo da curva característica tensão-corrente de um para-raios de óxido metálico típico, conectado entre fase e terra num sistema 420kV, com neutro solidamente aterrado. No eixo das ordenadas, a tensão é representada linearmente. Entretanto, no eixo da corrente é adotada uma escala logarítmica [07].

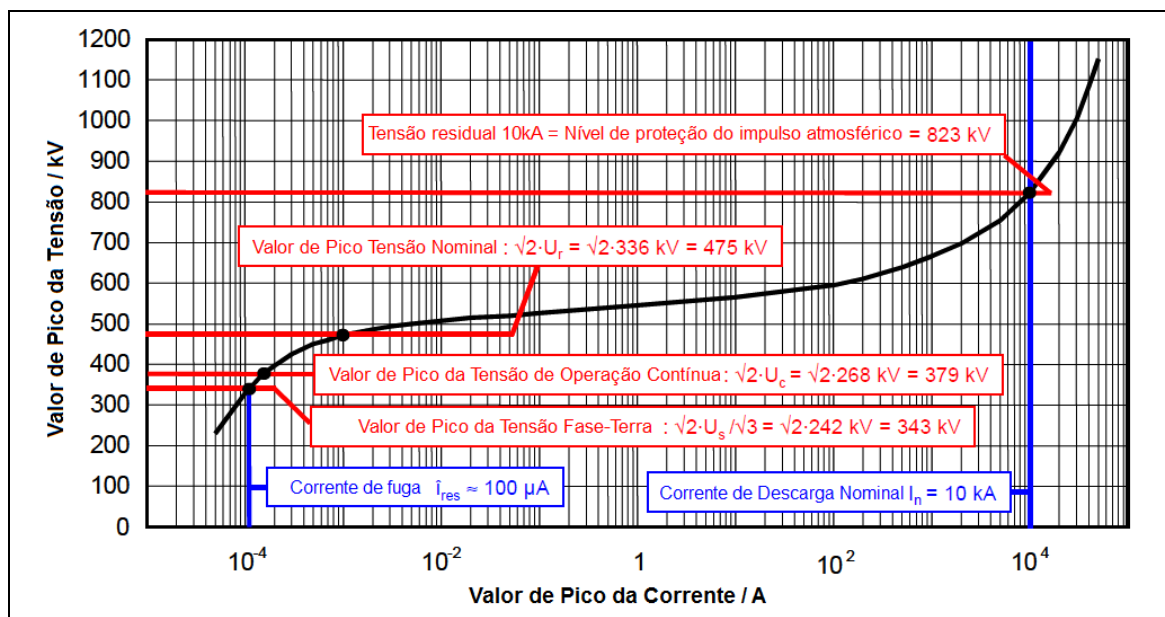


Figura 4 – Curva característica tensão-corrente de um para-raios de óxido metálico típico, conectado entre fase e terra num sistema 420kV [07].

Para o exemplo da Figura 4, foi escolhido um para-raios de 10kA. O Nível de proteção do impulso atmosférico de 823 kV significa que o valor de pico da tensão nominal entre os terminais, durante a descarga, iniciando da operação normal entre fase-terra, aumenta de um fator 2,4 (823kV dividido por 343kV), enquanto no mesmo tempo a amplitude da corrente aumenta em oito décadas de magnitude (desde 100μA até 10kA). Este exemplo evidencia o comportamento não linear dos para-raios.

O aterramento correto é de fundamental importância para o bom funcionamento do para-raios. O efeito de proteção do para-raios será afetado negativamente com o aumento do comprimento do cabo de aterramento, desde que uma queda de tensão ocorra neste cabo durante uma descarga. Portanto, o cabo de aterramento deve conectar o terminal de aterramento do para-raios ao sistema de aterramento da subestação utilizando o caminho/percurso mais reto e curto. O

comprimento do cabo de aterramento, se possível, não deve exceder 1 m para para-raios de média tensão e 3 m para para-raios de alta tensão. Mesmo se o para-raios for monitorado através de dispositivos conectados em série com o cabo de aterramento, este cabo deve ser o mais curto possível e curvas/*loops* devem ser evitados. Caso existam, dispositivos de monitoramento devem ser instalados a uma distância maior do para-raios. É recomendado usar dispositivos que possuem unidades de medição (*sensor*) e indicação (*display*) separadas.

3.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PARA-RAIOS DE ÓXIDO METÁLICO

O fato de não haver mais necessidade do uso de *gaps* em série, o que é obrigatório para os para-raios de carboneto de silício (SiC), simplificou consideravelmente o projeto dos para-raios. Como principal progresso, os para-raios de óxido metálico podem ser construídos com apenas um único elemento ativo, chamado de coluna do resistor de óxido metálico. Estes resistores combinam as principais funções e características necessárias, sendo elas:

- Ser capaz de absorver a energia injetada durante a descarga;
- Limitar a corrente a valores térmicos aceitáveis.

As resistências de óxido metálico são extremamente não lineares, ou seja, tem características de corrente-tensão que está muito curvada de forma a que, abaixo de uma determinada tensão, passa apenas uma corrente fraca pela resistência. Os protetores de sobretensão devem ser dimensionados de tal forma que, com a tensão permanente, que normalmente existe, seja conduzida apenas uma pequena corrente de fuga ($< 0,1$ mA). Em caso de surtos de raio ou de manobra, as resistências tornam-se altamente condutivas (condutância ôhmica). Desta forma, uma corrente originada devido a uma sobretensão pode ser conduzida a terra e a sobretensão pode ser reduzida ao valor da queda de tensão no protetor de sobretensão (“tensão residual”). Estas correntes podem ter um valor de até 1 kA em caso de surtos de manobra, e de 1 ... 10...20 kA em caso de surtos de raio.

A Figura 5 apresenta a seção transversal de uma unidade do para-raios óxido metálico com invólucro de porcelana a ser aplicada em um sistema de alta tensão. A coluna do resistor óxido metálico, em conjunto com todos os componentes auxiliares que fazem parte da construção, compreende a parte ativa do para-raios. A coluna

consiste de resistores de óxido metálico individualmente colocados um em cima do outro. Estes resistores são quase sempre produzidos em forma cilíndrica (Figura 6). Seu diâmetro determina qual será a quantidade de energia absorvida e a capacidade de condução de corrente.

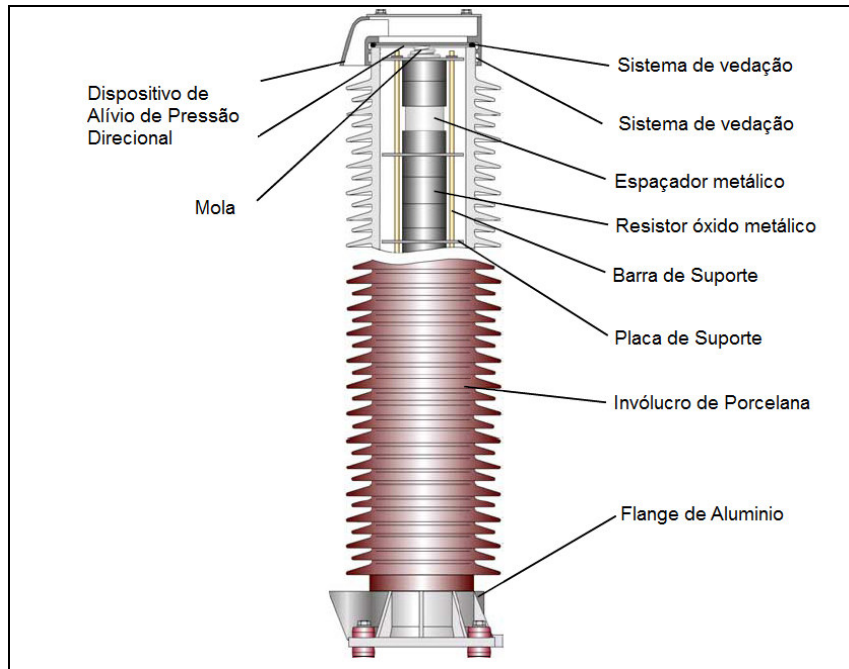


Figura 5 – Seção transversal de uma unidade do para-raios óxido metálico com invólucro de porcelana [07].



Figura 6 – Resistores óxido metálicos [07].

Até o momento, este trabalho identificou os conceitos fundamentais para entendimento do problema das sobretensões geradas em uma subestação elétrica devido a uma descarga atmosférica e mostrou um dos equipamentos mais eficientes para proteção do sistema elétrico: o para-raios. No próximo capítulo, será iniciado o estudo de caso ao qual este trabalho se propõe a fazer: simulações de descargas

atmosféricas, seus efeitos em uma subestação de 230kV e a ação do para-raios na proteção desta subestação.

4 ESTUDO DE CASO

No momento em que uma descarga atmosférica atinge uma subestação, várias reflexões e oscilações surgem devido às diferentes impedâncias dos equipamentos instalados na subestação. Essas reflexões e oscilações fazem com que existam diferenças nas formas de tensão em diferentes locais de uma subestação, como ilustrado na Figura 7.

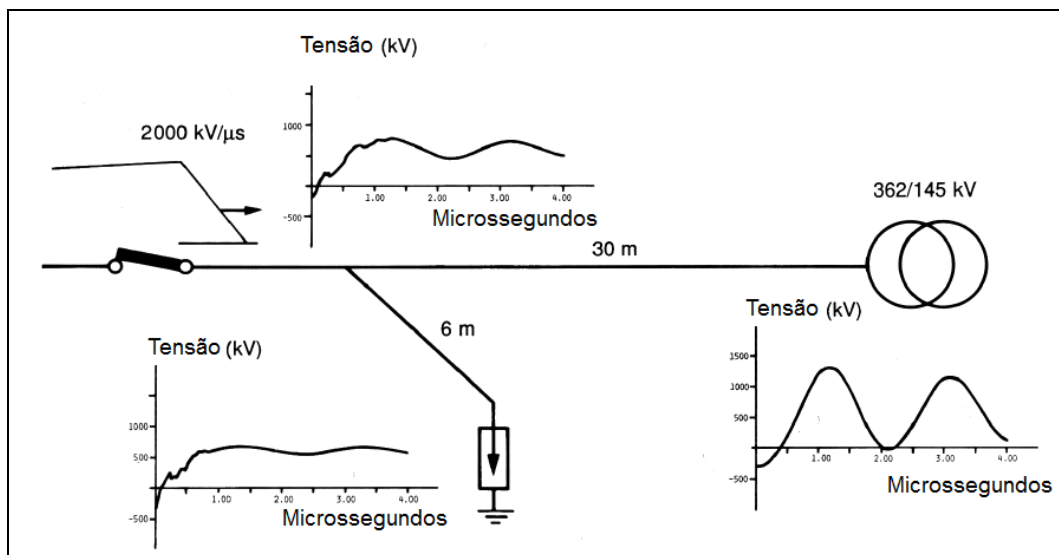


Figura 7 – Diferenças nas formas de tensão e amplitude em diferentes locais de uma subestação [08]

As subestações devem ser projetadas de forma a existir uma baixa probabilidade de falhas. Para definições de proteção de descargas atmosféricas, a simples escolha do melhor para-raios do mercado não é suficiente. A determinação da quantidade correta de para-raios e seus locais de instalação para atingir a proteção adequada tornam-se as decisões mais importantes.

Além disso, os surtos atmosféricos mesmo limitados pelos para-raios, se propagam pelo interior da subestação e são refletidos, principalmente nos locais onde estão instalados os transformadores. Diante disso, dependendo da configuração dos barramentos aéreos ou cabos que fazem a conexão do transformador com a rede aérea, os surtos podem ter sua intensidade aumentada

por reflexões e superar o limite de suportabilidade dielétrica do equipamento, ou seja, o Nível Básico de Isolamento (NBI).

Devido ao exposto anteriormente, faz-se necessário um estudo de análise dos impactos dos surtos atmosféricos em uma subestação, para perfeita adequação dos níveis básicos de isolamento dos equipamentos e dos para-raios encarregados de protegê-los. Para estes estudos, serão realizadas simulações com o auxílio de um programa computacional que trabalha no domínio do tempo (EMTP/ATP) [09].

As análises das simulações indicarão as alternativas de solução. Na etapa final do projeto, a escolha independe dos programas de simulação e torna-se responsabilidade do engenheiro de sistemas elétricos definir a melhor alternativa, levando em conta parâmetros adicionais, tais como a importância da subestação e o custo de uma falha comparado ao custo da implantação da proteção mais segura, definindo um nível aceitável de risco.

4.1 PREMISSAS

Para um tratamento completo do problema apresentado, muitos parâmetros devem ser considerados para simulação das descargas – distribuição das correntes de descarga, arranjo da subestação, tensão e frequência, aterramento, cabos de blindagem, níveis de proteção e cabos de conexão dos para-raios, níveis de isolamento, dentre outros.

Tendo em vista a complexidade do problema, as boas práticas da engenharia têm sido baseadas principalmente em fórmulas simplificadas, que muitas vezes ignoram muitos dos parâmetros importantes [08].

Atualmente, devido ao conhecimento atual do comportamento das descargas atmosféricas, bem como a existência de programas computacionais eficientes, é possível dar orientações muito mais precisas para proteção contra descargas atmosféricas.

Para um melhor resultado dos estudos, as análises devem se iniciar pela modelagem adequada de cada equipamento, considerando os aspectos transitórios inerentes ao fenômeno.

Todos os resultados apresentados nesse trabalho serão baseados nos dados especificados nas folhas de dados dos equipamentos, bem como nas simulações realizadas no software ATP, incluindo eventuais limitações decorrentes do uso deste software.

O ATP (*Alternative Transients Program*) é um programa utilizado para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos, bem como para fenômenos de natureza eletromecânica. Com este programa, redes complexas e sistemas de controle podem ser simulados. O programa ATP tem capacidade ampla de modelagem e recursos adicionais importantes, além dos cálculos transitórios. [13]

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 [14].

Através do programa ATP, é possível a representação de não linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, dentre 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 [14].

O ATP também possui um módulo gráfico (denominado ATPDraw) que permite a montagem gráfica de circuitos elétricos, reduzindo os esforços e o tempo despendido com programação. A representação e modelagem dos componentes foram realizadas com o auxílio do ATPDraw.

O ATP é usado em diversos países para análise de descargas atmosféricas. Os estudos realizados neste trabalho terão como premissa fundamental a análise dos resultados obtidos através deste programa e a conclusão de qual a melhor solução para a subestação estudada.

Este trabalho analisará as sobretensões geradas por uma descarga atmosférica apenas para o caso em que uma descarga atinge diretamente uma das fases (Falha de Blindagem). Basicamente, foram simuladas descargas atmosféricas incidentes sobre a linha de transmissão a certa distância da subestação. Os valores de sobretensão obtidos por meio da simulação foram comparados com o nível básico de isolamento do principal equipamento da subestação, o transformador de potência.

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 devido ao elevado número de componentes encontrados no interior da mesma. Desse modo, visando o preenchimento dos requisitos necessários para a realização das simulações, algumas simplificações passam a ser admitidas [04][05]. Estas simplificações são detalhadas na seção 4.2 (seção 4.2.1 a seção 4.2.5), que trata da modelagem dos equipamentos no software de simulação, bem como todas as considerações adotadas.

Para simulação da subestação e dos equipamentos citados será usado um modelo de subestação utilizado na disciplina de Transitórios Eletromagnéticos deste curso de especialização em Qualidade de Energia Elétrica. Trata-se de um modelo simplificado para uma subestação de 230kV, e tem como objetivo simular o circuito equivalente do sistema para apenas uma das fases e avaliar o impacto de uma descarga atmosférica nessa fase.

Para os estudos realizados, não foi considerada a ruptura na cadeia de isoladores das linhas de transmissão. Além disso, a malha de aterramento foi considerada ideal.

4.2 DADOS DO SISTEMA ESTUDADO E DOS EQUIPAMENTOS

A subestação a ser estudada está localizada dentro de uma usina termelétrica que está passando por um processo de ampliação de forma a atender os requisitos de fechamento do ciclo, onde o calor dos gases de exaustão é aproveitado para gerar vapor em uma caldeira, chamada de recuperadora, completando o ciclo utilizando uma turbina a vapor que irá gerar mais uma quantidade de energia elétrica.

A nova configuração desta usina será composta por um turbogerador a vapor de 88 MW, integrado em ciclo combinado com o turbogerador a gás já instalado, e sua respectiva torre de recuperação de calor, totalizando a capacidade instalada total de 248,573 MW. As instalações de interesse restrito desta unidade Termelétrica serão compostas de uma subestação elevadora de 13,8/230 kV com um transformador de 235 MVA.

A Figura 8 apresenta uma configuração simplificada da subestação em estudo.

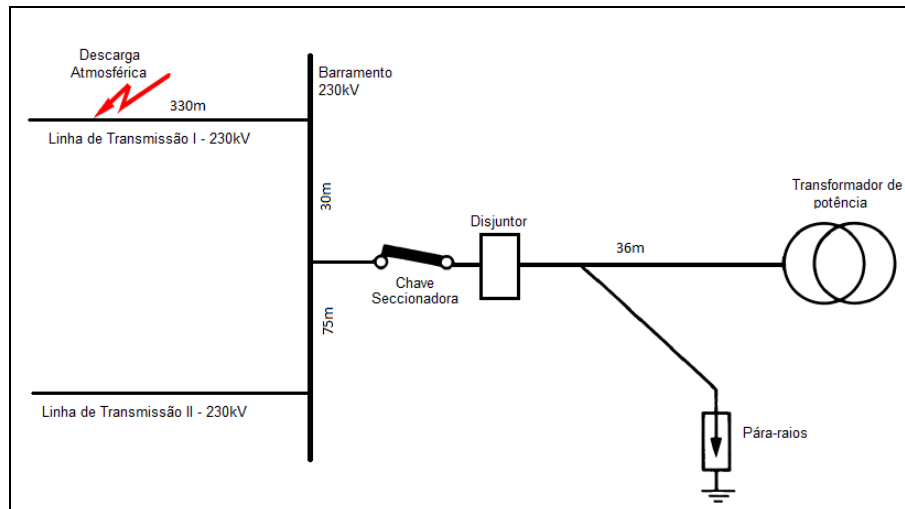


Figura 8 – Configuração simplificada da subestação.

Nos itens seguintes, serão apresentados os procedimentos utilizados para modelagem dos equipamentos e quais os parâmetros utilizados para cada um dos equipamentos modelados. Na ausência de informação, foram utilizados valores de mercado, encontrados em equipamentos similares aos especificados para a subestação em estudo.

4.2.1 PARA-RAIOS

Com relação aos para-raios, conforme os dados do fabricante, tais como tensão nominal, máxima tensão residual para um dado valor de impulso de corrente, é possível obter a característica de operação do para-raios ZnO no ATP, a qual é representada pela equação seguinte [09].

$$I = p \times \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^q \quad (1)$$

Onde:

V = Tensão de crista;

I = Corrente para o respectivo valor de Tensão de Crista;

V_{ref} = Tensão de referência, adotada como sendo duas vezes o valor da tensão nominal;

p e q = parâmetros para a determinação da curva de operação do para-raios ZnO.

Para este estudo, para representação do para-raios foi escolhido o modelo do programa ATP para resistor não linear, onde foi inserida a curva não linear de

corrente x tensão (Figura 9 – Curva não linear do para-raios.). O valor da tensão de disparo para este para-raios é de 410kV.

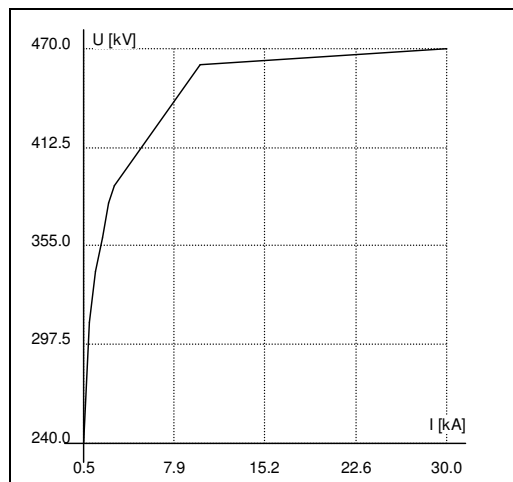


Figura 9 – Curva não linear do para-raios.

A Figura 10 ilustra o para-raios instalado na subestação em estudo. Os dados do para-raios instalado são:

- Tensão Nominal: 192 kV
- Nível Básico de Impulso: 1444 kV (pico)
- Tensão Residual Máxima sob Corrente de Descarga Nominal: 461 kV (pico)
- Corrente Nominal de Descarga: 10 kA
- Tensão Residual com 10 kA: 461 kV

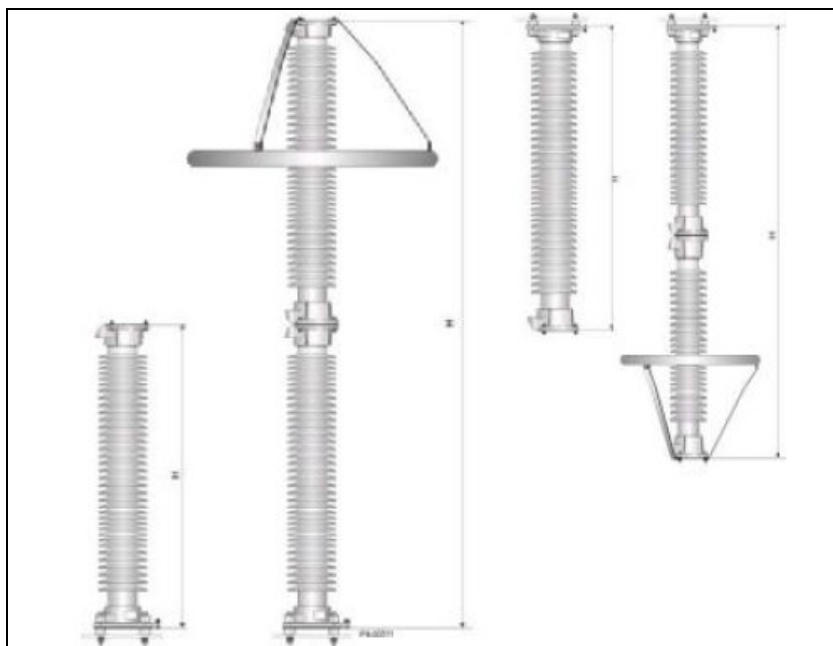


Figura 10 - Para-raios adquirido para o Projeto

4.2.2 DISJUNTORES, CHAVES SECCIONADORAS, TP's E TC's

Para modelagem destes equipamentos, eles são considerados como uma capacitância de fuga de 300 pF [09]. Este valor foi considerado como parâmetro de entrada no ATP.

A seguir são apresentados os dados do disjuntor instalado na subestação:

- Tensão Máxima Nominal: 245 kV
- Corrente Nominal: 3150 A
- Nível Básico de Isolamento: 1050 kV
- Tensão suportável nominal ao Impulso atmosférico: 1050 kV

A chave seccionadora vertical reversa instalada na subestação apresenta as seguintes características elétricas:

- Tipo de Acionamento: Motorizado e Manual
- Tensão máxima nominal: 242 kV
- Corrente Nominal: 1600 A
- Nível Básico de Isolamento: 1050 kV
- Tensão Suportável a Impulso Atmosférico: 1050 kV

A chave seccionadora vertical trifásica motorizada instalada na subestação apresenta as seguintes características elétricas:

- Tipo de Acionamento: Motorizado e Manual
- Tensão máxima nominal: 242 kV
- Corrente Nominal: 1600 A
- Nível Básico de Isolamento: 1050 kV
- Tensão Suportável a Impulso Atmosférico: 1050 kV

Os Transformadores de Corrente instalados na subestação apresentam as seguintes características elétricas:

- Tensão máxima nominal: 245 kV
- Número de enrolamentos primários: 1
- Número de enrolamentos secundários: 4
- Relação de Transformação Nominal: 1200/800/300/200-5-5-5-5 A
- Nível Básico de Isolamento: 950 kV

Tensão Suportável a Impulso Atmosférico: 950 kV

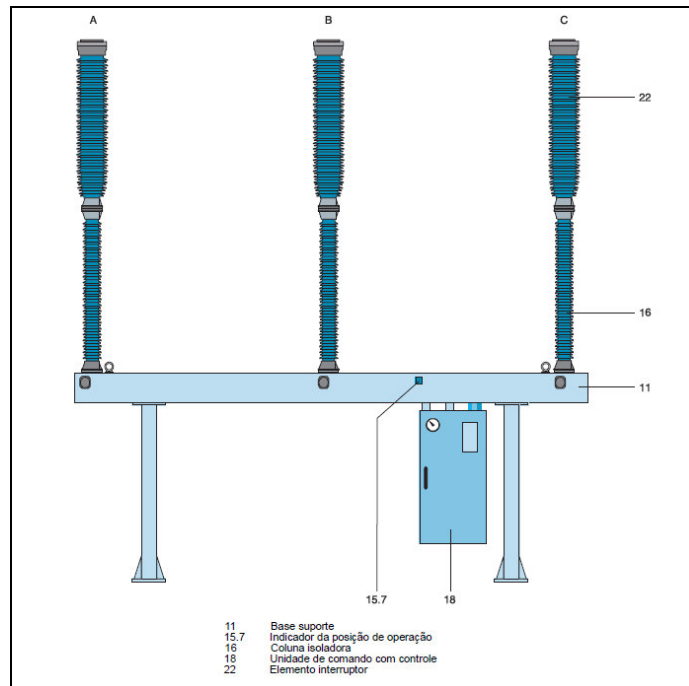


Figura 11 – Disjuntor SF6 de Alta Tensão.

Os Transformadores de Potencial instalados na subestação apresentam as seguintes características elétricas:

- Tipo Indutivo
- Tensão máxima nominal: 245 kV
- Número de enrolamentos primários: 1
- Número de enrolamentos secundários: 4
- Tensão Primária Nominal: $230/\sqrt{3}$
- Tensão Secundária Nominal: $115-115-115/\sqrt{3}-115/\sqrt{3}$
- Nível Básico de Isolamento: 950 kV
- Tensão Suportável a Impulso Atmosférico: 950 kV

4.2.3 BARRAMENTOS E LINHAS DE TRANSMISSÃO

A representação adequada dos barramentos e linhas de transmissão é fundamental para o estudo de descargas atmosféricas. É através dos barramentos que os para-raios que irão proteger os transformadores de potência são conectados. Assim, deve-se ter bastante atenção com as distâncias entre o transformador e os para-raios. Sobre este aspecto, todos os pequenos trechos de conexões aéreas entre o transformador e o para-raios foram incorporados nos barramentos.

Nesta modelagem foi usado o modelo de Clarke disponível no ATP, para representação de linha com parâmetros distribuídos constantes. Para as linhas de transmissão e barramento, foi considerado uma impedância de 370Ω . Para o cabo de conexão entre o barramento e o transformador, foi considerada uma impedância de 30Ω .

4.2.4 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Os principais dados do transformador de potência instalado na subestação da usina termelétrica escopo deste trabalho são:

- Tipo: Transformador a Óleo
- Potência Nominal: 235 MVA
- Tensão nominal Primário: 13,8 kV
- Tensão nominal Secundário: 230 kV
- Derivações Secundário: 218,50/224,50/230/235,75/241,50 kV
- Nível Básico de Isolamento: 1045 kV
- Tensão Suportável a Impulso Atmosférico: 1045 kV

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 [04].

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. [04][05]

Optou-se pela utilização da abordagem simplificada na representação dos transformadores. O valor da capacitância utilizado para o transformador foi de 1nF [04].

4.2.5 FONTE DE SURTO

Os dados relativos às descargas atmosféricas foram obtidos através de uma rede integrada de detecção de descargas atmosféricas, a qual é composta por 23 sensores distribuídos por diversos estados brasileiros [09].

Os dados tipicamente fornecidos por esta rede são:

- Horário das ocorrências (ms);
- Localização (Longitude e Latitude);
- Valor máximo da corrente (kA);
- Polaridade;
- Características da forma de onda.

Para a determinação do tipo de surto que será utilizado nos estudos, foi utilizada a análise feita por SARAIVA, Elise, et al. [09]. Esta análise iniciou-se pelo cálculo da média ponderada diária da qual, posteriormente, obteve-se a média ponderada mensal. Finalmente, tirou-se a média ponderada anual, que foi de 20kA.

As informações disponíveis não permitiram determinar características como tempo de calda e tempo de crista. Diante disso, foi considerado um valor típico de acordo com as recomendações [02][03].

Desta forma, a fonte de surto que foi utilizada representa uma descarga de 20kA, com tempo de crista de 1,2 μ s e tempo de calda de 50 μ s.

4.2.6 CIRCUITO MODELADO NO ATP

Diante das definições dos parâmetros de modelagem de cada equipamento no ATP (seção 4.2.1 a seção 4.2.5), o sistema simplificado foi inserido no software. Este sistema está ilustrado na Figura 12.

Em resumo, os parâmetros utilizados para modelagem dos equipamentos são:

- Linhas de Transmissão e Barramentos: impedância de 370 Ω , e distâncias conforme apresentado na Figura 8;
- Cabo de conexão entre barramento e transformador: impedância de 30 Ω , e distâncias conforme apresentado na Figura 8;
- Fonte de surto: fonte de corrente de 20kA, com tempo de crista de 1,2 μ s e tempo de calda de 50 μ s;
- Disjuntores, Chaves Seccionadoras, TP e TC: capacitância de 300pF;

- Transformador: capacitância de 1nF;
- Para-raios: resistor não linear, cuja curva não linear é apresentada na Figura 9.

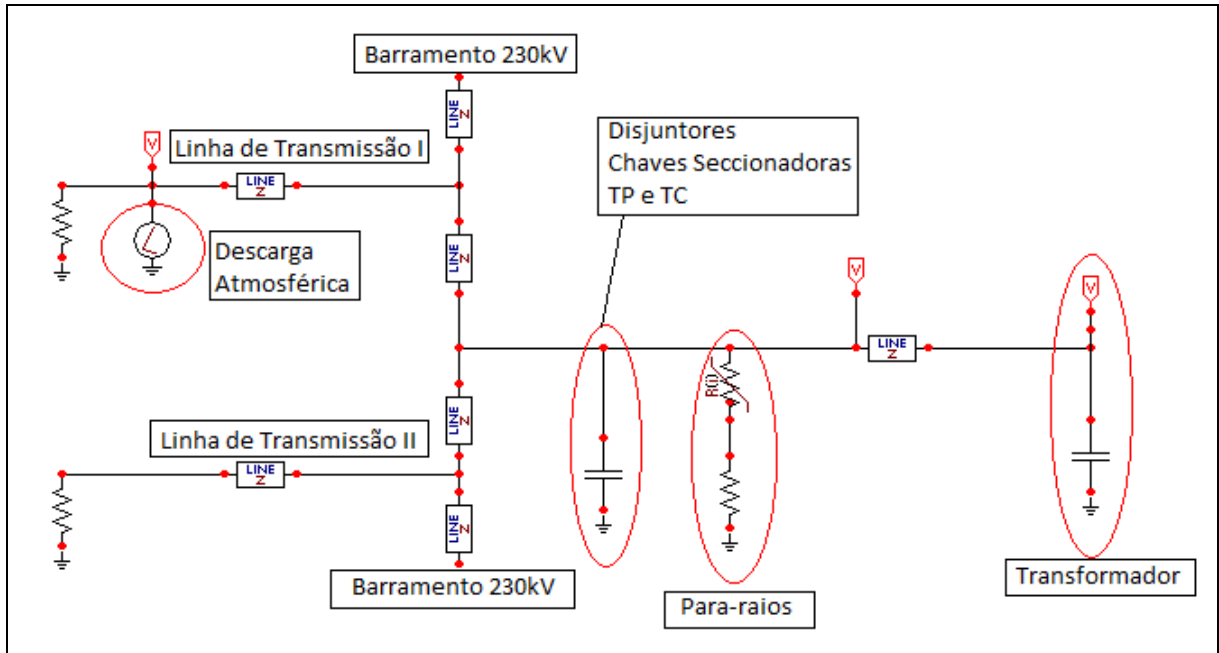


Figura 12 – Modelo do Sistema no ATP

4.3 IDENTIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS

Para realização das simulações deste estudo, foram definidos 05 cenários que serão avaliados. São eles:

- Cenário 1: Uma descarga atmosférica atinge a linha de transmissão I a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Neste cenário, não há para-raios instalado em nenhum ponto do sistema.
- Cenário 2: Uma descarga atmosférica atinge a linha de transmissão I a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Neste cenário, o para-raios está instalado a 36m de distância do transformador, conforme instalado atualmente na subestação em estudo.
- Cenário 3: Uma descarga atmosférica atinge a linha de transmissão I a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Neste cenário, o para-raios está instalado no transformador.
- Cenário 4: Uma descarga atmosférica atinge a linha de transmissão II a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Neste

cenário, o para-raios está instalado a 36m de distância do transformador, conforme instalado atualmente na subestação em estudo.

- Cenário 5: Uma descarga atmosférica atinge a linha de transmissão II a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Neste cenário, o para-raios está instalado na linha de transmissão I, na entrada da subestação.
- Cenário 6: Uma descarga atmosférica atinge a linha de transmissão I a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Neste cenário, há dois para-raios instalados, sendo um há 36 metros de distância do transformador e outro instalado no próprio transformador.

4.4 RESULTADOS ENCONTRADOS

4.4.1 CENÁRIO 1

A primeira simulação tem como principal objetivo apresentar o nível de sobretensão aplicado no transformador, quando não há atuação de um dispositivo de proteção como o para-raios. Esta simulação está ilustrada na Figura 13.

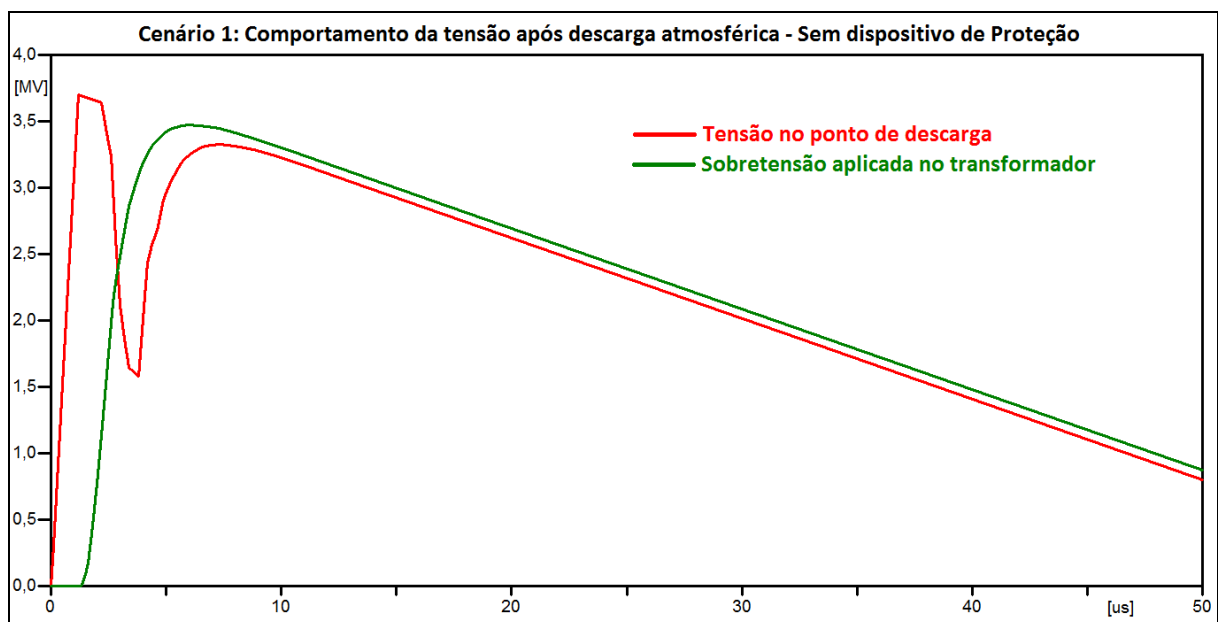


Figura 13 – Sobretensões simuladas – Subestação sem proteção de para-raios

Nesta primeira simulação, considera-se uma descarga atmosférica atingindo a linha de transmissão I a uma distância correspondente a 330 metros da entrada da subestação. Caso esta situação ocorra, haverá uma sobretensão de 3500kV no transformador, podendo ocasionar acidentes ou destruição do equipamento, além da

interrupção do fornecimento de energia elétrica, uma vez que este nível de tensão é superior ao NBI do mesmo, conforme apresentado no item 4.2.4 (1045kV).

4.4.2 CENÁRIO 2

Após simulação do cenário 2, com a posição do para-raios conforme instalado atualmente, encontramos o resultado apresentado no gráfico ilustrado na Figura 14.

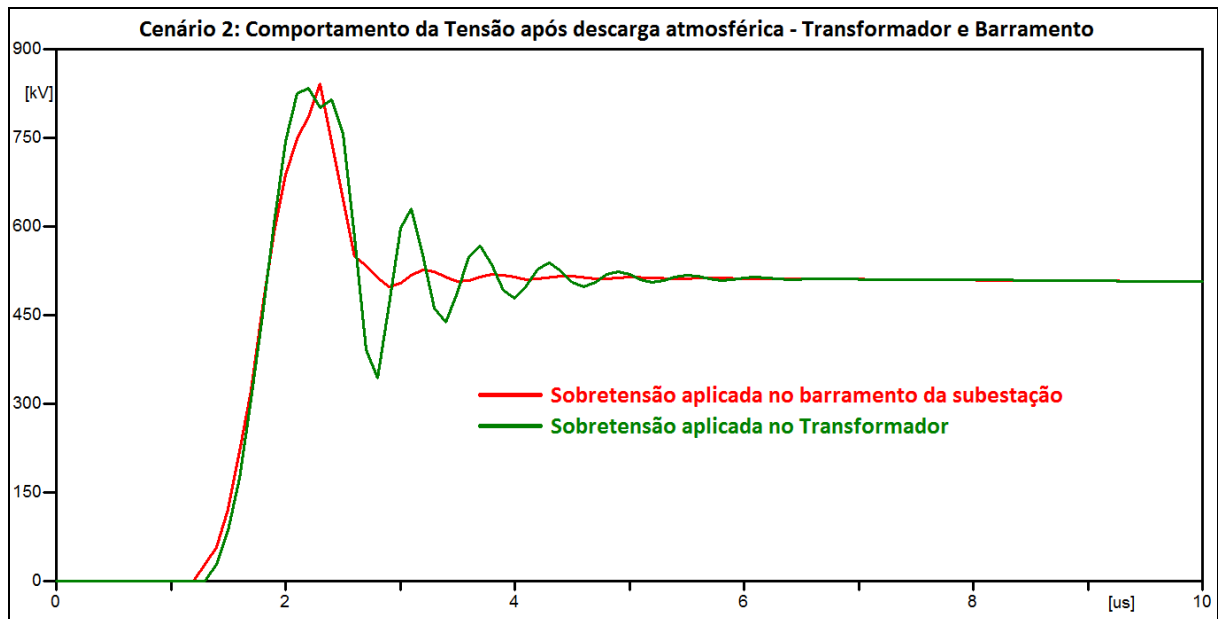


Figura 14 – Oscilação de Tensão no Transformador – Cenário 2

Nesta simulação, devido a atuação de proteção do para-raios, a sobretensão no transformador de potência chegou no máximo a 834kV. Este valor de sobretensão é admissível, pois é menor que o nível básico de isolamento do transformador, conforme apresentado no item 4.2.4 (1045kV).

Percebe-se no comportamento transitório uma oscilação de tensão devido a propagação do surto entre o equipamento e seu dispositivo de proteção. Neste cenário, esta propagação é observada com menos intensidade no barramento da subestação, como se pode observar na Figura 14.

4.4.3 CENÁRIO 3

Após simulação do cenário 3, com a posição do para-raios instalado no transformador, encontramos o resultado apresentado no gráfico ilustrado na Figura 15.

Nesta simulação, devido a atuação de proteção do para-raios, a sobretensão no transformador de potência chegou no máximo a 798kV. Este valor de

sobretensão é admissível, pois é menor que o nível básico de isolamento do transformador, conforme apresentado no item 4.2.4 (1045kV).

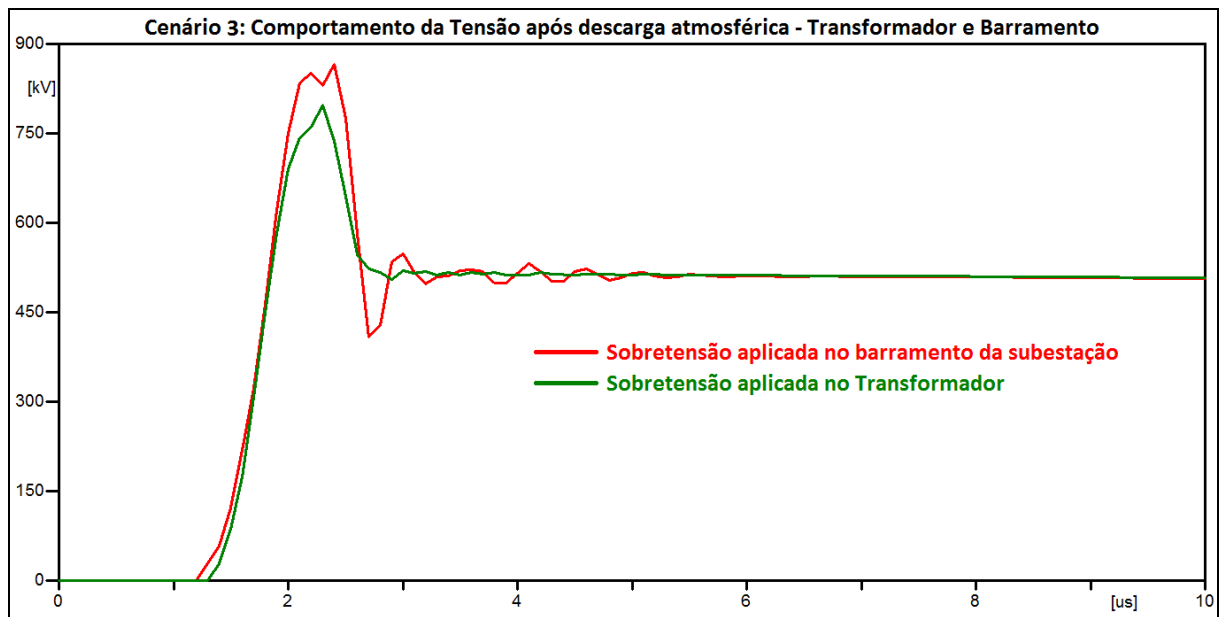


Figura 15 – Oscilação de Tensão no Barramento da Subestação – Cenário 3

Percebe-se no comportamento transitório uma oscilação de tensão devido a propagação do surto entre o barramento e seu dispositivo de proteção. Neste cenário, esta propagação é observada com menos intensidade no transformador, como se pode observar na Figura 15.

4.4.4 CENÁRIO 4

Após simulação do cenário 4, com a posição do para-raios conforme instalado atualmente, encontramos o resultado apresentado no gráfico ilustrado na Figura 16.

Nesta simulação, devido a atuação de proteção do para-raios, o valor de sobretensão no transformador foi de 883kV. Este valor de sobretensão é admissível, pois é menor que o nível básico de isolamento do transformador, conforme apresentado no item 4.2.4 (1045kV).

Percebe-se no comportamento transitório uma oscilação de tensão devido a propagação do surto entre o equipamento e seu dispositivo de proteção. Neste cenário, esta propagação é observada com menos intensidade no barramento da subestação, como se pode observar na Figura 16, que apresenta um comparativo entre os transitórios da sobretensão aplicada no transformador e no barramento.

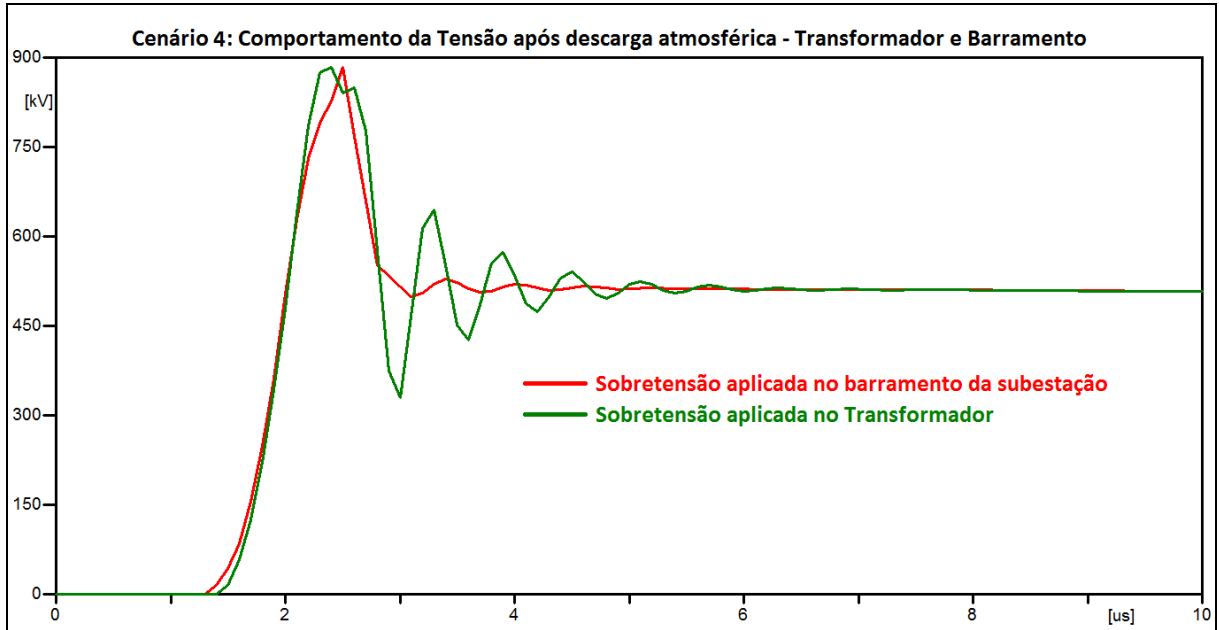


Figura 16 – Sobretensões simuladas – Cenário 4

4.4.5 CENÁRIO 5

Após simulação do cenário 5, encontramos o resultado apresentado no gráfico ilustrado na Figura 17.

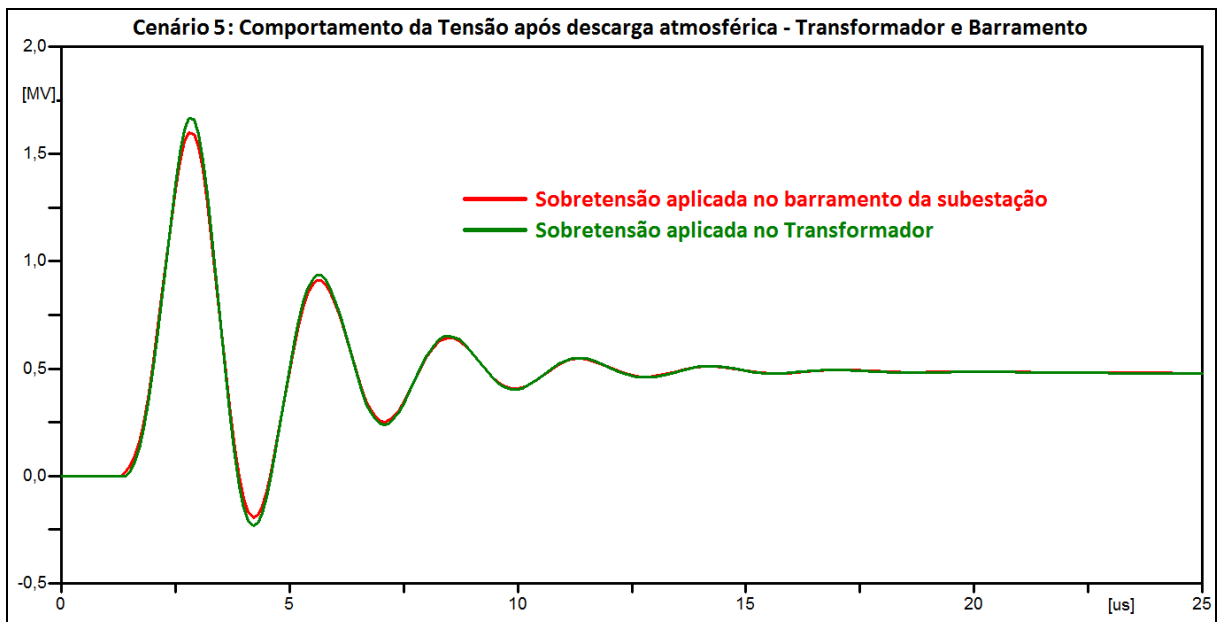


Figura 17 – Sobretensões simuladas – Cenário 5

Nesta simulação, o para-raios não está instalado dentro do pátio da subestação. Ele está instalado na linha de transmissão I na entrada da subestação, enquanto a descarga atinge a linha de transmissão II a 330m da subestação. Neste cenário, a atuação de proteção do para-raios não é suficiente para proteger os

equipamentos da subestação. O valor de sobretensão no transformador foi de 1670kV, maior que o nível básico de isolamento do transformador, conforme apresentado no item 4.2.4 (1045kV).

4.4.6 CENÁRIO 6

Após simulação do cenário 6, com dois (02) para-raios instalados na subestação, sendo um deles conectado diretamente no barramento da subestação e o outro conectado diretamente no transformador, encontramos o resultado apresentado no gráfico ilustrado na Figura 18. Nesta simulação, a descarga atinge a linha de transmissão I a 330m da subestação.

Nesta simulação, devido a atuação de proteção do para-raios, o valor de sobretensão no transformador foi de 663kV. Este valor de sobretensão é admissível, pois é menor que o nível básico de isolamento do transformador, conforme apresentado no item 4.2.4 (1045kV).

Pode-se observar claramente que a existência de dois para-raios praticamente eliminou a existência de oscilação de tensão apresentada nos demais cenários simulados neste trabalho.

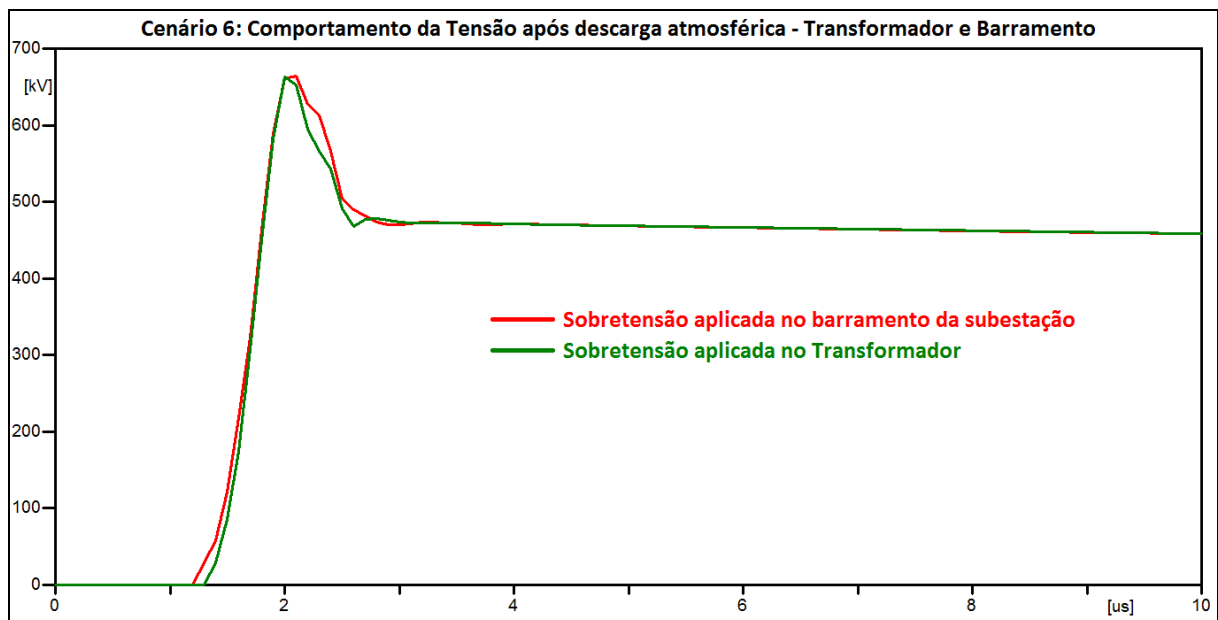


Figura 18 – Sobretensões simuladas – Cenário 6

5 CONCLUSÃO

O estudo sobre os impactos das descargas atmosféricas em subestações elétricas em comparação aos níveis básicos de isolamento dos equipamentos, bem como o estudo da melhor estratégia de proteção do sistema, como avaliação da quantidade e localização dos para-raios tem se tornado fundamental nos projetos de subestações elétricas. Sua importância é indiscutível, promovendo 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 destes estudos.

O estudo apresentado no capítulo 4 visou identificar possíveis cenários aos quais a subestação estudada poderia ser afetada, e quantificar os níveis de sobretensão aos quais os equipamentos estariam sujeitos em cada um dos cenários simulados. O estudo de sobretensão pode fornecer antecipadamente informações de possíveis falhas, além de suas respectivas causas e consequências.

Os resultados obtidos por meio da simulação computacional no programa ATP apontam os níveis de sobretensão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Apresentação dos resultados da simulação computacional

	Sobretensão Transformador (pico)	Sobretensão Barramento (pico)	Local de Oscilação de Tensão
Cenário 1	3500kV	3500kV	-
Cenário 2	834kV	841kV	Transformador
Cenário 3	798kV	867kV	Barramento
Cenário 4	883kV	884kV	Transformador
Cenário 5	1670kV	1600kV	Ambos
Cenário 6	663kV	664kV	-

Os resultados da simulação computacional apontam como a melhor solução a proposta no cenário 6, com a instalação de dois para-raios, sendo um deles instalados no barramento da subestação e o outro instalado juntamente com o transformador. Além desta solução apresentar os menores valores de sobretensão, a oscilação de tensão devido a propagação de surto é praticamente eliminada. Estas

fortes oscilações de tensão em uma elevada frequência, ocorrida nos demais cenários, podem trazer problemas.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se alguns estudos adicionais e detalhados, que possibilitem a confirmação dos resultados encontrados neste relatório. Pode-se citar:

- A representação dos equipamentos foi feita adotando-se um modelo simplificado;
- Para este estudo foi considerada uma malha de aterramento ideal, já implantado no ATP. Sugere-se a avaliação detalhada da malha de aterramento da subestação estudada, bem como sua modelagem no ATP;
- Deve-se considerar a ruptura da cadeia de isoladores na linha de transmissão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica, 2010.
- [02] NORMA ABNT NBR 6939 – Coordenação de Isolamento. Novembro de 2000;
- [03] NORMA ABNT NBR 8186 – Guia de Aplicação de Coordenação de Isolamento. Setembro de 1983;
- [04] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “Insulation Coordination – Part 4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Electrical Networks”. IEC Technical Report 60071-4. Geneve, 2004;
- [05] IMECE, A. F. et. al. “Modeling Guideline for Fast Front Transients.” Report Prepared by the Fast Front Transient Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group. Dezembro, 1997;
- [06] ORILLE-FERNANDEZ, A.L.; RODRIGUEZ, S.B.; GOTES, Ma.A.G.; , “Optimization of surge arrester's location,” Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.19, no.1, pp. 145- 150, Jan. 2004;
- [07] SIEMENS. “Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals”. 1ª Edição. Berlim. Jul. 2001.
- [08] ABB. “Application guidelines for station protection”. 2ª Edição. Suécia. 1995.
- [09] SARAIVA, Elise, et al., Considerações sobre Modelagens e Resultados de Estudos dos Impactos de Descargas Atmosféricas em ETD's; VII SBQEE – 2007;
- [10] TAKAMI, J.; OKABE, S.; ZAIMA, E.; , “Study of Lightning Surge Overvoltages at Substations Due to Direct Lightning Strokes to Phase Conductors,” Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.25, no.1, pp.425-433, Jan. 2010;
- [11] Portal ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em “<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>”. Acesso em 02 de Outubro de 2011.
- [12] CARNEIRO, JOÃO CARLOS. “Política de Renovação de Para-raios de Alta Tensão de Carboneto de Silício SIC existentes em subestações de Sistemas

Elétricos: Uma nova Visão Técnico Econômica”. SNPTEE. Grupo VIII – Subestações e Equipamentos Elétricos – GSE. Outubro 2005.

[13] ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM FEATURES. Disponível em “<http://www.emtp.org/about.html>”. Acesso em 05 de Novembro de 2011.

[14] JITSUKAWA, Jorge André Meneghel. “Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a Ar”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Elétrica. Porto Alegre, 2010.

[15] REDE INTEGRADA NACIONAL DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. Disponível em “<http://www.inpe.br/webelat/rindat/>”. Acesso em 05 de Novembro de 2011.