

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WUALYSON GOMES CAIAFA

UM ESTUDO SOBRE PÁRA-RAIOS

VIÇOSA-MG
AGOSTO-2009

WUALISON GOMES CAIAFA

UM ESTUDO SOBRE PÁRA-RAIOS

Trabalho de conclusão de curso
submetido à Universidade Federal de Viçosa,
para a obtenção de créditos referentes à
disciplina Monografia e Seminário do curso de
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Tarcísio de
Resende

VIÇOSA-MG
AGOSTO-2009

UM ESTUDO SOBRE PÁRA-RAIOS

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende

Examinador: Prof. Msc. Heverton Augusto

Examinador: Prof. Wevergton Lopes Hermsdorff

VIÇOSA-MG
AGOSTO-2009

Dedico esta obra à
minha mãe, Maria Aparecida
Gomes, a minha irmã, Ingrid
Suelem e a toda minha família e a
Luis Paulo, um grande amigo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a oportunidade de desfrutar do conhecimento;

Em especial, a minha mãe, que me deu suporte para ocupar uma posição que jamais pensei alcançar;

A minha irmã, pelo carinho e companheirismo mútuos, em todos os momentos;

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, participaram desta importante etapa de minha vida intelectual e neste processo de enriquecimento pessoal.

"Com a sabedoria se
edifica a casa, e com a inteligência
ela se firma."

Salomão

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
SUMÁRIO.....	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Definição Geral de Pára-Raios	2
2.2. Pára-Raios de Carboneto de Silício.....	3
2.2.1. Etapa de Fabricação	3
2.3. Pára-Raios de Óxido de Zinco.....	6
2.3.1. Etapa de Fabricação	7
2.4. ORIGEM E PREVENÇÃO DAS SOBRETENSÕES	8
2.4.1. Sobretensões por Descarga Direta	10
2.4.2. Sobretensão por Descarga Indireta Induzida.....	11
2.4.3. Defeitos Monopolares	14
2.4.4. Perda de Carga por Abertura do Disjuntor.....	15
2.4.5. Fenômenos de Ferro-Ressonância.....	16
2.4.6. Efeito Ferrante.....	17
2.5. Redes Secundárias	17
2.6. Padrão CEMIG	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1. Software PSCAD.....	20
3.2. Simulação Computacional de Pára-Raios	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÃO.....	30
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	31

RESUMO

O trabalho em questão é um estudo dos pára-raios analisando as diferentes formas de sua atuação. O objetivo deste trabalho é fazer um estudo, tanto da forma que um pára-raios trabalha quanto da forma que é construído.

Também se focou a motivação das sobretensões, buscando fazer uma análise das redes de distribuição e de que forma os pára-raios são acoplados a elas.

Foi utilizado o software PSCAD para fazer uma análise da atuação dos pára-raios para diferentes tipos de impedâncias de aterramento, com o objetivo de se fazer uma análise deste parâmetro e de sua relevância para a atuação do pára-raios.

Palavra chave: pára-raios, sobretensões, impedâncias de aterramento e software PSCAD.

ABSTRACT

The work in question is a study of the role of lightning Rod examining the different forms of their actions. That this work is a study of both the way that a lightning rod works and the way that is constructed.

Also focus the motivation of overvoltage, trying to make an analysis of distribution networks and how the lightning rods are attached to them.

We use the software PSCAD trying to analyze the role of lightning rod for different types of ground impedance, to do an analysis of this parameter and its relevance to the role of lightning rod.

Key Word: *role of lightning, overvoltage, ground impedance and software PSCAD.*

1. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição estão vulneráveis a ação de descargas elétricas atmosféricas, que podem vir a ocorrer, tanto na rede quanto em sua proximidade, provocando sobretensões no sistema e vindo a causar danos na rede e em equipamentos acoplados a ela. As descargas atmosféricas correspondem a uma das principais causas de interrupções e desligamentos nas redes de energia elétrica no Brasil (SILVA NETO, 2004).

As sobretensões também podem ter origem interna, ocasionadas por manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, chaveamento de grandes bancos de capacitores ou mesmo a saída de grandes blocos de cargas do sistema de energia. O equipamento utilizado para estabilizar os níveis de tensão a valores compatíveis com o perfeito funcionamento do sistema são os pára-raios, que hoje são amplamente utilizados nas redes de distribuição e transmissão (MAMEDE FILHO, 2005).

O pára-raios é, em suma, um resistor não linear que muda sua resistência conforme o nível de tensão aplicado. Ele é construído para não permitir a interrupção da transmissão de energia, mas faz com que a tensão se estabilize no nível desejado, permitindo o escoamento para a terra, das altas correntes induzidas, provenientes das descargas atmosféricas (SILVA NETO, 2004).

Os pára-raios assumem o comportamento de uma chave fechada no período em que as tensões excedem o seu limite, ou seja, fechando um curto entre a fase e a terra no período de influencia da descarga e cortando o fluxo quando a corrente volta ao normal. Os pára-raios são acoplados ao neutro, que é aterrado durante o percurso da linha e permite a dissipação da potência induzida pela descarga através das hastes de aterramento (SILVA NETO, 2004).

Objetiva-se neste estudo realizar uma análise da atuação do pára-raios tendo como principal parâmetro, o aterramento e, simultaneamente a importância desse para o efetivo resultado alcançado pelo equipamento de proteção. O presente estudo justifica-se pela necessidade de se criar maiores possibilidades de pesquisa nessa área tão importante, principalmente com o foco nos equipamentos, sua qualidade e aplicabilidade.

A pesquisa foi feita através de consulta a obras de renomados autores, artigos e manuais de instituições especializadas no campo da Engenharia Elétrica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Definição Geral de Pára-Raios

Para prevenir os danos provocados pelas descargas atmosféricas sobre as redes de transmissão e distribuição, utiliza-se o pára-raios, que é um dispositivo com características não lineares dos elementos constituídos na sua fabricação. O objetivo básico é conduzir correntes provenientes de descargas atmosféricas devido às tensões induzidas nas redes e em seguida interromper as correntes subsequentes, isto é, aquelas que sucedem às correntes de descargas após a sua condução para a terra (MAMEDE FILHO, 2005).

Atualmente têm sido estudados materiais mais eficientes, através de pesquisas de novos materiais que possuam respostas mais precisas com maior resistência a dissipação de potência com um menor aquecimento (BUENO et al, 2000).

Os pára-raios dão maior confiabilidade às redes de distribuição, pois sua função é garantir a continuidade do funcionamento do sistema de energia, mesmo que sofra abalos pela inesperada ocorrência de valores de corrente e tensão superiores aos valores nominais. As finalidades básicas deste dispositivo são de impedir que o abalo gerado pelas sobretensões se propague pela linha e equipamento do sistema, permitindo a rápida dissipação das mesmas.

Apesar de existirem outros tipos de materiais utilizados na fabricação de pára-raios cujas pesquisas vêm avançando no sentido de descobrir novos materiais cada vez mais eficientes, analisaremos neste trabalho dois tipos de pára-raios que são diferenciados pelo material empregado, que são o carboneto de silício e o óxido de zinco, cada um com propriedades não lineares de resistência específicos (BUENO et al, 2000).

2.2. Pára-Raios de Carboneto de Silício

Os pára-raios são formados por um resistor não linear, centelhador série, corpo de porcelana, desligador automático, protetor contra sobrepressão, mola de compressão e abaixo detalharemos as partes que compõem o equipamento conforme pode ser visto na Figura 1.

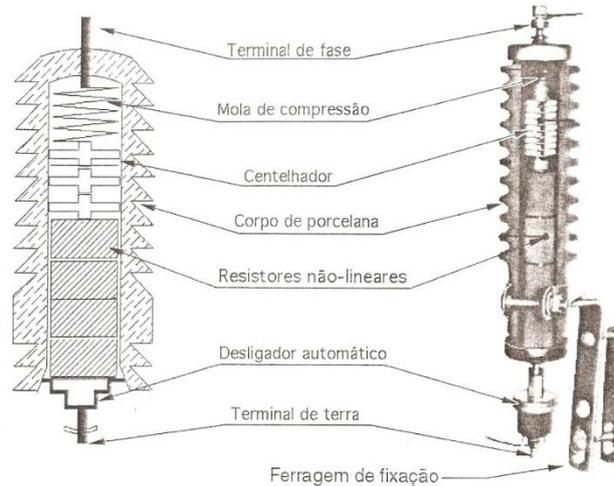


Figura 1: Corte longitudinal de um pára-raios de SiC (MAMEDE FILHO, 2005)

Os pára-raios de carboneto de silício são aqueles que utilizam como resistor não-linear o carboneto de silício (SiC) e tem em série com este resistor um centelhador formado por espaços vazios que possibilitam o corte da corrente após o efeito da sobretensão.

2.2.1. Etapa de Fabricação

São várias as etapas na formação deste componente, sua matéria prima passa por diversos estágios até adquirir as propriedades resistivas e a consistência esperada.

Durante a fabricação do pára-raios o carboneto sofre a adição de outros produtos, como o bismuto, alterando a sua consistência, tornando-o mais maciço e não granular, ou seja, sua consistência que antes do processo era similar a uma areia, adquire a forma de uma massa. Posteriormente, o carboneto será usado como a principal matéria prima para a fabricação de blocos de carboneto de silício que é o componente responsável por mudar sua impedância de acordo com a tensão nos terminais do pára-raios.

Os blocos, apesar de estarem compactos, ainda não possuem resistência, por isso são levados a estufas onde sofrem o processo de enrijecimento que é similar à confecção de um produto cerâmico que, depois de moldando, é levado ao forno para sofrer aquecimento, adquirindo forma rígida e consistente. Na estufa a temperatura é elevada em torno de 2000°C, sendo aumentada gradativamente de modo a ocorrer reações químicas que são necessárias nas cadeias de carbono. Os blocos devem ser aquecidos de maneira uniforme, de fora para dentro, e resfriado da mesma forma, a fim de evitar fissuras nas peças devido à dilatação desproporcional do produto durante variação da temperatura. Durante este processo, a substância aglomerante, por ser de baixo ponto de ebulição, evapora no interior da estufa, liberando-se do bloco. Este, ao final do processo, transforma-se em uma peça de dureza relativamente elevada.

A próxima etapa da fabricação é a metalização, que seria o processo de cobrir com cobre os blocos de carboneto de silício. O cobre é inserido nas superfícies de contato, o que diminui a resistência do sistema através do mau contato entre as peças. A pulverização nas faces superiores e inferiores do bloco de carboneto de silício são executadas com o auxílio de uma pistola de acetileno, utilizando-se de um fio de liga de cobre que, ao ser inserido no bico em chama, sofre o processo de liquefação e, ao entrar em contato com a superfície sofre resfriamento aderindo a esta e proporcionando uma redução da resistência elétrica no encaixe das peças.

Ao término da metalização, cada bloco passa pelo ensaio de tensão de descarga, que avalia a queda de tensão sobre os blocos. Por meio desses ensaios, os blocos são diferenciados de acordo com a tensão de descarga (MAMEDE FILHO, 2005).

Outro componente do pára-raios é o centelhador série, constituído por espaçadores entre eletrodos, que são colocados em série com os resistores não lineares e cumprem o objetivo de garantir uma característica de corte regular com uma rápida extinção da corrente subsequente, garantindo o perfeito funcionamento do equipamento.

Na produção dos centelhadores são utilizadas chapas de cobre que são moldadas em forma circular. A prensa molda em sua face uma saliência que serve para a interrupção da tensão. A montagem é feita de forma que a corrente de descarga, ao atravessar o centelhador, o faça em forma helicoidal, produzindo o efeito de bobina e melhorando as condições de corte da corrente subsequente.

Na fabricação do centelhador é utilizado um controle de umidade que mantém o seu valor em aproximadamente 52%, condição propicia para montagem das partes componentes do pára-raios (os blocos, o centelhador e as molas de compressão) no interior do corpo de

porcelana. A partir daí o pára-raios é levado para uma máquina onde será hermeticamente fechado (MAMEDE FILHO, 2005).

Como o isolamento do produto é essencial para o bom funcionamento, em cada unidade de ensaio, é injetado nitrogênio extra seco em seu interior através de um orifício feito em seu terminal de ligação da fase, levando-o, em seguida, a um tanque de água, dentro do qual fica submerso por um minuto. Quando submerso, é possível avaliar se o isolamento está em devida operação, com uma fácil visualização do vazamento do gás inserido no interior da estrutura do pára-raios, pela formação de bolhas no equipamento imerso.

Ao aliviar a pressão interna do pára-raios, permite-se a retirada do gás injetado, para que em seguida, haja uma avaliação com o ensaio de tensão, sendo o teste final que, em suma, é observar o funcionamento final do produto para atender à sua finalidade.

Os produtos aprovados pelos testes são direcionados à sessão de produtos acabados e podem vir a ser comercializados.

O carboneto de silício é capaz de conduzir altos níveis de correntes de descargas com baixas tensões residuais, no entanto oferece alta impedância para os valores subsequentes fornecidos pelo sistema. Se fosse construído sem o centelhador, um pára-raios SiC, passaria a conduzir uma elevada corrente, que ao circularia no pára-raios causaria um aquecimento exagerado devido às perdas Joule nos resistores não-lineares, gerando uma grande dissipação de potência, podendo ocasionar explosões no momento em que a corrente não pudesse ser interrompida.

O aumento da temperatura do bloco cerâmico de carboneto de silício não deve reduzir a sua resistividade elétrica no momento da passagem da corrente subsequente. Caso contrário, essa corrente poderia assumir um valor muito elevado e, ao permitir a sua interrupção pelo centelhador série, na sua primeira passagem pelo zero, provocaria uma re-ignição da corrente no meio ciclo seguinte até que o processo gerasse danos ao pára-raios.

Durante uma sobretensão, os blocos sofrem um aumento de sua temperatura, pois durante sua atuação existe a dissipação de potência. A resistência não pode aumentar com a passagem de corrente de descarga, pois caso contrário, haverá uma elevação da tensão residual que pode ocasionar danos ao equipamento.

O corpo de porcelana é uma estrutura com a função de sustentar, proteger e isolar os demais componentes que estão em seu interior, como pode ser observado na figura 1 levando a um perfeito funcionamento do pára-raios.

No momento em que a temperatura do equipamento sofre uma alteração brusca devido à dissipação de potência quando é acionado, passa uma grande corrente que gera uma dilatação dos componentes, podendo provocar o rompimento do isolamento.

Como os coeficientes de expansão da porcelana, das estruturas de isolamento e as tampas de metal são diferentes, existe a possibilidade de haver a formação de aberturas entre as partes e propiciando a entrada de ar, o que afeta de imediato a atuação do centelhador, através do qual pode haver a ruptura motivada pela redução da rigidez dielétrica dos espaços entre os elementos deste componente. Segundo Mamede Filho (2005) o sistema de vedação é o sistema mais crítico de um pára-raios e consiste nas estruturas que auxiliam o isolamento juntamente com as tampas metálicas instaladas nas extremidades.

O desligador automático é composto por um elemento resistivo em série com um componente explosivo. É projetado para não operar com a passagem da corrente de descarga e da corrente subsequente, mas sim quando as correntes que passam pelo pára-raios superam a capacidade do mesmo e antes que ocorra a destruição do equipamento rompe através da auto-exploração, o efeito visual permite a visualização para a troca dos pára-raios defeituosos.

É imprescindível que a curva de atuação do desligador automático seja combinada com as curvas características de ação dos elementos de proteção do sistema, sendo utilizado somente nas unidades de média tensão.

O protetor contra sobrepressão é um componente que impede o rompimento explosivo do para raio. Ele cumpre a função de permitir a saída dos gases antes que haja o rompimento da porcelana e provoque danos ao equipamento, às pessoas que possam estar nas proximidades do pára-raios, a estruturas físicas como carros, casas ou qualquer outro que possa ser atingido pelos destroços, evitando prejuízos.

A mola de compressão é fabricada em fio de aço de alta resistência mecânica e tem a função de reduzir a resistência de contato entre os blocos cerâmicos exercendo uma pressão sobre o centelhador e o resistor, obrigando a manutenção do contato.

2.3. Pára-Raios de Óxido de Zinco

Através de pesquisas para obtenção de resistor não linear de aplicação na proteção de circuitos eletrônicos, a Matsushita Electric Industrial Company, sediada em Osaka, no Japão, descobriu em 1978, que o óxido de zinco possui excelentes características não lineares. Em

seguida, a General Eletric avançou nas pesquisas para obter um produto que pudesse substituir o carboneto de silício (SiC) único produto que desempenhava a função de resistor não linear na construção de pára-raios e que dispensasse a aplicação do centelhador, responsável pelo cancelamento das correntes que surgem após a sobretensão (MAMEDE FILHO, 2005).

São assim batizados os pára-raios que empregam como o resistor não-linear, o óxido de zinco (ZnO) e, ao contrário dos pára-raios de carboneto de silício, não possuem centelhadores séries.

2.3.1. Etapa de Fabricação

Os pára-raios de óxido de zinco são constituídos por blocos cerâmicos compostos a partir de uma mistura de óxido de zinco, em maior proporção, e outros óxidos metálicos, como o antimônio, o manganês, o bismuto e o cobalto.

Através dessa mistura forma-se um pó. Em seguida procede à prensagem dos blocos nas dimensões desejadas, o que consiste num tratamento térmico, cujo objetivo é fazer com que os blocos adquiram rigidez e a forma desejada.

Os blocos são obtidos quando o material é submetido a uma temperatura que pode chegar aos 1300°C. Após cobrir com elemento metálico as superfícies de contato dos blocos cerâmicos, o mesmo é levado a uma série de testes que indicarão a classificação dos pára-raios quanto a sua utilização (MAMEDE FILHO, 2005).

Assim como o SiC, o óxido de zinco apresenta uma elevada capacidade de condução de corrente de surto, o que resulta em baixas tensões durante a passagem da corrente de descarga, ao mesmo tempo em que oferece maior resistência à corrente que surge após os altos níveis anteriores e que são naturais do sistema.

Os pára-raios de óxido de zinco apresentam as seguintes vantagens técnicas e operacionais: não existem correntes subsequentes nos pára-raios a óxido de zinco; apresentam maior capacidade de absorção de energia; são dados de um nível de proteção melhor definido, o que resulta na redução da margem de segurança do isolamento dos equipamentos; por não possuírem centelhadores, a curva de atuação dos pára-raios a óxido de zinco não apresenta transitórios.

2.4. ORIGEM E PREVENÇÃO DAS SOBRETENSÕES

A sobretensão é definida como a consequência de uma tensão que supera o valor nominal em um dado tempo e com a relação às fases de um sistema, ou uma fase e a terra. Segundo Mamede Filho (2005) para ser classificada como uma sobretensão, seu valor de crista deve ser superior ao valor de crista da tensão máxima do sistema.

Tomando como princípio o grau de amortecimento da onda de sobretensão e o seu tempo de duração, as sobretensões podem admitir três diferentes formas, podendo ser divididas tendo como padrão características como Sobretensão temporária, de manobra e atmosféricas. (ZANETTA JUNIOR, 2003)

Não existem padrões firmados a respeito das diversas formas em que se estabelecem as sobretensões, pois não há o estabelecimento de limites bem definidos entre as diferentes formas de sobretensão.

Caracteriza-se a sobretensão temporária por uma onda de tensão elevada, de natureza oscilatória em um dado ponto da linha e em certo tempo, ou seja, ocorrida num ponto definido do sistema. O distúrbio envolve as fases ou uma fase e a terra, cujo amortecimento é muito reduzido (ZANETTA JUNIOR, 2003).

As sobretensões temporárias são motivadas por ocorrências de defeitos monopolares, perda de cargas, fenômenos de ferro-ressonância, efeito ferrante. Cada situação será detalhada nos próximos tópicos.

A sobretensão de manobra ocorre durante a operação de um equipamento de manobra caracterizando-se pelo surgimento de elevados valores de tensão num determinado ponto do sistema envolvendo as três fases ou uma fase e a terra.

Cada manobra dá origem a formas diferentes de tensões que possuem curto tempo de duração e são mais severas do que as sobretensões de natureza temporária, sendo, portanto, um dos parâmetros utilizados para determinar o nível de isolamento do sistema.

Os parâmetros próprios do sistema modelam os valores da amplitude da onda de sobretensão, bem como a sua configuração.

As sobretensões de manobra são caracterizadas por fenômenos eletromagnéticos e podem sobrepor-se à tensão de frequência industrial. Elas surgem quando é efetuada a interrupção de um circuito submetido a correntes muito elevadas, como a de curto-circuito, a interrupção de correntes capacitivas, tais como as de uma linha de transmissão e de

distribuição, operando em vazio ou em banco de capacitores, e, finalmente, a interrupção de pequenas correntes indutivas, como as de reatores e transformadores energizados em vazio.

Estas sobretensões são consideradas de origem interna ao sistema e sua força depende das características do sistema e do nível de seu curto-circuito.

Com a utilização de equipamentos de manobra apropriados, como disjuntores providos de resistores de fechamento, que têm a característica de dissipar a energia resultante das ondas múltiplas de reflexão, reduz os efeitos acompanhantes das sobretensões de manobra. Também é importante observar o instante em que ocorreu a operação do elemento de proteção em relação à onda de tensão no instante considerado.

É interessante ressaltar que o desligamento de um transformador ou motor, operando em vazio, faz liberar a energia magnética existente na máquina. E como esta energia não pode ser consumida, no caso do transformador, pelo fato de seu circuito primário estar aberto, a energia é armazenada na sua capacitância própria.

Como a capacitância do transformador é pequena e a sua indutância muito elevada, em circuito aberto, logo este equipamento sofrerá uma sobretensão que poderá perfurar o seu enrolamento.

A sobretensão atmosférica é causada por uma descarga atmosférica e envolve as fases do sistema ou uma das fases e terra. Várias teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno dos raios. A explicação mais atual é que o atrito entre as partículas de água e gelo formadas nas nuvens, provocada pelos ventos ascendentes, de violenta intensidade, dá origem a uma grande quantidade de cargas elétricas.

Experimentalmente as cargas elétricas positivas ocupam a parte superior da nuvem, enquanto as cargas elétricas negativas se posicionam na sua parte inferior o que atrai cargas positiva na superfície da terra, criado assim um campo elétrico entre o solo e as nuvens (MAMEDE FILHO, 2005).

Desta forma, a concentração de cargas elétricas positivas e negativas numa determinada região faz surgir uma diferença de potencial entre a nuvem e a terra. No entanto, o ar apresenta uma determinada rigidez dielétrica, normalmente elevada, e que depende de certas condições ambientais.

Com o aumento do potencial pode vir a ocorrer o rompimento da rigidez dielétrica do ar, ocasionando o fluxo de carga com a saída das cargas elétricas negativas na direção da terra em um trajeto tortuoso e normalmente repleto de ramificações. Este fenômeno é nomeado como descarga piloto.

No momento da descarga é sustentando o gradiente de tensão em que ocorreu o raio, em função da aproximação do solo de uma das ramificações da descarga piloto, uma descarga ascendente, constituída de cargas elétricas positivas, denominada descarga de retorno que ocorre seguidamente ao raio cujo nome é descarga de retorno, que por sua vez é constituído de cargas positivas. (RINDAT, 2009)

As redes aéreas podem ser submetidas às sobretensões devidas às descargas atmosféricas de forma direta ou indireta. Detalharemos as implicações e seus efeitos de ambas as formas de descargas.

2.4.1. Sobretensões por Descarga Direta

Uma descarga atmosférica que atinge diretamente uma rede elétrica tem como efeito uma elevação na tensão que, na grande maioria das vezes, superara o isolamento, causando um defeito que pode ser monopolar ou tripolar. (PÓLO PEREIRA, 2009)

As redes aéreas de média e baixa tensão são mais afetadas pelas descargas atmosféricas do que as redes aéreas de nível de tensão mais elevado, em consequência do baixo grau de isolamento dessas redes. De acordo com Mamede Filho (2005) enquanto a tensão suportável de impulso de uma linha de transmissão de 230 kV é de 1.050 kV, uma rede de distribuição de 13,80 kV, apresenta uma suportabilidade de apenas 95 kV.

Assim, uma corrente de descarga de 5 kA provocará uma sobretensão de 875 kV numa rede de distribuição, cuja impedância característica é de 350Ω , superando, em aproximadamente 10 vezes, a tensão suportável de impulso da mesma. A intensidade desta mesma sobretensão, numa linha de transmissão de 230 kV, não seria tão severa, quanto na rede de distribuição (MAMEDE FILHO, 2005).

Para prevenir as descargas diretamente sobre a rede elétrica, são adaptados sistemas de blindagem, tais como cabos pára-raios, instalados acima dos condutores vivos da linha. Outra forma é a instalação de pára-raios atmosféricos de haste em estruturas das subestações de potência. A blindagem criada em torno da rede permite limitar a magnitude das sobretensões.

As redes aéreas podem possuir uma proteção natural devido às estruturas localizadas em suas redondezas. Pode-se citar o exemplo de edificações, árvores e outras linhas em paralelo, todos com altura igual ou superior à altura dos condutores das referidas redes. Essas

blindagens naturais contra as descargas diretas não impedem as sobretensões induzidas decorrentes das descargas sobre os objetos próximos.

A blindagem da rede sofre efeito direto, devido ao posicionamento dos objetos que estão ao redor da linha, de sua altura e de sua continuidade. Assim, um objeto isolado nas proximidades de uma rede aérea proporciona uma menor blindagem porém uma sequência de objetos proporcionam uma melhor blindagem (MAMEDE FILHO, 2005).

2.4.2. Sobretensão por Descarga Indireta Induzida

De acordo com Piantini (1997) na ocorrência de uma descarga atmosférica a se desenvolver nas proximidades de uma rede elétrica, é induzida uma determinada tensão nos condutores de fase e, em consequência, uma corrente associada cuja magnitude é dependente do afastamento entre a rede e o ponto de impacto, e também da amplitude da corrente da descarga, porém se a rede elétrica for dotada de blindagem com cabos pára-raios, estes serão os condutores a que ficarão submetidos a tensão induzida e a corrente associada. Devido às capacitâncias próprias e mútuas entre os condutores de blindagem e os condutores vivos, é desenvolvida nestes, uma onda de tensão acoplada.

No caso de ocorrer uma descarga atmosférica nas redondezas de uma linha, observa-se que as tensões induzidas não superam 500 kV. Na opinião de Mamede Filho (2005) tratando-se de redes com tensão nominal superior a 69 kV ou dotadas de cabos pára-raios para blindagem, o seu nível de isolamento é compatível com os valores das sobretensões induzidas, não acarretando falha nas isolações.

No entanto, redes aéreas com tensão nominal igual ou inferior a 69 kV podem falhar por tensões induzidas. As redes de 69 kV, por exemplo, apresentam uma tensão suportável de impulso (TSI) para surtos atmosféricos de 355 kV. A impedância no pé da torre influi na tensão no topo da torre, devido às ondas de reflexão. Mas saber que as redes suportam os níveis de sobretensão não exclui a necessidade da aplicação dos pára-raios, pois estes valores poderão ser repassados para o secundário, sendo imprescindível que se mantenha o padrão elétrico das linhas, não permitindo a propagação dos efeitos das sobretensões (MAMEDE FILHO, 2005).

O número de sobretensões a que estão sujeitas as redes aéreas devido às descargas indiretas induzidas, é superior ao número de sobretensões por descargas diretas. Isso ocorre

pelo fato de ser muito mais fácil errar o alvo do que passar próximo a ele (SILVA NETO, 2004).

A presença do neutro possui influência direta nos valores de tensão induzidas para o caso de redes aéreas secundárias. É possível determinar o número provável de sobretensões induzidas entre fase e terra, superior a um determinado valor pré-definido, para cada 10 km/ano (SILVA NETO, 2004).

Com a utilização do condutor de aterramento ocorre a redução de aproximadamente 40%, no valor das sobretensões por descargas induzidas. Nas redes secundárias de baixa tensão, o condutor neutro ligado à terra a cada três estruturas propicia um fator de acoplamento, aproximadamente, igual a 0,70 (SILVA NETO, 2004).

É possível determinar a distância mínima horizontal, entre a rede de energia elétrica e o ponto de impacto no solo, de uma descarga atmosférica, a partir da qual a referida descarga seria de natureza indireta (SILVA NETO, 2004).

Uma descarga atmosférica pode proporcionar uma onda de sobretensão que se propaga ao longo dos condutores, tanto no sentido da carga quanto no sentido da fonte. A corrente induzida também se propaga da mesma forma que a tensão (SILVA NETO, 2004).

Se a magnitude da onda de tensão é superior à tensão suportável de impulso dos isoladores de pino ou de suspensão da rede, ocorrerá uma disrupção através dos mesmos ou seja, um não isolamento dos isoladores ocasionando estragos na rede. As disrupções para a terra ocorrem com maior frequência e proporcionam uma severa redução da amplitude da onda viajante. Essas disrupções podem ocorrer, ao longo de várias estruturas após o primeiro poste mais próximo ao ponto de impacto de descarga atmosférica na rede ou o ponto de indução, no caso de descargas laterais.

O fenômeno de uma onda de impulso com módulo e taxa de crescimento elevadas, acompanhadas de grandes diminuições como efeito da ruptura do isolamento, ocorridas nos isoladores das primeiras estruturas da rede aérea. A onda de impulso interrompida caminha pela rede, no sentido dos extremos, fonte e carga, até ser conduzida a terra pelos pára-raios de sobretensão instalados nos respectivos pontos.

Ondas de tensão viajantes constituem o efeito de vários parâmetros, dentre os quais se destacam os mais importantes que, segundo Mamede Filho (2005) são a taxa de crescimento da onda de tensão que varia entre 100 e 2.000 kV. Os valores das sobretensões dependem do módulo da corrente da descarga atmosférica, sendo a forma de onda resultante na rede dependente da ruptura do isolamento ocorrida em suas estruturas. A forma de onda viajante sofre modificações de forma e valor em função das reflexões decorrentes da mudança de

impedância da rede. Por exemplo, uma onda caminha numa rede aérea com uma dada impedância característica e penetra numa rede subterrânea conectada, que tem uma impedância característica diferente e, por fim, a impedância de aterramento medida em cada estrutura (MAMEDE FILHO, 2005).

Ainda de acordo com o autor é possível calcular o surto induzido numa rede de distribuição ou linha de transmissão aérea, conhecendo-se a distância perpendicular, entre o ponto de descarga do raio no solo com o eixo da rede ou linha mencionada.

O valor máximo aceitável das sobretensões é limitado pelo TSI, entretanto, se o valor máximo de crista superior a este provocará descargas nos primeiros isoladores que atingem em sua trajetória, resultando na limitação da onda à tensão suportável de impulso da rede. Mesmo as ondas em questão, possuindo características amortecidas devido à impedância do sistema, ainda são capazes de atingir equipamentos, o que ocorre com muita frequência em transformadores (MAMEDE FILHO, 2005).

A característica determinante de uma sobretensão é a sua taxa de subida. Este fator é considerado como sendo a inclinação da reta que passa pelos pontos com valores de tensão iguais a 10 e 90% da tensão de crista. De forma genérica, uma onda transiente de impulso, e que é definida pelo tempo decorrido para que a referida onda assuma o seu valor de crista, e pelo tempo gasto para que a tensão de cauda adquira o valor médio da tensão de crista. Uma descarga atmosférica induz valores de corrente e tensão elevadíssimos e que geram grandes potências. Pesquisas atuais buscam a utilização destas fontes de energia e sua reutilização para a mesma finalidade (ZANETTA JUNIOR, 2003).

A tensão transitória resultante deve ser comparada com o isolamento da rede, pois, durante uma descarga atmosférica, para saber se haverá o desligamento ou não, basta comparar o pico de tensão com o nível de isolamento. São considerados fatores que mais influenciam a possibilidade de haver o desligamento: o aterramento das estruturas e o acoplamento dos cabos. O que se busca no dimensionamento é manter os níveis de desligamentos em condições aceitáveis (ZANETTA JUNIOR, 2003).

Busca-se hoje a utilização de maneiras cada vez mais eficientes de atuar na prevenção de surtos, pois os equipamentos acoplados à rede são cada vez mais sensíveis as variações das tensões, o que previne as concessionárias de sofrerem processos, pagarem indenizações e reparos de equipamentos.

2.4.3. Defeitos Monopolares

Para sistemas elétricos de potência (SEP), os defeitos monopolares ocorrem com maior frequência do que os defeitos bifásicos, envolvendo ou não a terra ou os defeitos trifásicos, sejam eles de transmissão, distribuição ou industrial.

Quando da ocorrência de um defeito monopolar, as fases não afetadas podem sofrer níveis elevados de sobretensão entre fase-terra, submetendo os equipamentos, de maneira especial os pára-raios, a ríspidas condições de operação. O valor da sobretensão é uma função da configuração do sistema e do tipo de aterramento adotado e se dá devido ao deslocamento do neutro do sistema (MAMEDE FILHO, 2005).

Analisando os sistemas com o primário ligado em triângulo e o secundário em estrela, há três condições distintas a considerar:

- Inicialmente, tratar-se-á dos sistemas com o neutro efetivamente aterrado. São assim considerados, aqueles cujo ponto central da ligação estrela, está solidamente aterrado, isto é, não há nenhuma resistência ligada intencionalmente entre o ponto neutro e a terra. Neste tipo de sistema, quando uma fase vai a terra, podem surgir sobretensões sustentadas nas fases sãs, cujo valor excede, em geral, a 40% do valor da tensão de operação da rede, ou seja, as sobretensões podem atingir no máximo 80% da tensão fase terra(MAMEDE FILHO, 2005).
- Já em se tratando dos sistemas com neutro aterrado através de resistência, o aterramento do neutro, busca reduzir o valor da corrente de curto-circuito fase-terra e, portanto, os custos provenientes do dimensionamento de equipamentos do sistema. Na opinião de Mamede Filho (2005) são considerados sistemas com neutro aterrado através de resistência, aqueles cujo ponto central da ligação estrela está conectado a terra através de um resistor, intencionalmente instalado. O nível de sobretensão depende, evidentemente, do valor da resistência elétrica do resistor adotado para reduzir a corrente de curto-circuito ao valor requerido. Assim, para baixos valores de resistência de aterramento, o nível de sobretensão sustentado das fases não afetadas, não deve exceder a

tensão de operação entre fases da rede. Quando o valor da resistência for elevado, a tensão sustentada entre fase e terra pode assumir valores superiores à tensão entre fases (MAMEDE FILHO, 2005).

- Por fim, descrever-se-ão os sistemas com neutro aterrado através de reatância, ou seja, quando o neutro é aterrado, usa-se uma carga reativa sobre ele para que cumpra a função de reduzir o valor da corrente de curto-circuito fase-terra. É importante mencionar que a determinação da tensão nominal de um pára-raios é função do nível de sobretensão, presumido no ponto de sua instalação. Nessa perspectiva o máximo valor da sobretensão sustentada entre as fases e a terra não deve exceder à tensão de operação entre as fases da rede. Enquanto isso, o maior valor da sobretensão transitória pode chegar a 2,73pu (Por Unidade) da tensão de operação do sistema (MAMEDE FILHO, 2005).

2.4.4. Perda de Carga por Abertura do Disjuntor

A retirada de parte da carga de um sistema com o efeito da ação de um disjuntor causará a elevação da tensão em todo o sistema, devido à redução do fluxo de corrente de carga. O efeito capacitivo das linhas de transmissão reduz a impedância do sistema elétrico causando a consequentemente uma queda de tensão.

Os geradores operam superexcitados devido ao fato de alimentarem, normalmente, cargas indutivas o que resulta em tensões na geração superiores à tensão de operação do sistema.

Durante o regime de operação normal do sistema a tensão na geração é superior à tensão na carga, devido às quedas de tensão na resistência da linha de transmissão e na sua reatância indutiva. No entanto após a abertura do disjuntor, um grande bloco de carga foi desligado, o sistema elétrico sofrerá uma elevação de tensão em função da redução do fluxo de corrente nas linhas de transmissão e do efeito acentuado e preponderante da reatância capacitiva (MAMEDE FILHO, 2005).

As sobretensões, tendo como causa a rejeição de carga são caracterizadas por uma onda na forma senoidal à frequência industrial, cujo módulo depende do nível de curto-

circuito do sistema, do comprimento da linha de transmissão e da compensação série ou paralela disponível no sistema (MAMEDE FILHO, 2005).

Ocorrendo o desligamento de grandes cargas o gerador tende a acelerar, pois, analisando-se a conservação de energia, o trabalho liberado sobre a carga fica localizado no eixo do gerador, pelo fato de não estar sendo consumido. Com efeito, tem-se o aumento da velocidade do gerador, o que influi diretamente na frequência da tensão em seus terminais, até que os reguladores atuem sobre o gerador, atualizando a velocidade, no sentido de reduzir sua excitação e levá-la a condições nominais de operação.

2.4.5. Fenômenos de Ferro-Ressonância

Em um sistema elétrico, com reatâncias, capacitâncias e indutâncias, quando é submetido a uma frequência, cujo valor aproxima-se da frequência natural desses parâmetros, surgem elevações de tensão devido à redução de impedância, o que pode ser percebido claramente na Equação 1, isto é, $X_1 \cong X_c$, sendo R o responsável pela limitação da corrente elétrica, o que dá origem a correntes elevadas e, por consequência, a tensões elevadas.

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_1 - X_c)^2}} \quad (1)$$

sendo que:

V - Tensão da rede

R - Componente Resistiva da Rede

X_1 - Componente Indutiva da Rede

X_c - Componente capacitiva da Rede

I - Corrente da Rede

Quando ocorre o fenômeno descrito anteriormente, diz-se que o sistema está ressonante. Isto ocorre em situações especiais quando, por exemplo, um circuito trifásico, formado por condutores primários isolados, alimenta um transformador cuja proteção é constituída por elementos monopolares, tais como fusíveis de alta capacidade de ruptura ou chaves fusíveis monopolares.

Na ocorrência de um defeito monopolar ou bipolar a proteção de uma das fases atua, permitindo a operação do transformador através de duas fases. Os condutores de alimentação

do transformador são representados por sua capacitância para a terra e o transformador é representado por sua reatância indutiva, formando, desta maneira, um circuito L-C. Com no defeito uma parte indutiva é retirada do circuito, o que altera o sistema vindo a proporcionar a igualdade entre a reatância indutiva e capacitiva, esse fato caracteriza a ressonância.

Podem-se prevenir tais efeitos com a aplicação de chaves seccionadoras tripolares, acionadas por elementos fusíveis de alta capacidade de ruptura ou aplicar disjuntores tripolares.

2.4.6. Efeito Ferrante

Na ação do disjuntor, parte da rede é retirada do sistema e neste ponto a corrente é eliminada, causando elevação de tensão na linha de transmissão que fica submetida a uma elevação de tensão. A ocorrência desse fenômeno deve-se ao fluxo da corrente capacitiva através da indutância série da linha, em outras palavras, a indutância da rede força a continuidade da corrente, fato que gera um acúmulo de carga na ponta da rede, levando ao aumento do nível de tensão.

2.5. Redes Secundárias

As redes secundárias são responsáveis por alimentar os consumidores em baixa tensão. Os condutores que formam a linha têm origem no secundário do transformador, que pode ser do tipo trifásico ou monofásico. Em redes secundárias trifásicas são utilizados nas linhas de baixa tensão quatro condutores, sendo que três deles correspondem às fases e o condutor mais acima é o neutro.

As linhas secundárias são geralmente instaladas, abaixo das redes primárias quando esta existe, pelo fato de haver um percurso da rede em que apenas o secundário é necessário. Tem-se que, o afastamento mínimo entre as redes primárias e secundárias é de 80 cm.

Para ilustrar temos a Figura 2 que representa uma rede secundária convencional, muito utilizadas em zona rural e também a Figura 3 temos a representação de uma rede secundária isolada para redes urbanas.

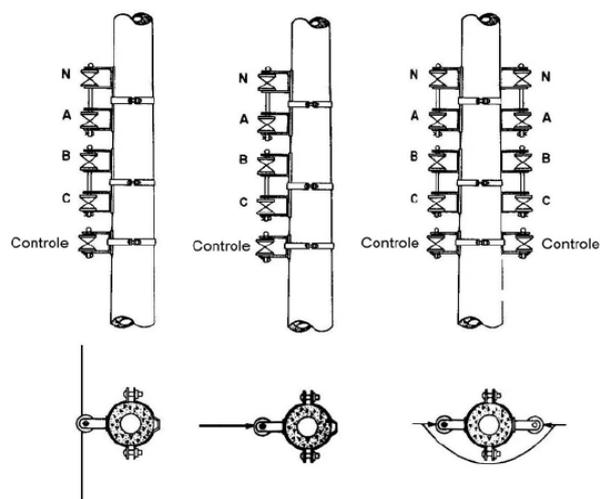


Figura 2: Rede secundária convencional segundo o padrão CEMIG

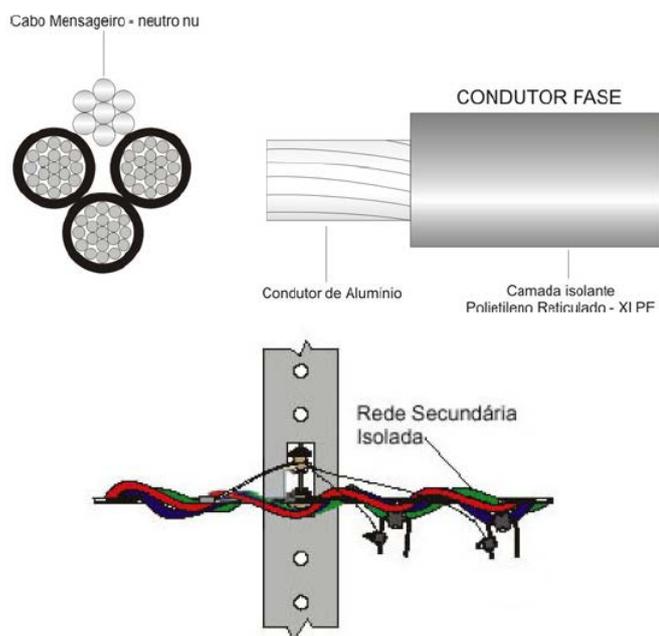


Figura 3: Rede secundária isolada segundo o padrão CEMIG

2.6. Padrão CEMIG

Segundo as normas da CEMIG, em seu Manual de distribuição ND-3.1 (2001), para a instalação de pára-raios, a proteção da rede primária contra as sobretensões, é assegurada no projeto, por decisões que envolvem os seguintes critérios:

a) Uso de dispositivos de proteção (pára-raios de média tensão);

b) Tensão suportável de isolamento (uso de padrões de montagem de NBI elevados);

Devem ser aplicados pára-raios de média tensão, com tensão nominal de 12 kV, 21 kV e 30 kV, para o sistema de 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV, respectivamente, e corrente de descarga nominal de 10 kA, equipados com desligador automático para desconectar eletricamente e sinalizar pára-raios defeituosos.

Nesse caso, devem ser instalados quando:

a) Transformadores em redes nuas e protegidas.

- Devem ser conectados entre fase e neutro/aterramento em todos os transformadores (três unidades para o trifásico e uma unidade para o monofásico);

b) Outros equipamentos

- Devem ser instalados dois conjuntos de pára-raios, sendo um do lado da fonte e outro, do lado da carga, para proteção dos reguladores de tensão, religadores, seccionadores, chaves SH6 e chaves normalmente abertas. Os bancos de capacitores devem ser protegidos por apenas um conjunto de pára-raios.

c) Outras situações

- Devem ser instalados pára-raios de média tensão também nos casos em que existam pontos de transição de redes envolvendo RDA (rede de distribuição área), RDS (rede de distribuição subterrânea); RDP (redes de distribuição protegida), e RDI (rede de distribuição isolada), em estruturas de rede convencional com mudança de NBI (Índice de Isolamento Básico).

Uma característica considerada referência é o NBI ou TSI que exerce influência direta no desempenho dos pára-raios sobre as sobretensões atmosféricas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Software PSCAD

Neste trabalho usamos o software PSCAD como ferramenta para fazer as simulações da atuação do para raios. A ELECTROMAG é a representante oficial e exclusiva do **PSCAD** no Brasil. O **PSCAD** é um software de simulação desenvolvido pela Manitoba-HVDC, dedicado ao projeto e à análise de sistemas de potência.

Esta ferramenta é utilizada em estudos de qualidade de energia, análises de defeitos e planejamento energético. Sua aplicação inclui a simulação de Linhas e cabos de energia, Cargas industriais altamente não-lineares, acionamentos com eletrônica de potência, faltas assimétricas, geração de energia distribuída, máquinas rotativas.

3.2. Simulação Computacional de Pára-Raios

O sistema a ser modelado é um transformador acoplado a uma linha trifásica como pode ser observado na Figura 4. O sistema é modelado de forma que sofra o efeito de uma sobretensão, que é simulado com a injeção de corrente que obedece a Equação 2.

$$I = 50 \left(e^{(-50^{-6}) \times t} - e^{(-1,2 \times 10^{-6}) \times t} \right) \quad (2)$$



Figura 4: Foto de rede trifásica convencional

O circuito abaixo demonstrado foi montado a partir dos dados presentes no software PSCAD, conforme a Figura 5.

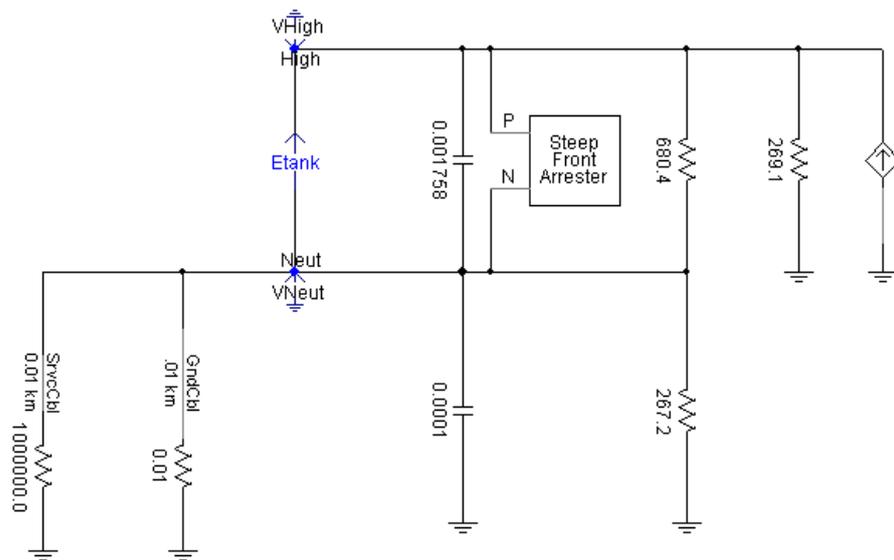


Figura 5: Circuito usado para simular a atuação do pára-raios

Este circuito busca analisar os efeitos da sobretensão, atuando sobre um transformador e a propagação de tais efeitos sobre a linha de transmissão. Na Figura 5 podemos observar uma caixa que representa o pára-raios indicada pelo nome “Steep Front Arrester”.

Na Figura 6 pode-se visualizar o circuito que modelou o pára-raios.

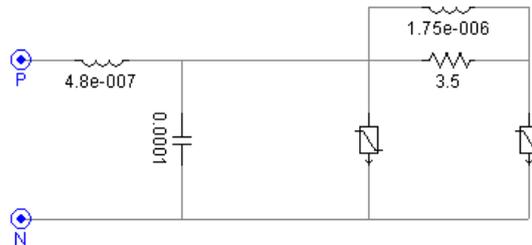


Figura 6: Circuito usado para simular o pára-raios

Foram utilizados dois blocos de pára-raios para simular um rápido efeito transitório da sobretensão (MAMEDE FILHO, 2005). A parte do circuito demonstrado na figura 6, que fica entre o pára-raios, representa um atraso devido à característica do material com o qual é fabricado. O acoplamento do equipamento em questão na rede possui uma indutância em série e uma capacitância em paralelo.

O bloco do pára-raios possui um comportamento não linear de sua resistência, de acordo com a Figura 7. A partir destes pontos, podem-se inserir no programa, alterações do comportamento do resistor não linear, com o objetivo de se aproximar dos dados fornecidos pelo fabricante ou simulados em laboratório. Uma vez inseridos os pontos, conforme o comportamento do equipamento, ele utiliza interpolações para descrever o comportamento em outros pontos de atuação.

I-V Characteristic	
X1	0.001 [kA]
X2	0.01 [kA]
X3	0.1 [kA]
X4	0.2 [kA]
X5	0.38 [kA]
X6	0.65 [kA]
X7	1.11 [kA]
X8	1.5 [kA]
X9	2.0 [kA]
X10	2.8 [kA]
X11	200.0 [kA]
Y1	1.1 [p.u.]
Y2	1.6 [p.u.]
Y3	1.7 [p.u.]
Y4	1.739 [p.u.]
Y5	1.777 [p.u.]
Y6	1.815 [p.u.]
Y7	1.853 [p.u.]
Y8	1.881 [p.u.]
Y9	1.91 [p.u.]
Y10	1.948 [p.u.]
Y11	3.2 [p.u.]

Figura 7: Janela de entradas dos pontos usados para modelar o pára-raios

A resistência do pára-raios se comporta inversamente a tensão de acordo com o que se observa na Figura 8, que é o gráfico da variação da impedância em relação ao nível de tensão aplicado sobre seus terminais.

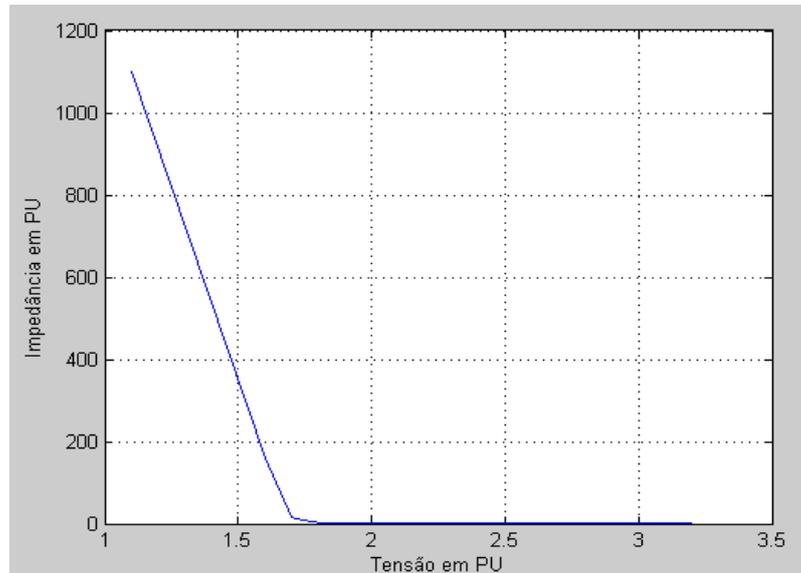


Figura 8: Gráfico do valor da impedância do pára-raios em função da tensão

A impedância cai conforme o nível de tensão sobe. Pode-se facilmente visualizar graficamente, na Figura 8, pois conforme o nível de tensão sobe o resistor permite mais passagem de corrente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras simulações buscaram averiguar o comportamento do sistema com a atuação do pára-raios e com a ausência do mesmo. Com a utilização do pára-raios pode-se averiguar no Figura 9 que os valores de tensão se estabilizaram com uma tendência de diminuição das tensões. Tanto a tensão de fase, quanto a tensão sobre o neutro passaram a possuir o mesmo comportamento, isso se deve ao fato de que o pára-raios insere corrente entre a fase e o neutro.

A Figura 10 mostra o comportamento da tensão entre as fases e a corrente que simula a corrente inserida no sistema pelo efeito da sobretensão que está indicada na equação 2.

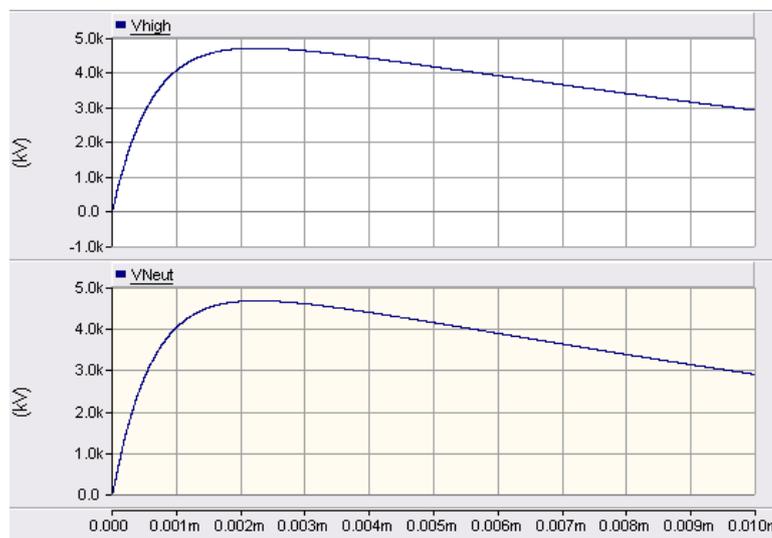


Figura 9: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

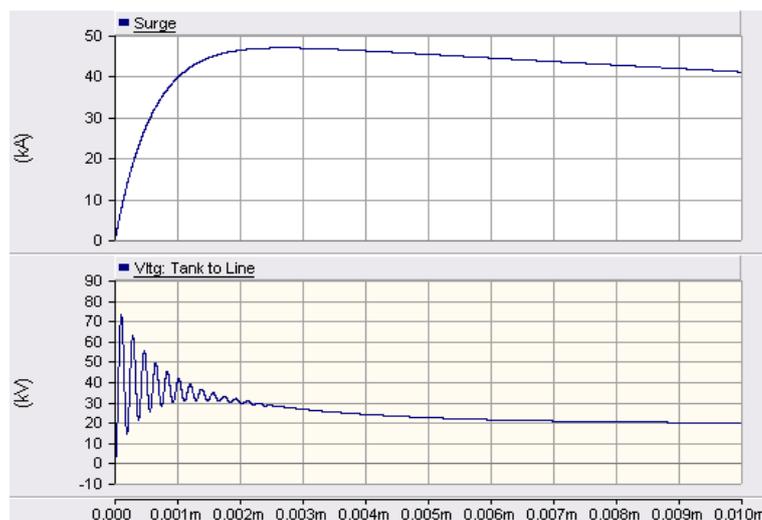


Figura 10: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

Puderam-se averiguar os efeitos da ausência do pára-raios nos figura 11 e 12. Na figura 11, observou-se os valores de tensão da fase indicado pelo nome “Vhigh” e do neutro indicado pelo nome “Vneut”. Para estes gráficos, observou-se que o nível de tensão da fase assume valores elevados e a do neutro, sofre uma menor subida dos níveis, pelo fato de o neutro sofrer pouca influência devido ao seu aterramento, e sem a atuação do pára-raios, a corrente da fase que surge como efeito da sobretensão não é injetada sobre o neutro. Na figura 12 observou-se que a tensão de linha também assume valores elevados sem a atuação do pára-raios.

Percebe-se, após análise das Figuras 11 e 12 que, com a ausência do pára-raio no sistema, observa-se elevados valores de tensão que pode ocasionaria o rompimento da linha com queima de diversos componentes.

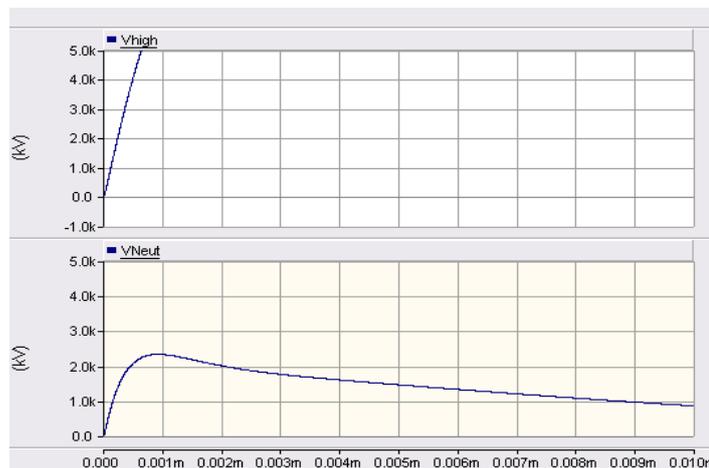


Figura 11: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

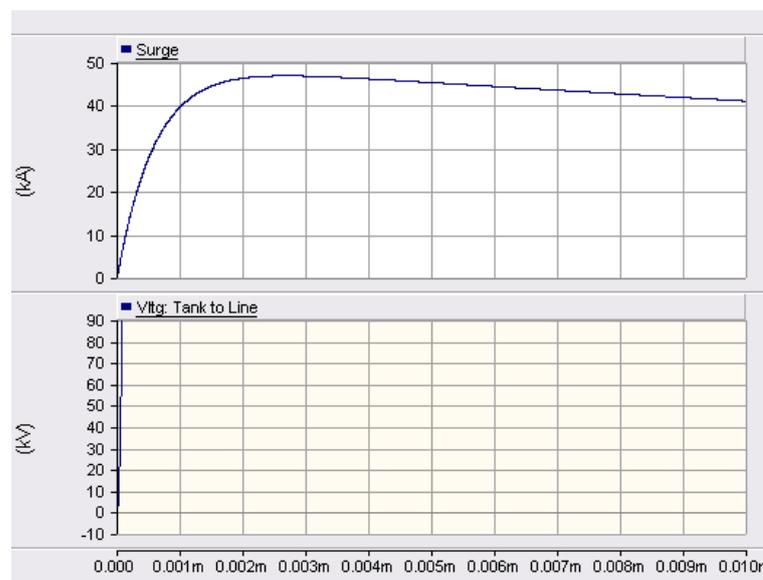


Figura 12: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

A segunda simulação foi feita com a aplicação da análise do aterramento sobre da linha. O aterramento, segundo a norma, depende de diversos fatores, quando feito sobre um transformador é feito com um mínimo de quatro hastes. A resistência mínima da terra é de 80 Ω , e esta resistência é medida por um equipamento chamado Terrômetro, caso a resistência medida não seja compatível com a norma, então se pode tratar o solo com um componente como o carvão, que melhora a situação para o aterramento.

A alteração da resistência de terra tem como objetivo a verificação do comportamento das tensões frente a estes parâmetros.

Para os Figura 13 e 14, utilizou-se uma impedância de terra de 10 Ω e contatou-se este comportamento, que pode ser observado no Figura 13 com as tensões de fase e do neutro, e no Figura 14, com as tensões de linha.

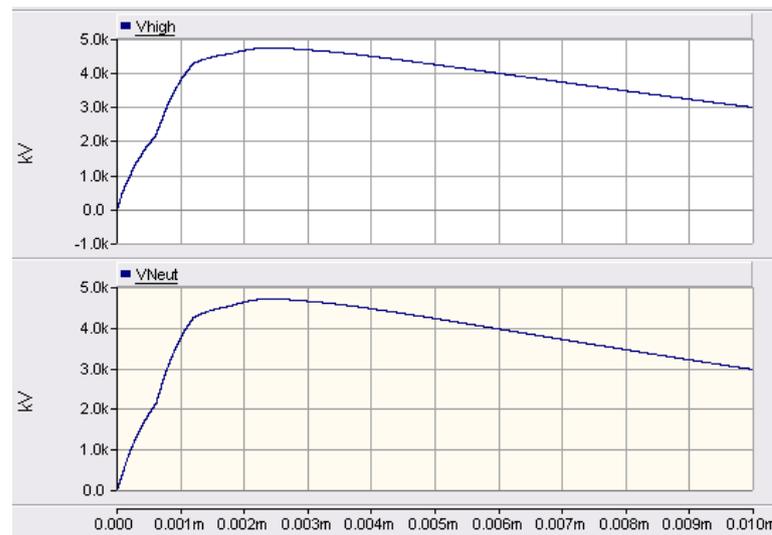


Figura 13: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

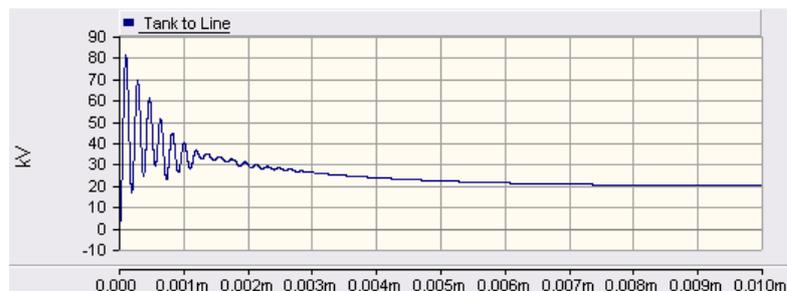


Figura 14: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

Utilizou-se agora um valor de 1000Ω para resistência de aterramento, o que gerou os resultados visualizados na Figura 15 e que permite perceber que a resistência possui forte importância para um efetivo controle das sobretensões.

Outros valores de resistência de terra foram utilizados e percebeu-se o comportamento que indica que, quanto menor a resistência da terra melhor ação do pára-raios na eliminação das sobretensões.

É desejável que as resistências de terra de uma linha de distribuição sejam as menores possíveis, tendo em vista a segurança dos usuários e o próprio desempenho da linha.

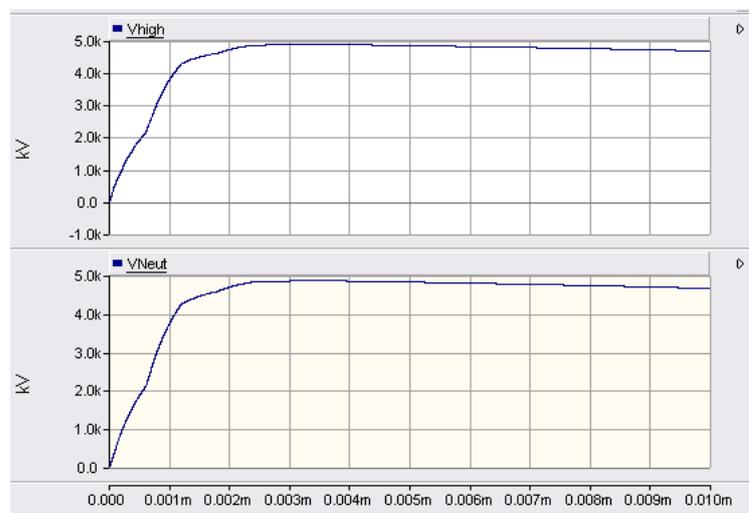


Figura 15: Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede em relação ao transformador

Para um análise da dependência da resistência quanto à eficiência da atuação dos pára-raios, montou-se um gráfico com a variação da impedância em um ponto específico da linha. Essa análise foi feita a oito metros do transformador e os resultados foram os valores de pico de tensão segundo a impedância de aterramento.

Na Figura 16 observamos uma saturação nos níveis de tensão, o que é natural pois o sistema se aproxima da situação de não aterramento, isso faz com que haja uma menor variação da tensão com a impedância mas, neste ponto de atuação do pára-raios a rede começa a propagar os níveis de tensão em toda a sua extensão, fato que poderia gerar danos em equipamentos que estejam sujeitos a estes níveis de tensão, como se pôde observar no Figura 17.

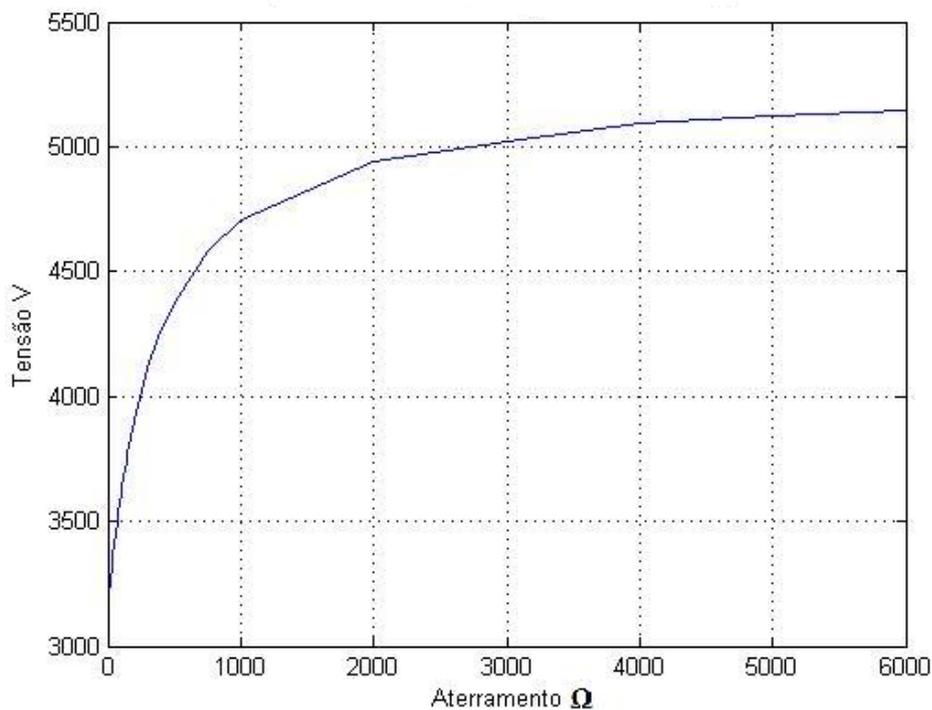


Figura 16: Gráfico de tensão em relação à resistência de aterramento

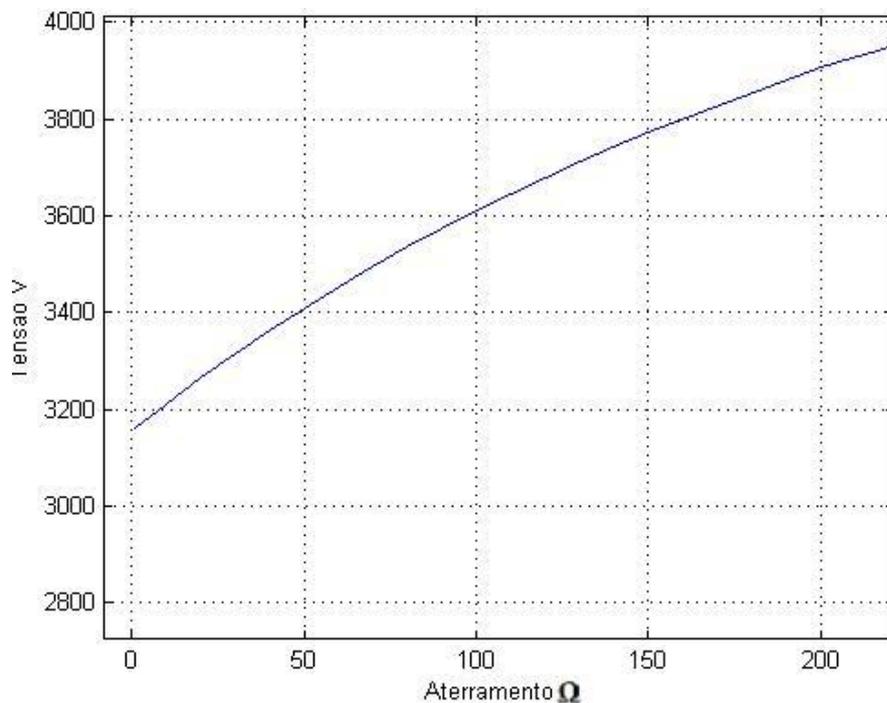


Figura 17: Gráfico de tensão em relação à resistência de aterramento

Na Figura 17, foca-se o intervalo em que pode visualizar com maior facilidade a região em que se encontra o ponto de impedância de aterramento, determinado pela norma da CEMIG, que exige um aterramento de 80Ω.

Neste intervalo, a cada 1Ω observa-se aproximadamente 4V de acréscimo no valor de pico de tensão em uma distância de oito metros do transformador, o que pode ser determinante no dimensionamento dos condutores e equipamentos. É isso que torna necessário um cuidado maior com o aterramento para um perfeito funcionamento das linhas de distribuição.

Na melhoria do aterramento são aplicados diversos métodos, sendo utilizada a construção de malhas de aterramento e a utilização de componentes, que tratam o solo para uma diminuição da resistência ou o aumento do número de hastes. Com a grande necessidade de sistemas confiáveis, surge a necessidade da construção de linhas que suportem os abalos gerados pelas sobretensões.

5. CONCLUSÃO

Em todo o trabalho de pesquisa desenvolvido foi observado a relevância do pára-raios no perfeito funcionamento dos sistemas elétricos de potência. Sendo que a sua atuação previne o rompimento do fornecimento de energia e a queima de equipamentos devido aos efeitos das sobretensões.

Com este estudo foi possível averiguar a utilização do equipamento com a modificação do aterramento, concluindo-se que a utilização de um aterramento de qualidade, dentro dos padrões especificados pelas normas, é necessário para o perfeito funcionamento do sistema elétrico.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BUENO, P. R., OLIVEIRA, M. M., Santos, C. M. R., LONGO, E. S., EBCHERANI, M. T., VARELA, J. A. **Varistores à base de SnO₂: Estado da arte e perspectivas** – Departamento de Química, UFESCar, Araragura, São Paulo, 2000.

CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais; **Projeto de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. Manual de distribuição ND-3.1., 2001

CERA ZANETTA JUNIOR, L. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. 1ª Ed. São Paulo: USP, 2003.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

PIANTINI, A. **Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas**. 1991. 205 P. Dissertação de Mestrado – Escola politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

PÓLO PEREIRA, M. **Sob tensões transitórias devido a descargas atmosféricas em estruturas com dois circuitos de tensões diferentes** - Furnas Centrais Elétricas S.A. - Rio de Janeiro, s.d. 2009

RINDAT - **Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas**. Disponível em: <http://www.rindat.com.br/>. Acesso em maio de 2009.

SILVA NETO, A. **Tensões Induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de baixa tensão**. S.l, 2004. 50 P. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.